



# UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Centro Interdipartimentale di Studi e Attività Spaziali (CISAS)

SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE TECNOLOGIE E  
MISURE SPAZIALI (XX Ciclo)

Sede Amministrativa: Università degli Studi di Padova

**Indirizzo: Misure Meccaniche per l'Ingegneria e lo Spazio**  
**Curriculum: Diagnostica ed affidabilità delle strutture**

**Tesi**

**SVILUPPO DI METODOLOGIE PER LA QUALIFICA DI COMPONENTI MEDIANTE  
TERMOELASTICITA'**

**DEVELOPEMENT OF A MEASURE METHODOLOGY FOR MECHANICAL QUALIFICATION  
USING THERMOELASTICITY AND VIBRATION TESTS**

**Dottorando: Antonio Di Renzo**

**Supervisore:** Prof. Gianluca Rossi (Università degli Studi di Perugia)

**Co-Supervisore:** Ing. Roberto Marsili (Università degli Studi di Perugia)

**Coordinatore dell'Indirizzo:** Prof. Francesco Angrilli (Università degli Studi di Padova)

**Direttore della Scuola:** Prof. Pierluigi Bernacca (Università degli Studi di Padova)

## Indice

<b>Capitolo 1: le tecniche di analisi sperimentali e numeriche</b>	1
Introduzione	1
1.1 Metodologie numeriche: il metodo agli elementi finiti	1
1.2 Metodologie sperimentali	2
1.2.1 Metodi estensimetrici	2
1.2.2 Metodi di analisi di campi di sollecitazione	6
<b>Capitolo 2: l'effetto termoelastico e sue applicazioni per l'analisi delle sollecitazioni</b>	12
Introduzione	12
2.1 Il principio termoelastico	12
2.2 Analisi delle tensioni mediante termoelasticità	14
2.3 Fondamenti sulla radiazione infrarossa	16
2.4 Cause di incertezza nella misura mediante termoelasticità	20
2.5 Analisi delle immagini digitali	24
2.6 Sistemi di acquisizione dell'immagine termoelastica	25
2.6.1 Sistema SPATE	26
2.6.2 Sistema DeltaTherm	27
2.6.3 La termocamera DeltaTherm 1560 e il sistema di acquisizione	29
2.7 Acquisizione ed elaborazione dell'immagine	31
2.7.1 Correlazione in frequenza	32
2.7.2 Correlazione in ampiezza e fase	33
<b>Capitolo 3: problematiche legate al movimento nelle misure effettuate Mediante termoelasticità</b>	36
Introduzione	36
3.1 Effetti del movimento su mappe termoelastiche acquisite con sistemi a CCD	36
3.1.1 Pseudo-segnali di tensione	38
3.1.2 Effetto spigolo	38
3.2 Misure su oggetti in movimento	40

3.2.1 Diminuzione del tempo di acquisizione	41
3.2.2 Soluzione mediante software	41
3.2.3 Soluzione mediante post-processing	43
<b>Capitolo 4: allestimento di banchi prova per la qualifica di misuratori di portata</b>	44
Introduzione	44
4.1 Caratteristiche tecniche dei contatori oggetto delle prove	44
4.1.1 Contatori con $Q_n < 16 \text{ m}^3/\text{h}$	44
4.1.2 Contatore con $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$	46
4.2 Caratteristiche tecniche dei misuratori utilizzati come riferimento	48
4.2.1 Misuratore avente $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$	48
4.2.2 Misuratore avente $Q_n < 16 \text{ m}^3/\text{h}$	50
4.3 I banchi prova "idraulici"	51
4.3.1 Banco prova per contatori con $Q_n < 16 \text{ m}^3/\text{h}$	51
4.3.2 Banco prova per contatori con $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$	52
4.4 Il banco prova meccanico	58
4.4.1 Il banco prova per misuratore con $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$	58
4.4.2 Il banco prova per misuratore con $Q_n < 16 \text{ m}^3/\text{h}$	64
<b>Capitolo 5: esecuzione delle prove di qualifica meccanica su misuratori di portata</b>	66
Introduzione	66
5.1 Prove su misuratori con $Q_n < 16 \text{ m}^3/\text{h}$	66
5.1.1 Prima taratura idraulica	66
5.1.2 La prova di vibrazione	69
5.1.3 Seconda taratura idraulica	69
5.1.4 Valutazione del decadimento prestazionale dopo il ciclo di vibrazioni	71
5.2 Prove su misuratori con $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$	73
5.2.1 Prima taratura idraulica	73
5.2.2 La prova di vibrazione	75

5.2.3	Seconda taratura idraulica	76
5.2.4	Considerazioni sull'effetto delle vibrazioni	78
5.3	Analisi delle sollecitazioni agenti sul vincolo tra contatore e condotta mediante termoelasticità	80
5.3.1	La catena di misura	80
5.3.2	Sviluppo del banco prova e le mappe di stress	82
	<b>Capitolo 6: le prove sperimentali: lo sviluppo del banco prova e la catena di misura</b>	89
	Introduzione	89
6.1	Sviluppo del banco prova	89
6.2	La catena di misura	95
6.2.1	Il funzionamento della catena di misura	95
6.3	Descrizione delle prove sperimentali	97
6.3.1	Acquisizione dei filmati termici	97
	<b>Capitolo 7: analisi termoelastica delle tensioni mediante elaborazione dei filmati termici</b>	100
	Introduzione	100
7.1	Il software termoimage	100
7.2	Filtraggio del segnale termico: le mappe di tensione Termoelastiche	108
7.2.1	I risultati delle prove	109
7.2.2	Analisi delle mappe termoelastiche	113
7.2.3	Il confronto con le mappe ottenute con la ventola ferma	113
7.3	La scalatura delle mappe termoelastiche	114
7.4	Analisi della distribuzione di stress con il modello agli elementi finiti	115
	<b>Appendice 1: le normative europee sui misuratori</b>	118
	Introduzione	118
1.1	Requisiti	118
1.2	Programmi di prova	123
1.3	Ambiente meccanico	124

1.4 Circuito di prova e strumenti di riferimento	125
1.5 Condizioni di riferimento	126
1.6 Curva caratteristica	127
1.7 Effetto delle grandezze di influenza	128
<b>Appendice 2: generalità sulle misure di portata</b>	132
Introduzione	132
2.1 Descrizione generale	132
<b>Appendice 3: analisi dei segnali nel dominio della frequenza</b>	148
3.1 La serie di Fourier	148
<b>Appendice 4: il principio di funzionamento del de-rotator ottico</b>	152
4.1 Descrizione del principio di funzionamento	152
<b>Conclusioni</b>	157
<b>Bibliografia</b>	159

## Indice delle figure

modello agli elementi finiti delle pale di una turbina idraulica	1
modello F.E.M. di una turbina idraulica con mesh più accurata in corrispondenza punti critici	2
schema del circuito del ponte di Wheatstone	3
schema degli estensimetri fotoincisi	5
esempio di immagine fotoelastica	7
esempio di immagine speckle	8
schema dello speckle interferometro	8
esempio di una mappa termoelastica	10
evoluzione nell'applicazione dell'effetto termoelastico per l'analisi delle tensioni	15
grafico della legge di Planck	17
funzionamento di un corpo reale come ricevitore di energia radiante	18
schema delle finestre di assorbimento atmosferico	19
spettro di trasmissione di materiali ottici	20
applicazione statica del carico $F$ su una trave a sbalzo: andamento della tensione e della temperatura	21
ritardo di fase tra la risposta del sistema di misura ed il segnale relativo al carico applicato alla struttura	22
riduzione della risposta termoelastica alle basse frequenze	22
Attenuazione delle fluttuazioni di temperatura al variare dello strato di vernice e della frequenza di carico	23
rappresentazione di uno scalare $I$ su un dominio bidimensionale $x, y$	24
esempio di immagine digitalizzata	24
modalità di scansione dello SPATE del segnale sulla superficie di un provino	26
fotografia del sistema SPATE pronto in uso	27
modalità di acquisizione del segnale con il DeltaTherm	27
schema del sensore Focal Plane Array (FPA)	28
confronto del rapporto rumore/segnale tra un sistema SPATE ed uno FPA	29

fotografia della termocamera Delta Therm 1560	31
sistema di misura del DeltaTherm	31
elaborazione del segnale termico	32
catena di misura del sistema termoelastico	33
rappresentazione vettoriale del segnale termoelastico $\hat{S}$ e del segnale di riferimento $\hat{R}$	34
discretizzazione dell'area di vista andamenti temporali delle temperature di alcuni pixel	36
mappa di stress superficiale agente sul provino	37
spostamento relativo tra termocamera e provino	37
il provino in moto, e l'area (il cerchio) di misura fissa	38
oggetto in esame all'istante iniziale	39
istante successivo, inquadratura parziale dello sfondo	39
mappe termografiche che mostrano effetto spigolo	39
sistema ottico per la correzione dell'effetto spigolo (strumento allineato con il misurando)	40
sistema ottico per la correzione dell'effetto spigolo (strumento non allineato con il misurando)	40
termografia su oggetto fisso rispetto alla termocamera (sinistra); termografia su ventola in rotazione (destra)	41
effetto bordo in corrispondenza di uno spigolo	42
andamento della variazione di temperatura lungo una linea di interrogazione	42
fotografia del primo contatore testato	44
fotografia del secondo contatore testato	45
fotografia del terzo contatore testato	46
fotografia del Flowstar M	46
fotografia del misuratore Vorsicht HM 50F	48
sezione del misuratore Vorsicht HM 50F	49
fotografia del misuratore ISOIL MS 501	50
schema del banco idraulico utilizzato per misuratori con $Q_n < 16 \text{ m}^3/\text{h}$	51

fotografia del banco prova idraulico per misuratori con $Q_n < 16 \text{ m}^3/\text{h}$	52
schema dell'impianto idraulico con $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$	52
immagine dell'impianto utilizzato	53
valvola di regolazione entrata e valvola by-pass	53
valvola di uscita e tratto divergente	53
la pompa centrifuga e il motore	54
schema del sistema acquisizione dati	55
output del software dedicato alla visualizzazione dei dati provenienti dal misuratore di riferimento	55
front panel del programma per acquisizione immagini	56
la webcam posizionata sopra al display di lettura del misuratore	56
immagini inizio prova del display del misuratore	57
immagini fine prova del display del misuratore	57
schema di collegamento del sistema per prova di vibrazione	58
lo shaker LDS V650	59
il controller Signalstar Vector	61
il condizionatore di segnale PCB 441A42	62
il sistema di supporto del misuratore	63
collegamento shaker-contatore	63
posizionamento dell'accelerometro	63
il banco prova meccanico	64
modello cad del supporto	64
la catena di misura e il banco prova	65
fotografia dell'analizzatore di spettro Ono Sokki	65
confronto tra le curve errore-portata dei contatori Perugia - Ancona - Milano dopo la prima taratura idraulica	68
il banco prova per il test di vibrazione su misuratori con $Q_n < 16 \text{ m}^3/\text{h}$	69
confronto tra le curve errore-portata dei contatori Perugia - Ancona - Milano post vibrazione	71

grafico per il confronto delle prestazioni ante e post vibrazione del contatore in uso a Perugia	72
grafico per il confronto delle prestazioni ante e post vibrazione del contatore in uso ad Ancona	72
grafico per il confronto delle prestazioni ante e post vibrazione del contatore in uso a Milano	73
la curva di taratura del misuratore con $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$ prima del test di vibrazione	75
la curva di taratura del misuratore con $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$ dopo il test di vibrazione	78
confronto tra le curve di taratura ante e post vibrazione	79
fotografia del generatore di segnale HM8030-6 della HAMEG	80
lo schema della catena di misura per T.S.A.	82
contatore di uso domestico e porzione di tubazione idraulica studiata	83
il primo banco prova per misure di stress sul vincolo tra condotta e contatore ( $Q_n < 16 \text{ m}^3/\text{h}$ )	83
la mappa dello stress sul vincolo	84
andamento dello stress lungo la linea sulla mappa	84
la nuova configurazione del banco prova	85
una mappa dello stress acquisita senza il Mo-Comp	86
una mappa dello stress acquisita con il Mo-Comp	87
un'altra mappa dello stress acquisita con il Mo-Comp	88
la fotografia della ventola oggetto del nostro studio	89
il motore elettrico per il test sulla ventola	90
la foto del banco prova montato sullo shaker	91
un particolare del motore: l'albero	91
schema di montaggio del supporto flangia	92
il montaggio della ventola al motore	92
la foto del banco prova montato sullo shaker	93
lo schema del posizionamento dei marker sulla ventola	93
la foto del marcatore termico	93

la foto della ventola vincolata rigidamente allo shaker	94
la foto del supporto della ventola	94
la foto del generatore di tensione HP E3631A	95
lo schema di collegamento della catena di misura	96
la foto del banco prova in funzione	97
la ventola e la pala in esame	97
la massa applicata alla pala in esame	98
foto dei marcatori termici alimentati	98
alcuni frames del filmato termico	99
la schermata del software Termoimage	101
la finestra "Selezione cartella dei files" del software Termoimage	101
la finestra "Impostazioni filtri su immagini" del software Termoimage	102
finestra "Selezione tipologia di creazione contorni" del software Termoimage	102
finestra "Selezione criteri per individuazione aree" del software Termoimage	103
finestra "elenco delle aree trovate" del software Termoimage	103
la finestra "Selezione Pattern" del software Termoimage	104
la finestra "selezione del tipo di pattern" del software Termoimage	104
la finestra "elenco dei file da riallineare" del software Termoimage	105
la finestra "elenco dei file riallineati" del software Termoimage	105
la finestra "Selezione file dei risultati" del software Termoimage	106
la finestra "selezione area di lavoro da salvare" del software Termoimage	106
il frame ruotato e la sua area di ingombro	107
successione di aree di ingombro	107
area di ingombro totale	107
mappe di tensione della ventola (a sinistra) e della pala (a destra) ottenute con il test 1	108

un'altra mappa di tensione ottenuta con il test 1	109
mappe della fase della ventola ottenute con il test 1	109
mappe di tensione della ventola e della pala ottenute con il test 2	109
mappe di fase della ventola e della pala ottenute con il test 2	110
mappe di tensione della ventola e della pala ottenute con il test 3	110
mappe di fase della ventola e della pala ottenute con il test 3	110
mappe di tensione della ventola e della pala ottenute con il test 1 (lock-in)	111
mappe di fase della ventola (a sinistra) e della pala (a destra) ottenute con il test 1 (lock-in)	111
mappe di tensione della ventola e della pala ottenute con il test 2 (lock-in)	111
mappe di fase della ventola e della pala ottenuta con il test 2 (lock-in)	112
mappe di tensione della ventola e della pala ottenute con il test 3 (lock-in)	112
mappe di fase della ventola e della pala ottenuta con il test 3 (lock-in)	112
le mappa termoelastiche della pala acquisita con la ventola ferma	113
la mappa termoelastica con la rosetta estensimetrica	114
la mappa termoelastica tarata in MPa	115
il modello agli elementi finiti della pala	115
la mappa dello stress ottenuta dal modello FEM	116
il particolare della mappa della tensione intorno al codolo	116
schema del misuratore a turbina	133
relazione tra la portata istantanea (Q) e frequenza degli impulsi (f)	134
legame tra il fattore di taratura della turbina K e la frequenza (f)	135
profilo di efflusso di fluidi in regime	136
sezione del contatore a getto unico	137
minimo tratto rettilineo richiesto a monte della turbina espresso in diametri nominali della tubazione	138
Tratto rettilineo richiesto a monte della turbina per tubazioni con	

curva a largo raggio	139
schema di installazione del raddrizzatore di flusso	139
schema del raddrizzatore di filetti fluidi	139
schema del misuratore di portata elettromagnetico	140
elementi fondamentali del misuratore di portata elettromagnetico	141
forma d'onda della corrente d'eccitazione delle bobine	142
i disturbi della frequenza di rete	143
misuratore elettromagnetico con convertitore integrale e remoto	144
rappresentazione del filtro ideale	147
rappresentazione del fenomeno della dispersione	149
esempio di campionamento di un segnale	150
il fenomeno dell'aliasing	150
il de rotator di uso astronomico	152
inversione dell'immagine operata dal sistema di specchi	153
disposizione degli specchi	153
esempi di immagini restituite dal de rotator	154
immagine riflessa della rotazione del solo oggetto	155

## Indice delle tabelle

specifiche tecniche della termocamera DeltaTherm 1560	30
specifiche tecniche dei contatori con $Q_n < 16 \text{ m}^3/\text{h}$	45
specifiche tecniche del contatore con $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$	47
dati tecnici del misuratore di riferimento ( $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$ )	48
punti di taratura e relative incertezze	49
dati tecnici dello shaker LDS V650	60
caratteristiche dell'accelerometro PCB 623C11	61
risultati ottenuti dalla prima taratura idraulica per i contatori in uso a Perugia, Ancona, Milano	67
risultati ottenuti dalla seconda taratura idraulica per il contatore in uso a Perugia, Ancona, e Milano	70
dati relativi al programma delle prove sul misuratore Flowstar	74
risultati della taratura prima del ciclo di vibrazione sul Flowstar	74
livelli di vibrazione aleatoria delle normative	76
dati della taratura dopo il ciclo di vibrazione	76
quadro riassuntivo dei dati misurati dal contatore e da quello di riferimento	77
caratteristiche tecniche del motore elettrico	90
dimensioni geometriche del motore elettrico	90
modalità dei test	108

## **Acronimi**

C.A.D. = computer aided design

C.A.E. = computer aided engineering

C.C.D. = charge coupled device

D.F.T = discrete Fourier transform

F.E.M. = finite elements methods

F.F.T. = fast Fourier transform

F.P.A. = focal plane array

F.R.F = frequency response function

E.S.P.I. = electronic speckle pattern interferometry

Mo.Comp. = motion compensation

R.M.S. = root mean square

R.P.M. = run per minute

S.P.A.T.E. = stress pattern analysis by thermal emission

T.S.A. = thermoelastic Stress Analysis

## **Riassunto**

### **Introduzione al lavoro svolto**

Il presente lavoro di tesi tratta lo sviluppo di metodologie per la qualifica di componenti meccanici mediante l'impiego della termoelasticità. Il lavoro svolto parte dallo studio del metodo di misura termoelastico, attraverso due casi di prova, ossia la sua applicazione all'analisi di stress sui vincoli di contatori dell'acqua e ventole di raffreddamento, nell'ambito di prove di qualifica meccanica (prove di vibrazione), si arriva a sviluppare una nuova metodologia di misura di mappe di stress su organi meccanici in rotazione.

## **1. La termoelasticità e sue applicazioni per l'analisi delle tensioni**

### **1.1 Il principio termoelastico**

Ogni sostanza presente in natura, sia essa solida, liquida o gassosa, subisce una variazione di temperatura se soggetta all'azione di una forza che ne modifichi il volume. L'osservazione di tale fenomeno, noto da tempo per i gas, ha trovato nel corso della storia maggiori difficoltà nei materiali solidi, a causa delle piccole variazioni di temperatura indotte.

La relazione, tra la variazione di volume subita da un corpo solido sottoposto all'azione di forze e la relativa variazione di temperatura indotta è nota come effetto termoelastico.

Il ricercatore, che tuttavia giunse per primo alla completa comprensione di tale fenomeno fisico fu Lord Kelvin, che in un suo trattato pubblicato nel 1878 (*Encyclopaedia Britannica 9th edn.*) caratterizzò termodinamicamente il comportamento dei solidi isotropi soggetti ad un campo generico di tensione, formulando la relazione fondamentale della termoelasticità, nota come legge di Kelvin:

$$\frac{\delta T}{T} = -K_0 \delta \sigma \quad (1)$$

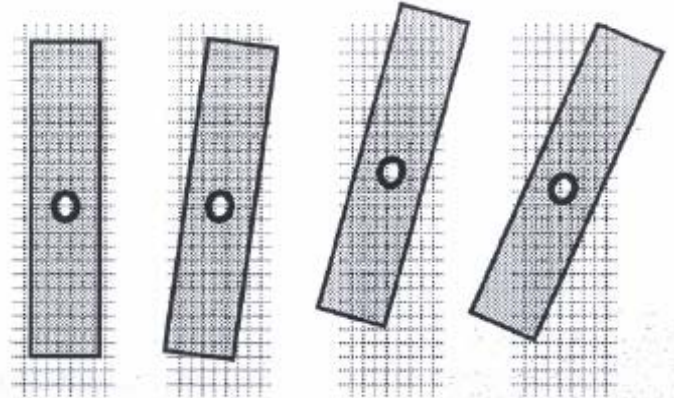
in cui  $T$  è la temperatura assoluta del corpo,  $\delta T$  è la variazione di temperatura dovuta all'effetto termoelastico,  $\delta \sigma$  è la variazione della somma delle tensioni principali ( $\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$ ) e  $K_0$  è la costante termoelastica caratteristica del materiale. Per la gran parte dei materiali, l'insorgere di uno stato tensionale di trazione produce una diminuzione della temperatura all'interno di essi, mentre tensioni di compressione generano un riscaldamento.

### **1.2 Problematiche legate al movimento sulle mappe termoelastiche acquisite con sistemi a CCD**

Quando si effettuano indagini sulla distribuzione di tensione agente su componenti meccanici mediante termoelasticità, devono essere limitati gli spostamenti e le deformazioni indotte, al fine di garantire l'accuratezza della misura.

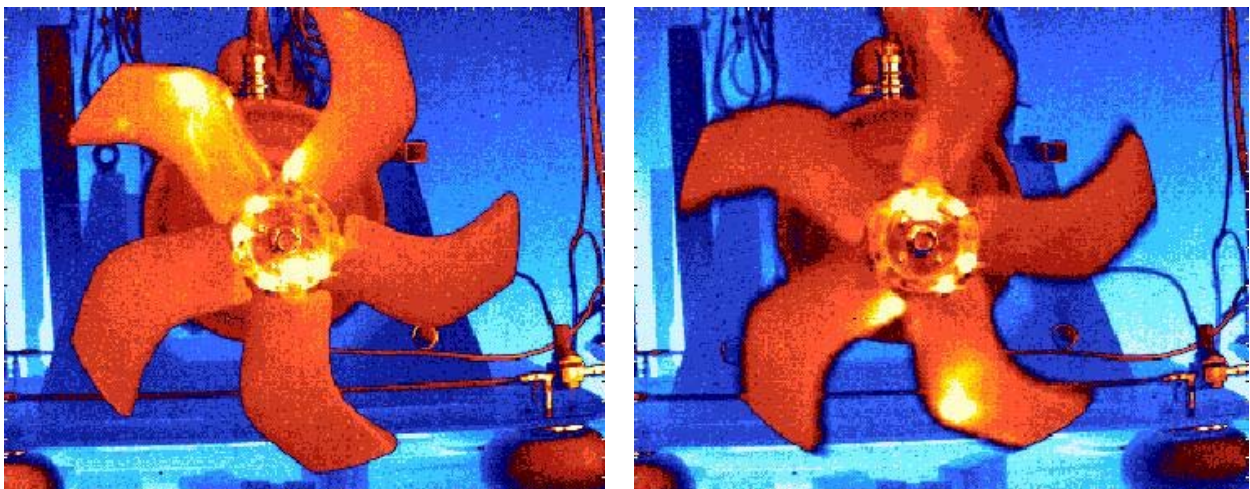
Nel caso in cui l'oggetto in analisi sia in movimento, la zona di indagine, scelta su di esso, subisce uno spostamento nel tempo, e l'elemento sensibile della termocamera, ossia il CCD, rileva le fluttuazioni di energia termica, che verranno in seguito interpretate erroneamente dal software quali concentrazioni locali di tensioni.

Supponiamo di effettuare la stessa misura in presenza di movimento rigido arbitrario ed assenza di carico, ipotizzando che vi sia una differenza tra l'energia radiante emessa dalla superficie del provino e lo sfondo. Durante il moto, il provino assume posizioni diverse in ogni istante successivo, mentre la griglia, che rappresenta il CCD della termocamera, rimane fisso solidale ad essa (fig. 1).



**Fig. 1: spostamento relativo tra termocamera e provino.**

Di conseguenza ogni singolo pixel inquadra, in modo casuale aree diverse del provino e/o lo sfondo; vengono così rilevate apparenti fluttuazioni di energia termica provocate dal movimento. Tali fluttuazioni saranno erroneamente interpretate dal sistema come variazioni di tensione.



**Fig. 2: termografia su oggetto fisso rispetto alla termocamera (sinistra), ed in rotazione (destra).**

Per risolvere questo problema, è stato utilizzato un sistema software per compensare il movimento dell'oggetto mediante inseguimento delle immagini, estrapolate dal filmato termico; solo in una seconda fase viene effettuato il filtraggio del segnale termico, per ottenere solo il contributo dell'effetto termoelastico.

## **2. Le prove di qualifica dei misuratori di portata**

L'oggetto delle prove è la valutazione delle prestazioni metrologiche di alcuni tipi di contatori dopo essere stati sottoposti ad un ciclo di vibrazioni; a questo scopo sono stati messi a punto due tipologie di banchi prova, uno "idraulico" per la taratura del contatore dell'acqua ed usato sia prima che dopo la prova a vibrazione, l'altro "meccanico" per sottoporre il misuratore di portata al ciclo di vibrazione stabilito

dalla "Proposta di Direttiva del Parlamento Europeo", e per le successive analisi termoelastica sui supporti.

I misuratori provati appartengono a due tipologie, la prima è volta alla misura di piccole portate (uso domestico,  $Q_n < 16 \text{ m}^3/\text{h}$ ), mentre la seconda è di norma impiegata in impianti industriali aventi  $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$ . L'ultima parte delle prove ha l'obiettivo di valutare la mappa della tensione agente sul vincolo tra condotta e contatore.

## 2.1 I risultati dei test

Le prove in laboratorio consistono in tre fasi distinte, ciascuna rivolta ad uno specifico scopo:

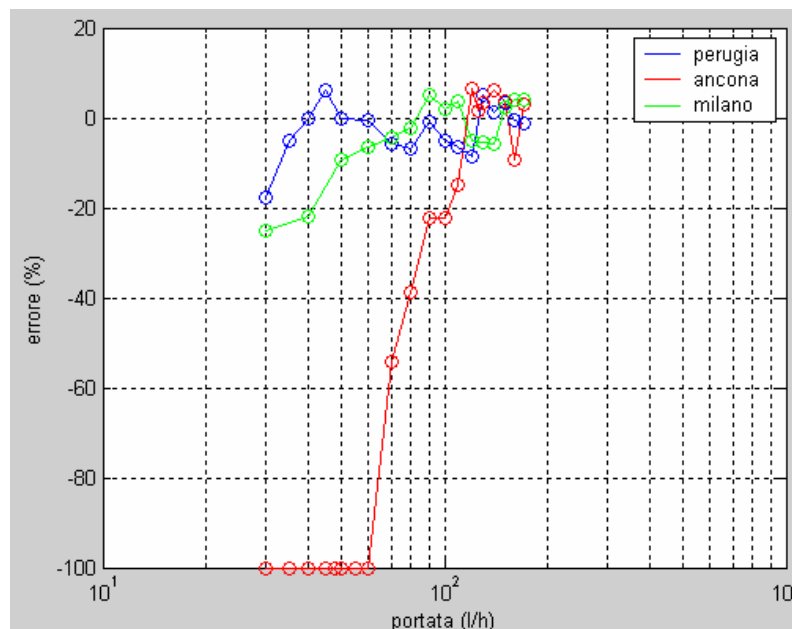
1. Una prima taratura idraulica, eseguita usando l'apposito banco di prova, avente l'obiettivo di rilevare la corrispondenza del contatore da testare alla Normativa soddisfatta in sede di omologazione dello stesso e di rilevare i volumi d'acqua dispersi, cioè quelli transitati ma non conteggiati dal misuratore.

2. Una prova di vibrazione, effettuata con il banco "meccanico", consistente nel sottoporre il contatore ai cicli di prova stabiliti dalla "Proposta di Direttiva del Parlamento Europeo" sugli strumenti di misura relativa all'Ambiente Meccanico.

3. Una seconda taratura idraulica, svolta come la prima, con lo scopo di rilevare eventuali perdite di prestazioni metrologiche imputabili ai cicli di vibrazioni cui il contatore è stato sottoposto nella prova precedente. Per i contatori con portata nominale inferiore a  $16 \text{ m}^3/\text{h}$ , è stata valutata l'accuratezza della misura per valori della portata compresi tra 25 e 170 l/h; per il contatore con portata nominale superiore a  $16 \text{ m}^3/\text{h}$  il range di interesse varia da 4,8 a  $60 \text{ m}^3/\text{h}$ .

- **$Q_n < 16 \text{ m}^3/\text{h}$**

Dai valori dell'errore rilevati (fig. 4) dopo la prima taratura si può dedurre che:

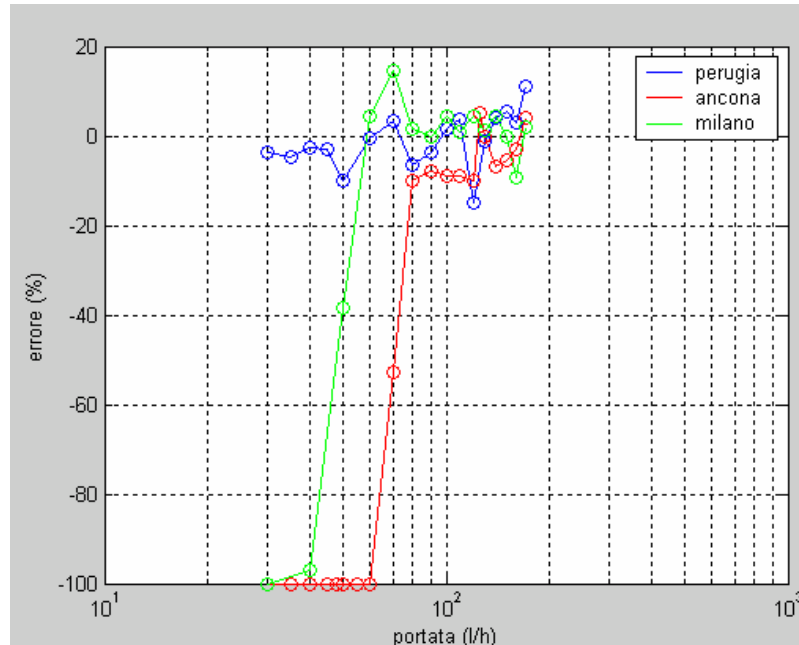


**Fig. 4: confronto tra le curve errore-portata dei contatori Perugia - Ancona - Milano dopo la prima taratura idraulica.**

- Gli errori di misurazione fatti dallo strumento in uso ad Ancona sono sempre maggiori del  $\pm 5\%$  per le portate comprese tra i 30 e i 110 l/h, mentre la Normativa prevede, per gli strumenti di classe

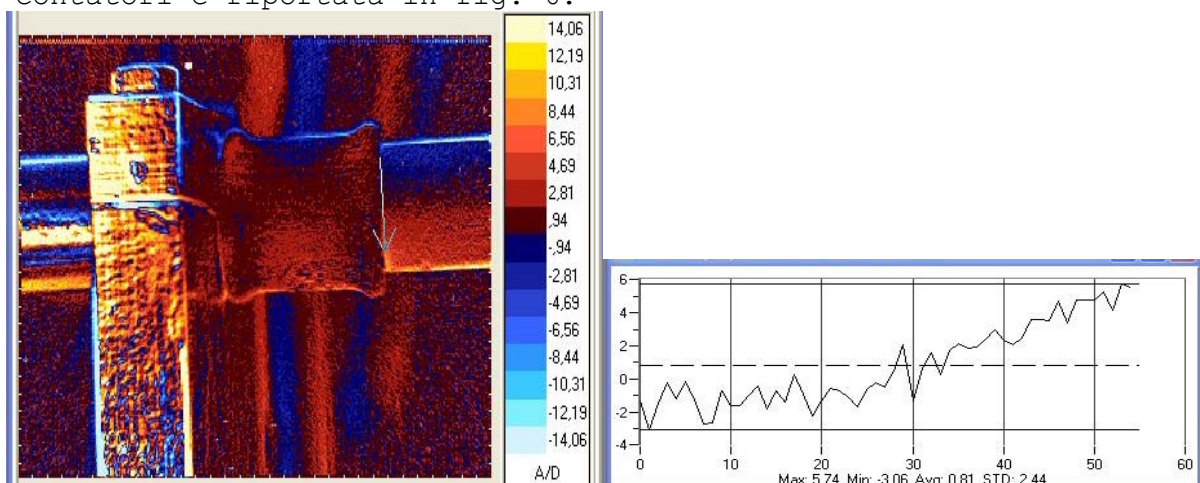
B, errori inferiori al  $\pm 5\%$ ; nella zona seconda le prestazioni migliorano, ma non rientrano nei limiti imposti dalla normativa. Risultano migliori invece le misurazioni effettuate dal contatore in uso a Perugia, infatti in entrambe le zone l'errore è inferiore a quello massimo tollerato.

▪ Per quanto riguarda lo strumento in uso a Milano gli errori di misura commessi, dopo la prima taratura idraulica, sono quasi sempre al di sopra del  $\pm 2\%$ , mentre la Normativa prevede, per misuratori di portata appartenenti alla classe C, errori del  $\pm 2\%$ . La seconda taratura, dopo il ciclo di vibrazione, mostra un peggioramento delle prestazioni metrologiche di tutti i misuratori analizzati (fig. 5).



**Fig. 5: confronto tra le curve errore-portata dei contatori Perugia - Ancona - Milano post-vibrazione.**

La mappa di tensione agente sul vincolo tra condotta e questa tipologia di contatori è riportata in fig. 6.



**Fig. 6: la mappa delle tensioni agenti sul vincolo (a destra); andamento dello stress lungo la linea presente sulla mappa (a sinistra).**

- $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$

Le prestazioni del misuratore prima del test di vibrazione risultano conformi alla Normativa rispettando l'errore massimo tollerato (fig. 7).

Nella prova post vibrazioni il misuratore commette errori maggiori del 7% su tutto il campo di misura, che non sono ammessi dalle normative, in particolare la MID prevede che l'errore sia minore del 5% nell'intervallo di portate fra  $Q_1$  e  $Q_2$  ed inferiore al 2% fra  $Q_2$  e  $Q_3$ .

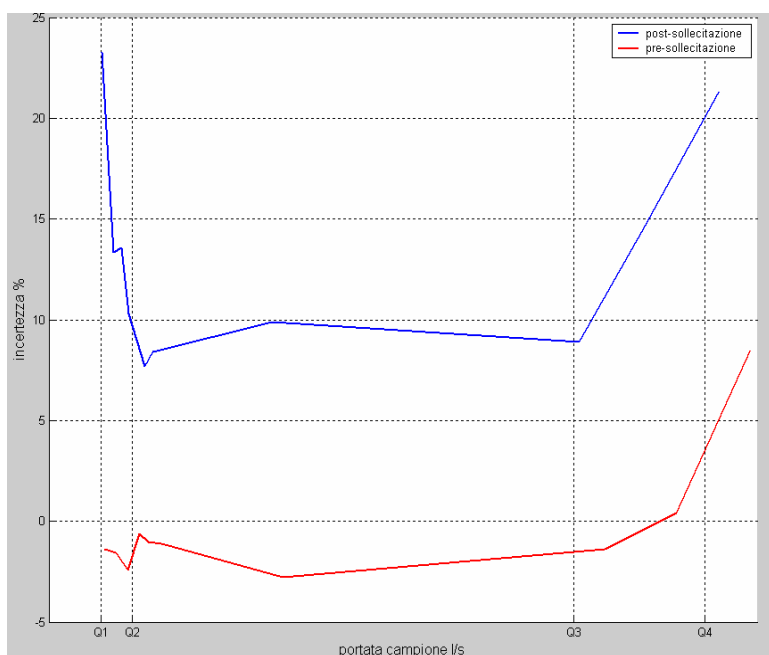


Fig. 7: confronto tra le curve di taratura.

#### 4. Analisi termoelastica delle tensioni su componenti rotanti

Questa metodologia si suddivide in due parti, la prima riguarda l'acquisizione del filmato termico mediante la termocamera Delta Therm 1560, la seconda è l'elaborazione delle mappe termiche acquisite in modo da ottenere solo il contributo dell'effetto termoelastico.

Il filmato termico è stato acquisito in condizioni prossime a quelle di funzionamento. E' stato sviluppato un banco prova (fig. 8), da vincolare sullo shaker elettrodinamico, in modo da sollecitare opportunamente il componente e porre, contemporaneamente, in rotazione l'oggetto in esame.



Fig. 8: il banco prova montato sulla testa vibrante dello shaker.

##### 4.1 L'elaborazione dei filmati termici

Una volta effettuata la registrazione dei filmati termici della ventola in esercizio, si è potuti passare alla fase di elaborazione. Il primo

passo consiste nel compensare la rotazione della ventola nei frame dell'acquisizione; ciò è stato fatto, utilizzando il software Termoimage. Le fasi principali per elaborare il file (txt) di riferimento del filmato termico, e successivamente gli altri sono:

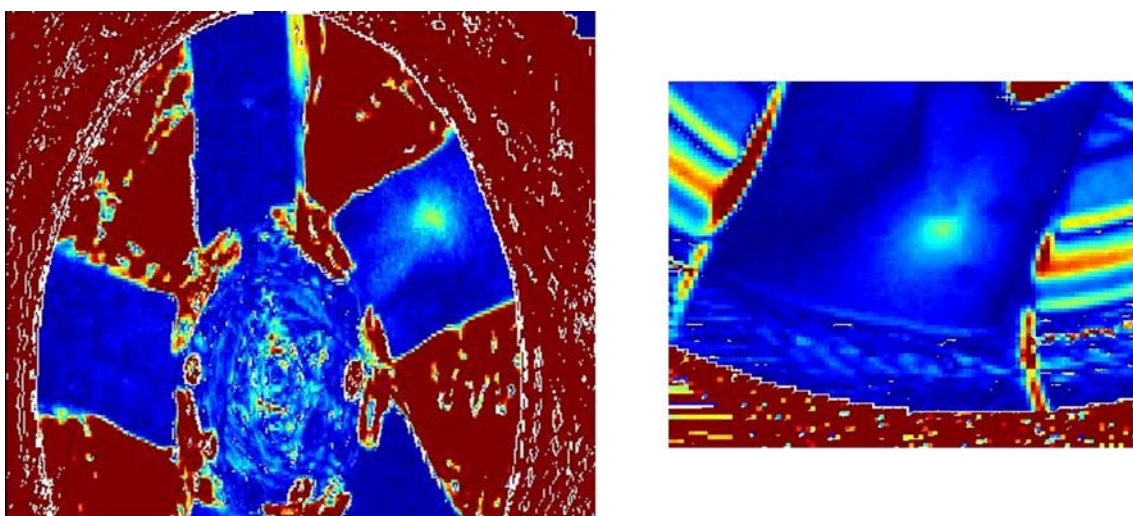
- selezione della cartella dei files
- impostazione dei filtri per la rappresentazione delle immagini termiche
- selezione della tipologia di definizione del contorno delle aree individuate
- individuazione delle coordinate delle aree di riferimento
- selezione delle aree di riferimento

A questo punto si possono calcolare, in automatico, gli spostamenti e/o le rotazioni dei frame rispetto a quello scelto di riferimento; quando il calcolatore termina le operazioni, si possono scrivere i file (txt) dei frame compensati.

La seconda parte consiste nell'elaborazione dei file in uscita dal Termoimage: sono stati sviluppati, in ambiente, MatLab due algoritmi per il filtraggio del segnale termico, in modo da ottenere solo il contributo di quello termoelastico.

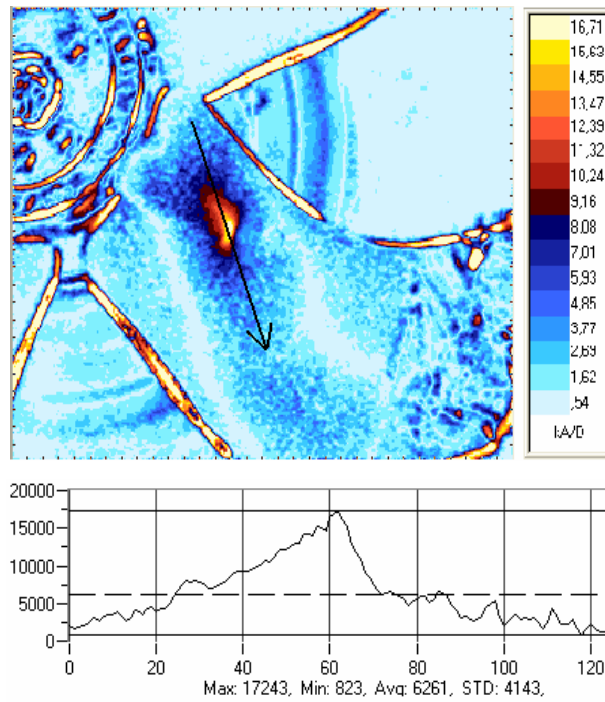
#### **4.2 I risultati: le mappe termoelastiche**

Utilizzando entrambi gli algoritmi, le mappe evidenziano un'elevata concentrazione di tensione sulla zona in prossimità del codolo (fig. 9).



**Fig. 9: mappe della ventola (a sinistra) e particolare della pala (a destra).**

Questa mappa è stata, inoltre, confrontata con quella della ventola non in movimento, e la distribuzione di stress agente sulla pala (fig. 9) è la medesima della precedente (fig. 10).



**Fig. 10: la mappa termoelastica della pala (in alto), e l'andamento (in basso) della tensione lungo la freccia tracciata sulla mappa.**

I risultati sperimentali, sono stati confrontati, inoltre, con la distribuzione di tensione ottenuta dal modello FEM della pala. La metodologia sviluppata ha raggiunto in pieno il suo obiettivo, infatti si può estendere la TSA, ad oggetti rotanti o in movimento, prossimi alle condizioni di funzionamento; ciò apre la strada a nuovi campi di applicazione di tale metodologia nell'ambito dell'ingegneria sperimentale.

## Summary

### Introduction

The main subject of the thesis is the development of several methodologies aimed to qualify mechanical components through thermoelasticity.

Such essay begins with the analysis of the thermoelastic method of measure. We come to develop a new measure methodology of stress maps on mechanical rotation components through two test cases; they show their application to the stress analysis on the joint of water meter and fan cooling.

## 1. Thermoelastic stress analysis

### 1.1 Thermoelastic principle

Every substance in nature, solid, liquid or gaseous changes its temperature when it is subject to a force that modifies its volume. This phenomenon is well known in gases and not in solids because of their small temperature variation.

The relationship between the volume variation of a solid material, subject to a force, and the temperature change is known as thermoelastic effect.

This physical law is comprehended for the first time by Lord Kelvin; employing thermodynamics, he described (*Encyclopaedia Britannica 9th edn. 1878*) the behaviour of solid isotropic material exposed to tension fields, and he formulated the thermoelastic relationship:

$$\frac{\delta T}{T} = -K_0 \delta \sigma \quad (1)$$

$T$  is the temperature of the material,  $\delta T$  is the temperature variation due to the thermoelastic effect,  $\delta \sigma$  is the change of principal stresses sum ( $\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$ ), and  $K_0$  is the thermoelastic constant of the material. As for solid materials concern, the stress state of traction causes them a temperature reduction, while the compression state increases their temperature.

### 1.2 The main thermoelastic systems

The thermoelastic stress analysis (T.S.A.) has been performed mainly through differential thermography. The conventional thermography measures the thermic maps on the surface, while the differential thermography allows to know the temperature variation of a specific frequency.

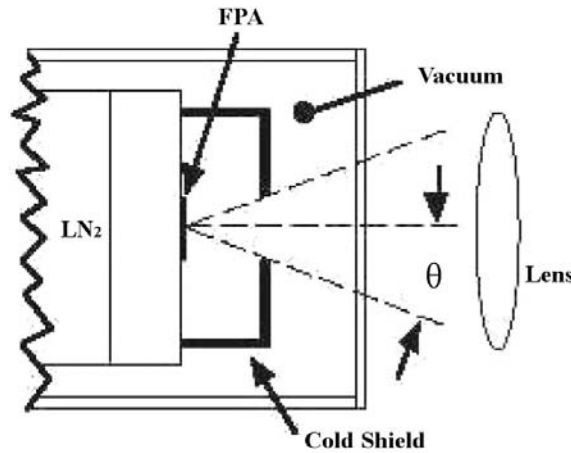
In order to obtain the stress field, it has been measured the temperature variation, induced by the thermoelastic effect, on a dynamical loaded component.

An important function is carried out by thermocamera, that detects the small temperature variations on the surface of the component through measuring the infrared radiation.

Two infrared thermoelastic systems were developed: the SPATE (produced by Ometron Ltd, UK 1982) and the DeltaTherm (produced by StressPhotonics Inc. U.S.A. 1984). Moreover, in the nineties it has been marketed a new differential thermography with high resolution, based on infrared sensors array.

On the contrary of the SPATE, all FPA systems (focal plane array) don't require the system of mirrors to detect the full field stresses. The data capture happens at same time for every sensor of the array; in so doing, the sensors detect the thermoelastic signal of the entire analysed surface, reducing the acquisition time of two orders of magnitude compared to the SPATE.

Currently, one of the main system on the market is the DeltaTherm.

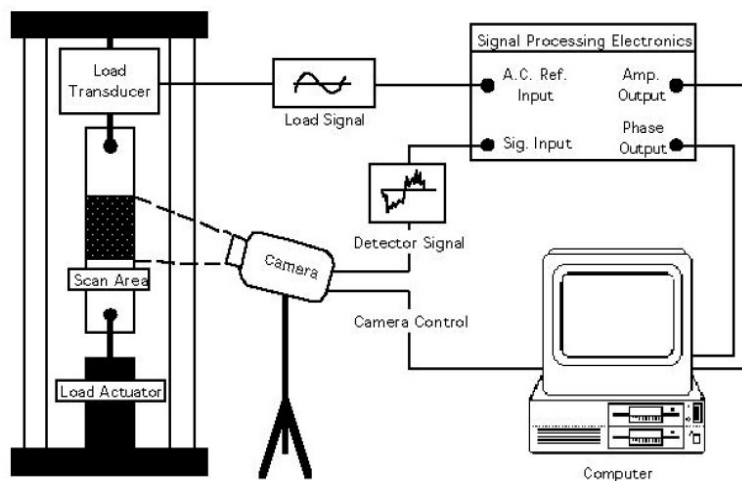


**Fig. 1: the FPA sensor of DeltaTherm, cooled by LN<sub>2</sub>.**

The DeltaTherm employs an InSb sensors array that detects infrared radiation on the band of wavelength 2-5 μm. The signal processing unit computes a high number of frame/s; each frame is formed by the signals of all pixel of the array. The dimension of the area, focused in every single pixel, depends on the number of elements of array and on the thermocamera distance from the component surface. When the distance varies, the analysed area changes, using the same number of pixels.

A set of different lenses is available and it allows to focus the signal on every pixel for a wide field of distance.

The Delta Therm signal processing is different from the single sensor system because in DeltaTherm the signal is detected by the array, and it is immediately digitalized. In the last phase, the signal is correlated with the reference signal.



**Fig. 2: the T.S.A. measurement chain.**

In the array systems we can increase the data capture time in order to improve the signal, and to noise the ratio.

## 2. Problems due to the movement on thermoelastic maps using CCD system

When thermoelastic stress analysis on mechanical components are performed, the displacement and deformation have to be reduced to assure the measure accuracy.

In case of the object to analyze is in motion, the investigated area changes, so that the CCD (charge coupled device, i.e. sensors array) detects the variations of thermal energy, that will be rendered later by the software as concentration of stresses.

We suppose to carry out the same measure of arbitrary rigid movement and load absence, assuming there is a difference between the emitted radiant energy from the surface of the specimen, and the background.

During the motion, the specimen assumes various positions in every following moment while the grid, that is the CCD of the thermocamera, is steady. (fig. 3).

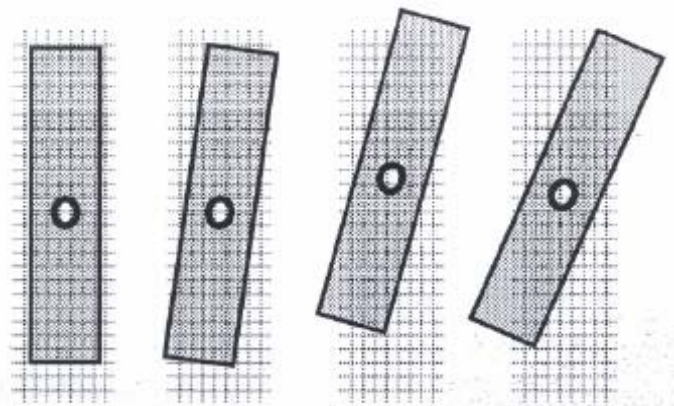


Fig. 3: relative movement between grid (CCD) and specimen.

Consequently, a single pixel detects various areas of the specimen and/or the background in accidental way; they will be detected as variation of thermal energy. These variations are wrongly interpreted by the software as stresses concentration.

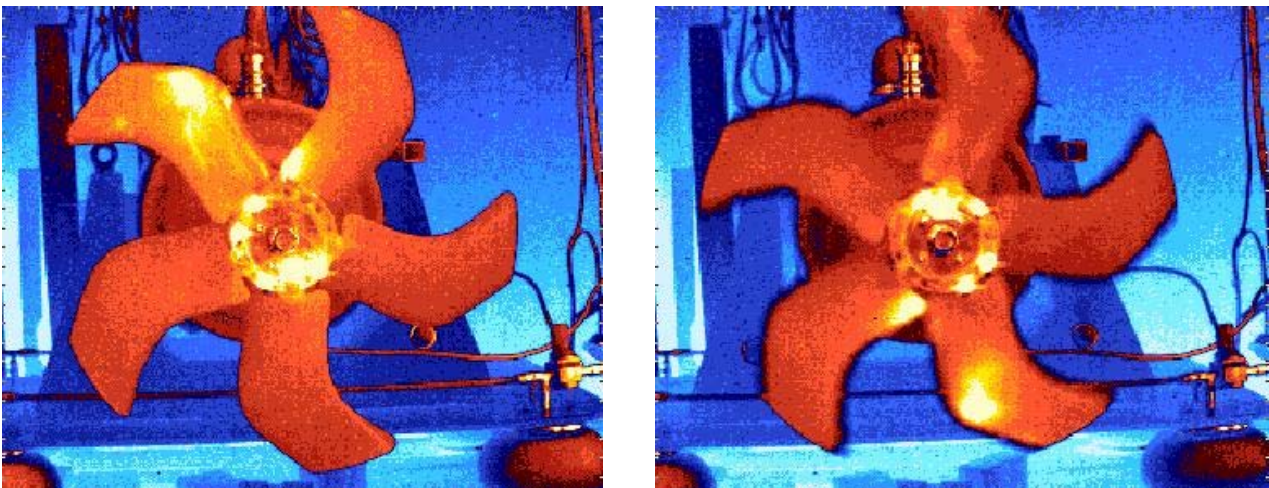


Fig. 4: thermography of a fixed object (on the right), and in spin (on the left).

In order to solve this problem, it has been used a software to compensate the movement of the object on thermal images; later, in a second phase, it is carried out the filtering of the thermal signal to achieve simply the contribution of thermoelastic effect.

#### 4. The test benches for the qualification of water meters

The object of the tests is the performances appraisal of some types of water meter after subordinating them to a cycle of vibrations; for this purpose, two typologies of test benches have been designed.

The first one is called "hydraulic" and it is intended to calibrate the meters; the second one, called "mechanic", is planned to subject the meters to the cycle of vibration established from the "Proposal of Directive of the European Parliament", and to the following thermoelastic analyses of the supports.

The hydraulic test bench is used before and after the meters are subject to the cycle of vibration, in order to calibrate them and to assess their loss of performances.

The tested meters belong to two typologies, the first one concerns low level flow (domestic use,  $Q_n < 16 \text{ m}^3/\text{h}$ ), while the second one is employed in industrial systems having  $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$ .

##### 4.1 The hydraulic test benches

- $Q_n < 16 \text{ m}^3/\text{h}$

This test bench has been assembled using components found on the market and normally used in the industrial and domestic applications.

In particular, pipages, curves, connections in iron galvanized from 1/2 diameter inch are used, as well as two reductions from 1/2" to 1/4" inch of the same material and two pieces of rubber tube. In figure 5, it can be seen the layout of the hydraulic plant.

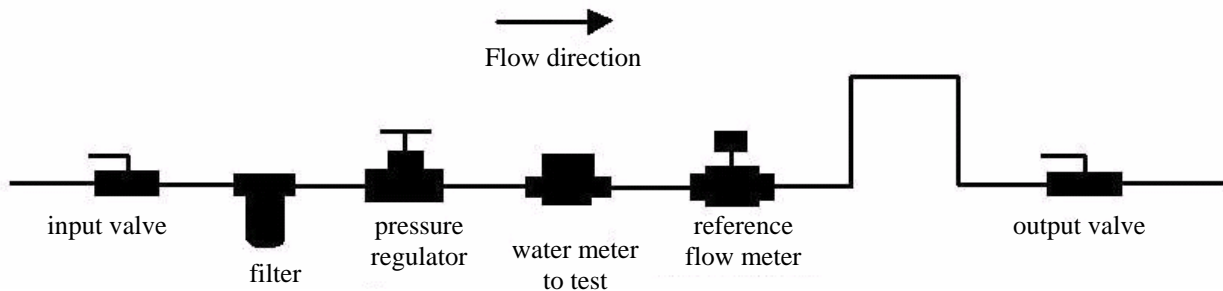


Fig. 5: layout of the hydraulic plant.

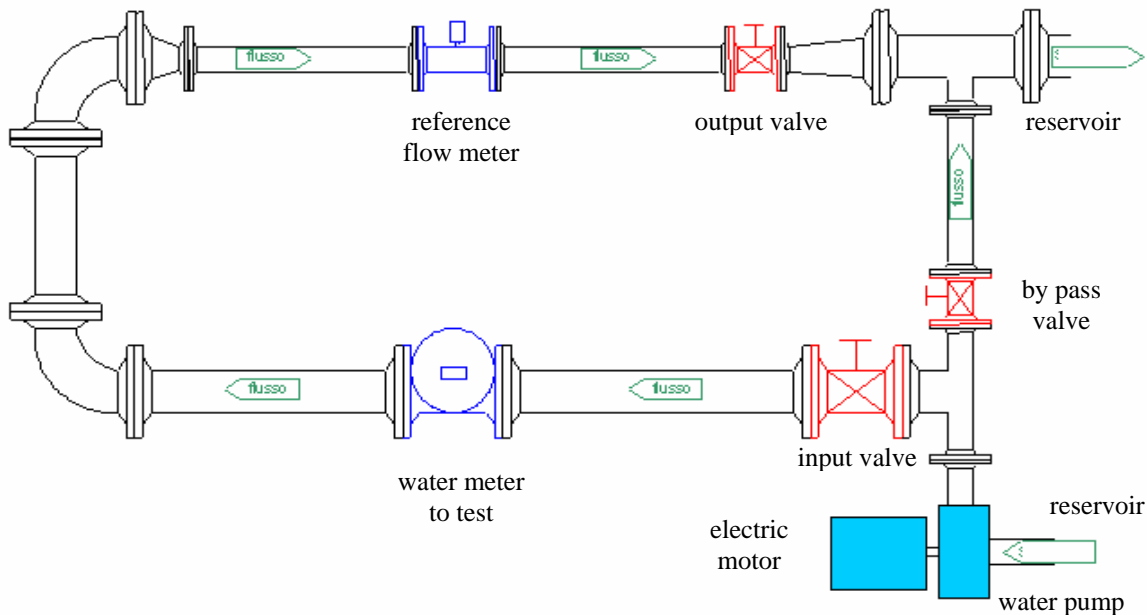
The first component is a filter necessary to avoid choking up the meter; it follows a pressure regulator that allows the precise regulation of the flow.

Therefore, the meters to be regulated and the electromagnetic meter, used as a reference, have been placed; such order has been chosen since the reference instrument has high losses, this occurs because of the small diameter of the hole for the water passing.

In the meters installation, it was ensured the length of the pipage, at the source and afterwards the meters, is enough to avoid relevant disturb of the flow. Afterwards, it was positioned a special pipe to ensure a back pressure. The last piece is a tap employed to avoid the plant emptying, that it could provoke the malfunctioning of the electromagnetic meters.

- $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$

With the purpose of carrying out the tests, it is needed an hydraulic system (fig. 6) with a range of capacities that goes from 4,8 to 60  $\text{m}^3/\text{h}$ .



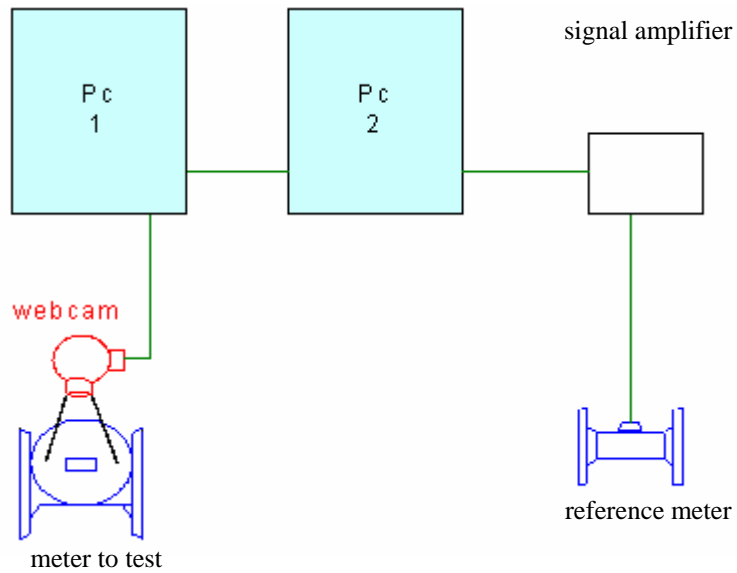
**Fig. 6:** the layout of the hydraulic plant with  $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$ .

The capacity of the system is regulated through valves of entrance, by-pass, and escape; moreover, it is necessary to act on the by-pass valve in order to avoid excessive load on the pump, that divides it from the entrance valve.

The plant is fed by a centrifuge pump dragged by an electric motor of 15 Kw that allows to catch up capacities of 60  $\text{m}^3/\text{h}$ . It is required to carry out two operations at the same time for calibrating the meters: reading the data of the meter to test and storing the data that come from the reference meter.

These operations are achievable through the measurement chain (fig. 6) formed by two computers, one webcam and two software. The first software is assigned to the reference flow meter and the second one, a Labview program, is assigned to store the meter data to test.

In PC 2 the software installed is assigned to the reference flow meter, and it allows to see and store the value of the instantaneous flow, while PC 1 employs a software aimed to store the value of total flow from the meter to test.



**Fig. 7: the system of data capture.**

When the data capture starts, a signal (trigger) is sent to PC, that starts to store the data from the reference meter, during all the duration of the test. At the beginning and at the end, the PC1 gets the image of the meter display to test, using a webcam (fig. 8).



**Fig. 8: the webcam is located over the display of the meter.**

## 4.2 The mechanical test benches

- $Qn < 16 \text{ m}^3/h$

The main pieces of this test bench (fig. 9) are the electrodynamic shaker and the support of the water meter.



Fig. 9: the test bench.

This support has been realized in steel FE360 to submit the meter to the expected acceleration; therefore, the meter is firmly joint to the shaker.

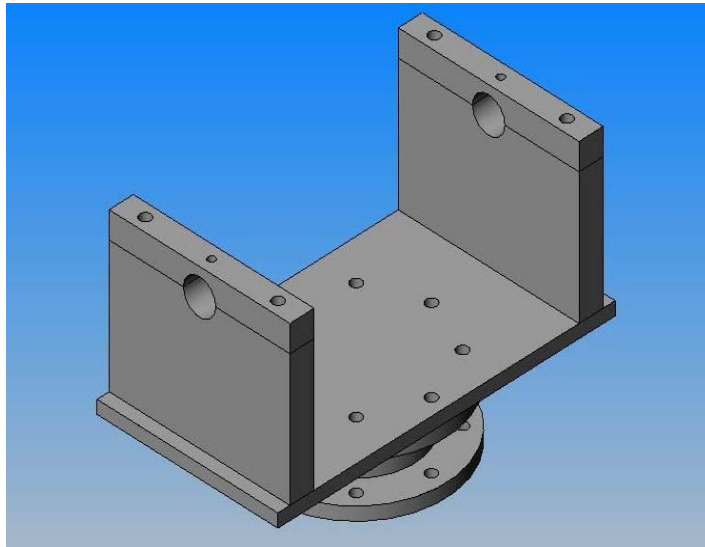


Fig. 10: cad model of the support.

- $Qn > 16 \text{ m}^3/h$

The eccentricity of the barycentre of this meter and its considerable mass didn't allow to put directly it on the head of the electrodynamic shaker; that was done in order to avoid the damaging of the mobile coil of the shaker caused from excessive load. The meter is joined to a structure through elastic strings, and the direction of the vibration is horizontal (fig. 11).

In so doing, the meter weight discharges its load completely on the aluminium structure using the elastic strings, while the shaker is subject only to the forces of inertia due to the mass of the meter; a bar transmits the vibrations from the head of the shaker to the meter.

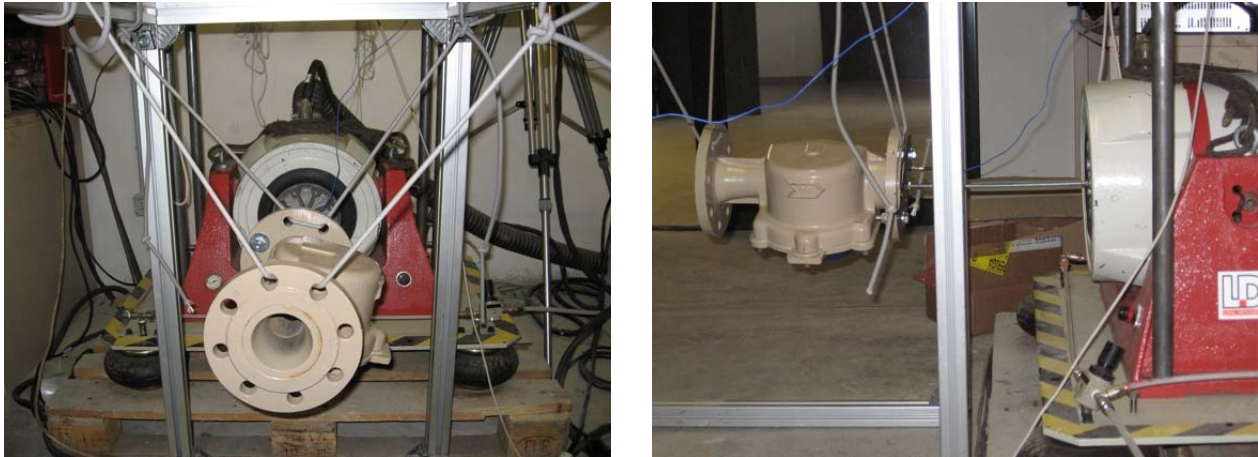


Fig. 11: the system of support for water meter with  $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$ .

### 5. Execution of the tests on the water meters

The laboratory tests were carried out using the benches previously described and consist in three phases:

1. The first calibration aims to identify the performance before the cycle of vibrations, through the hydraulic test bench.
2. A vibration test, carried out with the mechanical bench, consists of subjecting the meter to the test cycles established by the "Proposal of Directive of the European Parliament".
3. The second hydraulic calibration, carried out like the previous one, aims to find possible losses of performances due to the cycles of vibrations. For the meters with  $Q_n$  inferior to  $16 \text{ m}^3/\text{h}$ , it has been estimated the accuracy of the measure for values of the flow included between 25 and  $170 \text{ l/h}$ ; as for the meter with  $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$  concerns, the range of interest goes from 4,8 to  $60 \text{ m}^3/\text{h}$ .

- $Q_n < 16 \text{ m}^3/\text{h}$

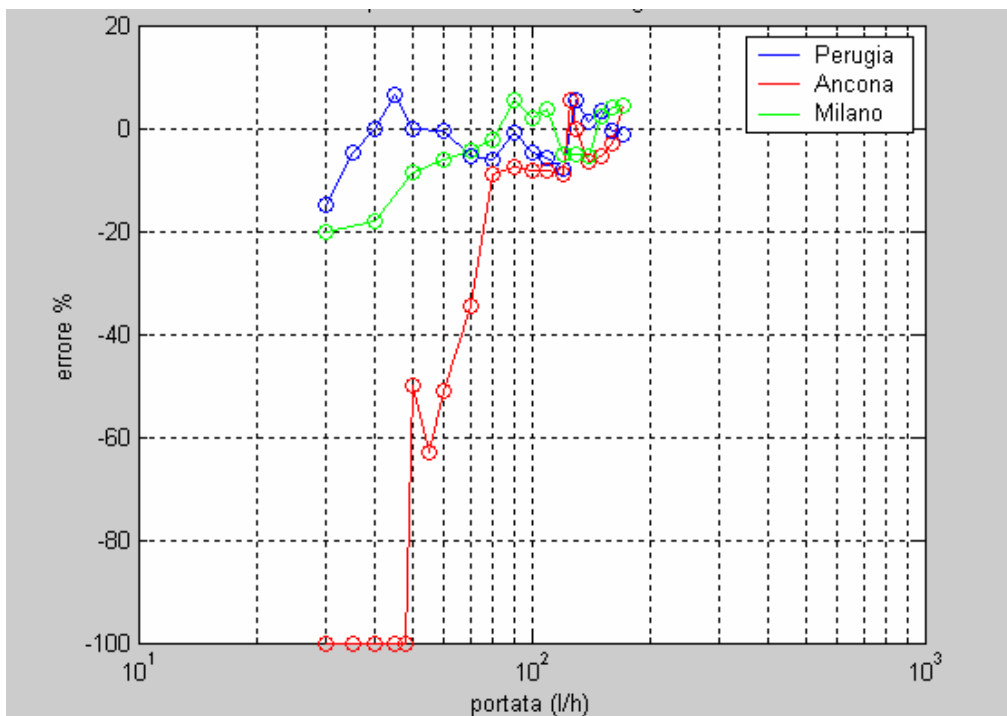


Fig. 12: comparison between the course error-flow of the meters used in Perugia - Ancona - Milan after the first hydraulic calibration.

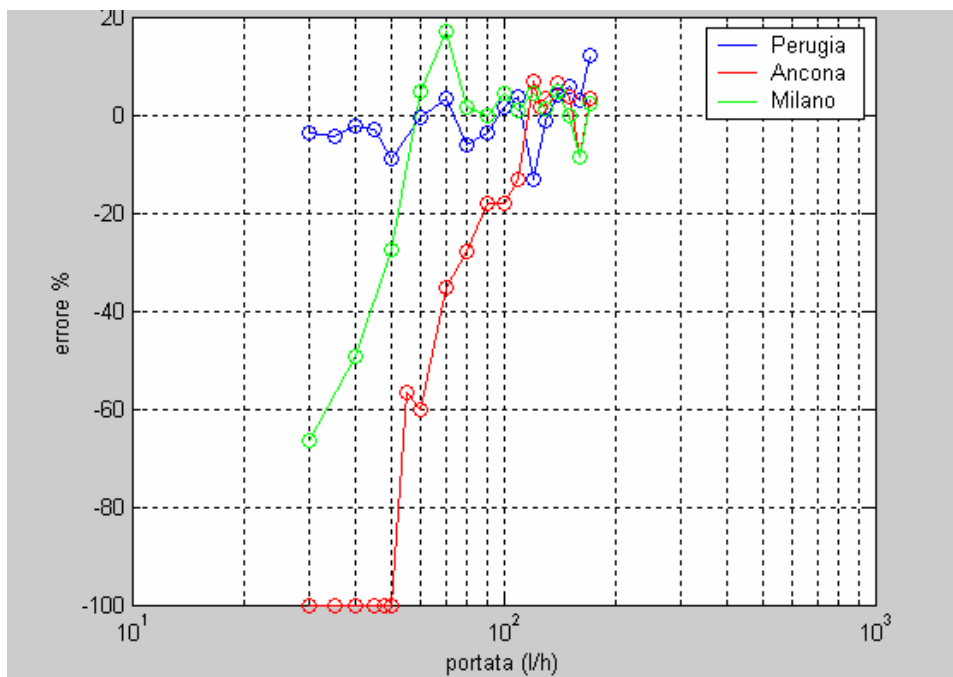
The errors of measurement made by the instrument in use in Ancona are always greater than  $\pm 5\%$  for the value of flows included between 30 and 110 l/h, while the Norm expects, for the instruments of class B, errors inferior than  $\pm 5\%$ .

The measurements of the meter used in Perugia are more accurate because the errors are often less than 5%.

As for the capacities included between 110 to 170 l/h concern, for which the Norm expects the meters of class B have an error included between  $\pm 2\%$ , the meter in use in Perugia still respects the imposed limits in most cases.

To the same capacities, the meter in use in Ancona offers better performances, as regards to the zone of  $\pm 5\%$ , although the measure errors do not re-enter in the limits established by the Norm.

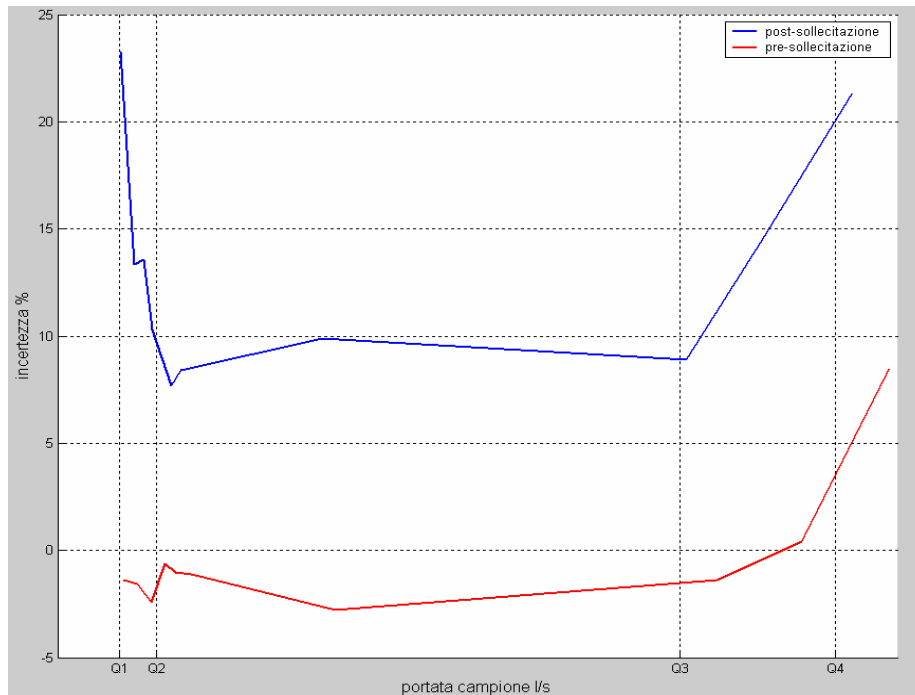
The measure errors of the instrument in use in Milan are nearly always over 2%, while the Norm expects, for meters belonging to class C, errors of 2%.



**Fig. 13: comparison between the course error-flow of the meters used in Perugia - Ancona - Milano after the second hydraulic calibration.**

Following the vibrations cycle, it can be seen a performances worsening of all the meters tested (fig. 13).

- $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$



**Fig. 14: comparison between the course (%) error versus flow (l/s) before (blue) and after (red) the vibration cycle.**

Despite the level of rigor 1, through which it has been carried out the mechanical test, the calibration post vibration curve shows error (fig. 15) greater than 7% on the entire field of measure. Therefore, this value of errors is not admitted by the norms; in particular, the MID expects that the errors are smaller than 5% in the interval of capacities between  $Q_1$  e  $Q_2$  and inferior than 2% between  $Q_2$  and  $Q_3$ .

Only in the ante vibrations test, the meter satisfies such requirements as stated by the producer; otherwise, in the post vibration test the errors are elevated (greater than 10% on a large part of the measure field).

This meter is, therefore, unsuitable to bear mechanical stress-corresponding to the level of rigor 1 established by the norm.

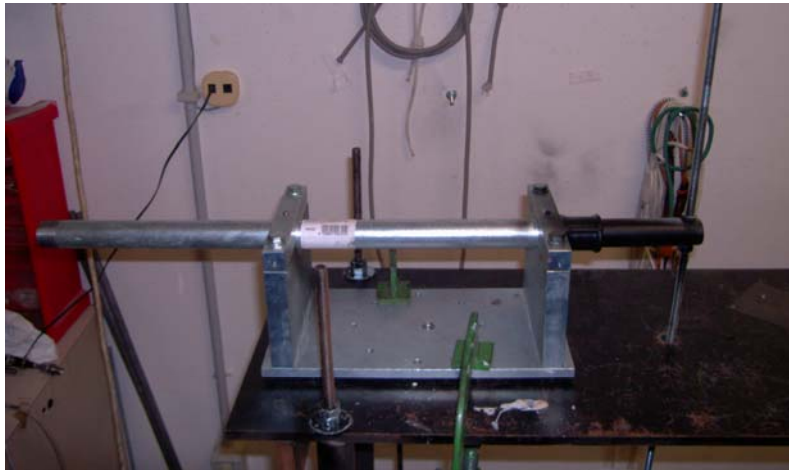
## 6. Stress maps of the joint between meter and pipe

The test bench uses an electrodynamic shaker (fig. 15) in order to apply the dynamic load; the joint has been connected to two portions of the pipe; one of the two has a greater length, so to fix it in two points of the rigid structure in order to increase the entire system rigidity.



**Fig. 15: the shaker LDS 650 and the amplifier 1000 PA.**

On the other extremity, it is applied the dynamic load through a bar that connects the pipe to the head of the shaker (fig. 16).



**Fig. 16: the test bench used.**

The thermoelastic maps (fig. 17) show an excessive motion of the pipe due to the applied load, therefore it was used a tool (Motion Compensation) of the software Deltavision so as to ease the effect of the movement.

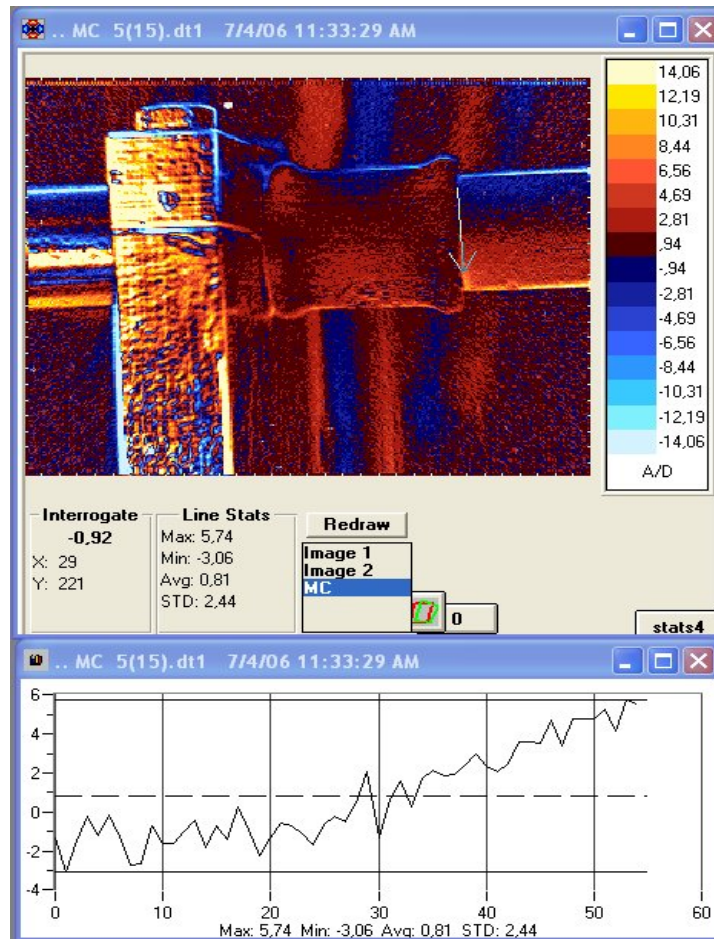


Fig. 17: the thermoelastic map of the joint.

## 7. TSA performed on rotating components

### 7.1 The test development

The test bench is designed to be assembled on the shaker, so at the same time we can stress and spin the object of our study, that is a fan. It was decided to use an electric motor in order to guarantee the fan rotation as in working condition.

The motor is rigidly jointed to the vibrating head of the shaker, using a support (fig. 18); subsequently, the fan is jointed to the motor shaft.

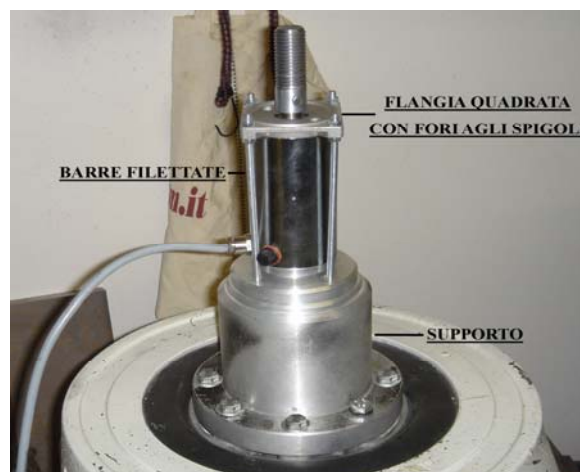
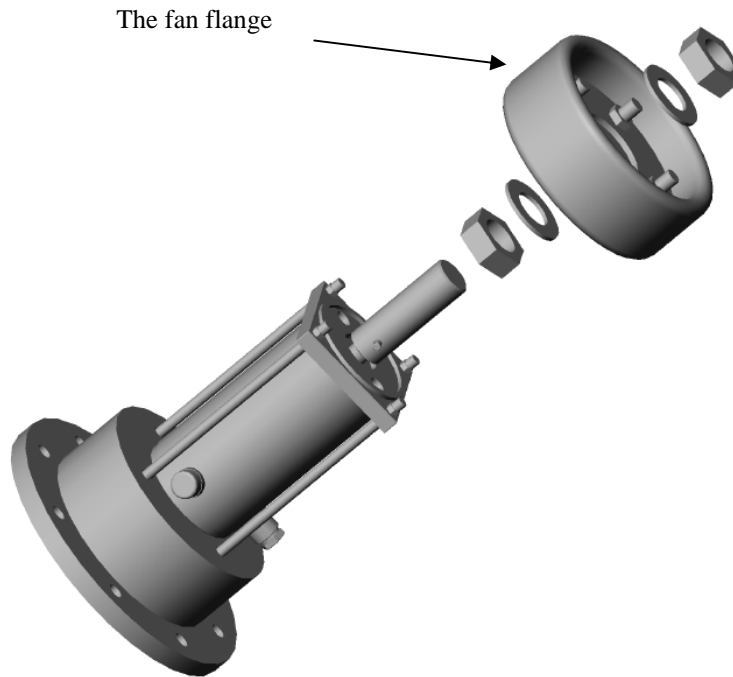


Fig. 18: the test bench assembled on the shaker.

The assembly is performed using the fan flange as in fig. 19.



**Fig. 19: the assembly of the fan to the electric motor.**

## **7.2 Post-processing of thermal segment films: methods and results**

After recording the segment films of the fan in exercise, we went on with the phase of post processing data.

The first step consists in compensating the rotation of the fan, visible in the frames; it was performed using the software Termoimage.

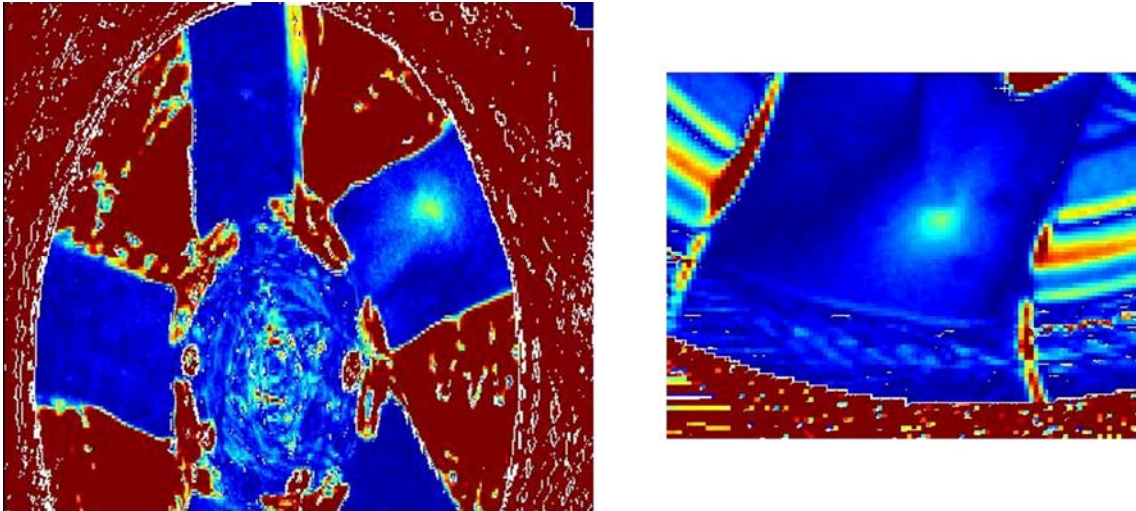
The main steps to process the files (.txt) of the thermal segment film are:

- selection of the folder where the files are
- setting of filter value to represent thermal images
- contours location of the areas on thermal image
- coordinates location of mass areas centre
- selection of reference areas

Now the software calculates the displacement and/or rotation of the frames as regards the one of reference; once the computer finishes the operations, we can store the compensate frames (file .txt) on the hard disk.

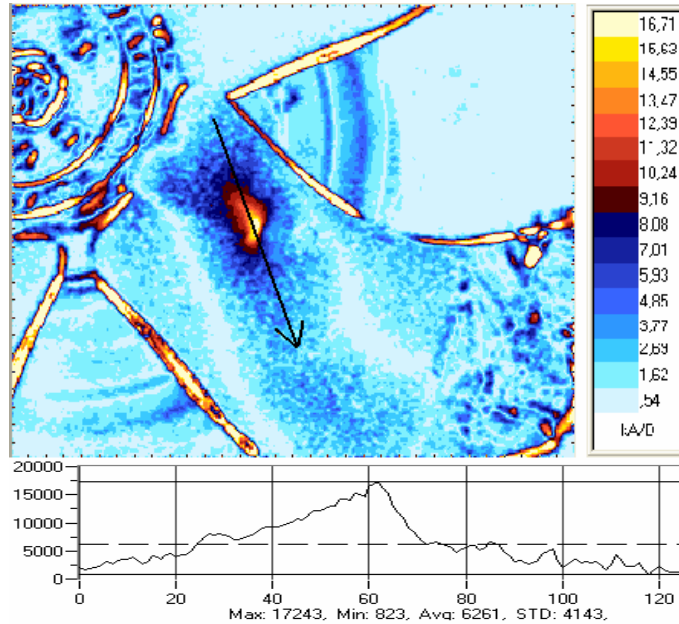
The second part consists in the files processing obtained using termoimage: two algorithms were developed to filter thermal signal of the frames, and to calculate thermoelastic effect.

The maps show an elevated stress concentration on the zone near the blade cone (fig. 20).



**Fig. 21: maps of the fan (on the left), and the blade (on the right).**

Moreover, this map has been compared with that one of the fan not in motion, and the stress distribution (fig. 22) is the same of the previous one (fig. the 21).



**Fig. 22: thermoelastic map of the blade (figure up), and the course (figure down) of the stress along the line traced on the figure.**

This results are compared with the stress distribution obtained from the blade FEM model.

## INTRODUZIONE

Il presente lavoro di tesi tratta lo sviluppo di metodologie per la qualifica di componenti meccanici mediante l'impiego della termoelasticità.

Il lavoro svolto parte dallo studio del metodo di misura termoelastico ed attraverso due casi di prova, ossia la sua applicazione all'analisi di stress sui vincoli di contatori dell'acqua e ventole di raffreddamento, nell'ambito di prove di qualifica meccanica (prove di vibrazione), giunge allo sviluppo di una nuova metodologia di misura di mappe di stress su organi meccanici in rotazione.

Riguardo i misuratori di portata, si è partiti dallo studio della proposta di direttiva del parlamento europeo; è stata sviluppata una metodologia per la valutazione delle loro prestazioni metrologiche prima e dopo essere stati sottoposti a cicli di vibrazione. Viene dimostrato, inoltre, come sia possibile condurre analisi di dettaglio delle distribuzioni di stress sui loro supporti al fine di ottimizzarne le prestazioni.

I contatori possono essere soggetti ad urti e vibrazioni, sia prima di essere installati a causa della movimentazione e del trasporto, sia durante la stessa installazione sulla linea, ma soprattutto durante il funzionamento, essendo soggetti ai colpi d'ariete trasmessi dal liquido ad ogni brusca variazione di portata, o da eventi di natura accidentale ed imprevedibile; tutto ciò può portare in breve tempo all'alterazione della bontà di misura e quindi allo scadere delle prestazioni fornite. A queste tematiche sono interessate le industrie produttrici di misuratori di flusso per migliorarne le caratteristiche, le società distributrici di acque potabili per ottimizzare la gestione della propria rete e degli impianti, nonché le commissioni incaricate di emanare le Direttive che tali strumenti devono soddisfare in sede di approvazione per la stesura delle stesse.

In questo lavoro viene mostrato come sia possibile, impiegando opportuni banchi prova e metodologie appositamente sviluppate, effettuare anche un'analisi di dettaglio degli stress e delle sollecitazioni in genere, trasmessi al misuratore, mediante la tecnica di misura termoelastica.

Nel seguito del lavoro si è quindi passati ad illustrare come, sempre mediante la termoelasticità, sia possibile indagare nel dettaglio gli stress su un secondo tipo di dispositivi, sempre sottoposti a prove di qualifica meccanica da vibrazioni: le pale in plastica di ventilatori assiali. Anche in questo caso la qualifica dei componenti avviene dopo aver affrontato prove per dimostrare il rispetto delle normative vigenti. E', tuttavia, importante per le aziende produttrici conoscere, durante le prove di qualifica meccanica, lo stato di sollecitazione al fine di poterne ottimizzare le prestazioni.

La progettazione meccanica, si avvale, ormai da anni di software, per il corretto dimensionamento del componente in esame.

La fase C.A.D. consente al progettista di dimensionare opportunamente il pezzo in base alla propria esperienza.

Il passo successivo, ha la finalità di individuare qual è la distribuzione della sollecitazione, mediante l'utilizzo di programmi agli elementi finiti; ciò risulta molto utile, perché evidenzia quali sono le zone di maggior stress, dove, con maggiore probabilità, può avvenire il cedimento del componente durante la prova di fatica.

Il progettista, se lo ritiene opportuno, può modificare la geometria del pezzo, senza dover aspettare i risultati del test al banco, con notevole risparmio economico e di tempo.

In questo contesto, l'impiego della tecnica termoelastica, dopo aver messo a punto una metodologia di misura, consente di misurare sperimentalmente i campi di stress agenti sul componente nelle tipiche condizioni di esercizio, in modo da fornire un valido riscontro ai risultati del modello numerico. Per poter sviluppare tale metodologia, sono stati progettati e realizzati idonei banchi prova.

L'aspetto più innovativo del lavoro di tesi è proprio nello sviluppo della tecnica di misura termoelastica, per effettuare sul componente meccanico in esame, misure di distribuzioni di stress, anche quando sono in rotazione.

A tal fine sono stati sviluppati specifici software ed algoritmi di elaborazione dati, che rappresentano un'evoluzione delle tecniche di misura termoelastiche.

Tale tecnica si divide in tre fasi principali, che in seguito verranno descritte in modo approfondito: la prima è l'acquisizione del filmato termico della ventola in esercizio, la seconda consiste nel riallineamento dei frame di tale filmato, mediante l'uso del software Termoimage e la terza è il filtraggio del segnale termico dei frame precedentemente elaborati, al fine di ottenere solo il contributo termoelastico. Per validare questa tecnica, le mappe di tensione vengono poi confrontate con quelle ottenute con la ventola non in rotazione, risultando nella maggior parte dei casi molto simili.

Questa metodologia sviluppata, apre la strada a nuove applicazioni di notevole interesse in tutto l'ambito della meccanica sperimentale.

# CAPITOLO 1

## LE TECNICHE DI ANALISI DELLE SOLLECITAZIONI NUMERICHE E SPERIMENTALI

### Introduzione

La misura delle sollecitazioni su componenti meccanici e strutture, può essere eseguita sia mediante tecniche di tipo numerico che attraverso metodi sperimentali.

Le principali tecniche di tipo numerico prevedono l'impiego di software (C.A.E.), che sono in grado di eseguire modellazioni solide (C.A.D.), e l'analisi delle sollecitazioni agli elementi finiti (FEM), del componente in esame. Nella prima parte, il programma definisce il modello matematico in base alla geometria del componente desiderata.

L'implementazione di modelli FEM permette invece di eseguire analisi di tensioni deformazioni e modali sul componente in esame.

### 1.1 Metodologie numeriche: il metodo agli elementi finiti

L'analisi agli elementi finiti è una tecnica di modellazione numerica che combina insieme le informazioni sul carico applicato e sulla geometria strutturale con le proprietà del materiale, per calcolare le tensioni e le deformazioni. Tale tecnica è attualmente molto usata nel campo della progettazione, dal momento che permette di analizzare strutture estremamente complicate, impossibili da risolvere con metodi analitici.

Il metodo prevede che il componente da analizzare venga discretizzato in una serie di elementi piccoli, i quali interagiscono fra di loro solamente in alcuni punti di interesse, detti "nodi".

Per ogni elemento, note le proprietà dei materiali, si può costruire una matrice delle rigidezze, che mette in relazione le forze nodali con gli spostamenti degli stessi punti; in base alla congruenza degli spostamenti e alla condizione di equilibrio della struttura, è poi possibile assemblare le singole matrici in un'unica matrice di rigidezza.

Note le effettive condizioni di carico della struttura, si può allora ricavare il campo degli spostamenti e quindi risalire, mediante opportune relazioni, alle deformazioni e alle tensioni.

Tale metodologia fornisce soluzioni approssimate del problema, che risulta tanto migliore quanto più piccoli vengono scelti gli elementi che compongono il modello matematico (mesh).

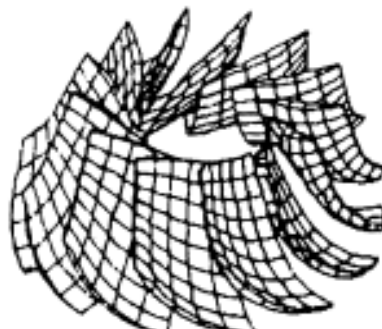
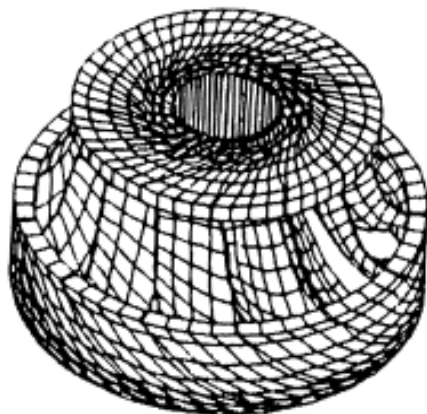


Fig. 1.1: esempio: modello agli elementi finiti delle pale di una turbina idraulica.

Una mesh troppo fitta, comporta però tempi di calcolo per il calcolatore molto lunghi; di solito, quindi, si va ad incrementare il numero di nodi solamente nei punti della struttura di maggiore interesse, come ad esempio in corrispondenza delle singolarità, dove ci si aspetta di avere un gradiente di tensioni e deformazioni.



**Fig. 1.2: modello F.E.M. di una turbina idraulica con mesh più accurata in corrispondenza punti critici.**

Le difficoltà nella modellazione aumentano in presenza di geometrie complesse, o di particolari condizioni di carico; in tali situazioni, pur aumentando la finezza della mesh, si ottengono comunque risultati che sono affetti da incertezze spesso intollerabili.

I modelli FEM devono perciò essere validati sperimentalmente; la verifica al banco, non può essere considerata un'alternativa all'approccio numerico, ma è parte integrante per garantirne la validità e l'affidabilità dei risultati.

## **1.2 Metodologie sperimentali**

Nel corso degli anni, grazie ai continui sviluppi della ricerca applicata, sono state messe a punto diverse tecniche sperimentali per la misura delle sollecitazioni su componenti meccanici e strutture in genere.

In generale, è possibile operare una distinzione tra le tecniche di misura che presuppongono il contatto fisico con il componente ed i metodi di misura detti "senza contatto". Un ulteriore distinzione può essere fatta in base al tipo di analisi che si riesce a fare, se puntuale oppure se a tutto campo.

In virtù di questa classificazione appartengono alla prima categoria le tecniche estensimetriche mentre appartengono alla seconda categoria la fotoelasticità, l'interferometria, l'olografia laser, la vernice fragile e la termoelasticità.

### **1.2.1 Metodi estensimetrici**

Gli estensimetri (strain-gauge) sono il metodo standard per la stima delle deformazioni locali. Nonostante la loro efficacia, tali strumenti permettono una misura solamente puntuale dello stato di sollecitazione, vale a dire che l'estensimetro è in grado di misurare la deformazione della porzione di superficie alla quale è incollato.

Le caratteristiche principali degli estensimetri sono l'essere insensibili alle vibrazioni, avere una massa trascurabile, poter essere applicati in condizioni di carico dinamico e consentire misure su un

vasto intervallo di temperature (  $-200 \div 800 \text{ }^\circ\text{C}$  ). Le ridotte dimensioni fisiche, inoltre ne facilitano l'applicazione anche su superfici non piane. Per contro, oltre a consentire solamente misure locali di tensione, non sono in grado di fornire mappe di stress relative ad una regione estesa del corpo. A causa delle dimensioni fisiche dell'elemento sensibile, essi hanno di conseguenza una risoluzione spaziale limitata, e ciò rappresenta un problema, specie in presenza di notevoli gradienti di sforzo.

Tra i diversi tipi di estensimetri disponibili (meccanici, ottico-meccanici, elettrici) quelli elettrici sono senza dubbio i più utilizzati e sono costituiti da un basamento plastico che contiene un circuito elettrico. La deformazione della superficie a cui è incollato, produce una deformazione della base. Tale variazione di dimensioni induce una deformazione anche nel circuito elettrico, variandone la resistenza, come si ricava dalla formula:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (1.1)$$

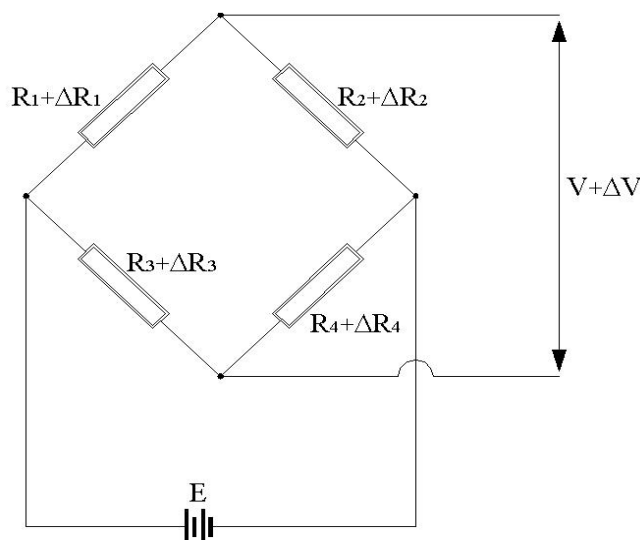
dove:

- $R$  è la resistenza;
- $L$  è la lunghezza del conduttore;
- $\rho$  è la resistività del materiale;
- $A$  è la sezione del conduttore.

È importante che l'estensimetro sia elettricamente isolato dalla superficie sulla quale è incollato, visto che le misure riguardano quasi esclusivamente oggetti conduttori di elettricità. I valori tipici per un estensimetro sono:

- resistenza nominale di  $120 \text{ } \Omega$  o  $350 \text{ } \Omega$ ;
- tolleranza sul valore nominale  $\pm 1 \%$ ;
- dimensioni della base fra  $0,6$  e  $200 \text{ mm}$ .

Montando l'estensimetro su un ramo di un circuito a ponte di Wheatstone, è possibile valutare la variazione della tensione ai capi della resistenza estensimetrica, e da questa risalire allo stato tensionale tramite la deformazione. Il ponte di Wheatstone è regolato dalla equazione (1.2) che fa riferimento alla simbologia del circuito elettrico di (Fig. 1.3).



**Fig. 1.3: circuito a ponte di Wheatstone.**

In assenza di sollecitazioni, il ponte è in equilibrio, e quindi non si ha alcuna d.d.p. tra i morsetti di uscita. Quando la geometria del conduttore varia, il ponte risulta sbilanciato, e perciò il voltmetro misura una certa tensione. A partire da questo valore misurato e imponendo l'equilibrio del ponte si può risalire alla deformazione media nella regione di applicazione dell'estensimetro:

$$\Delta V = \frac{E \cdot ((R_1 + \Delta R_1) \cdot (R_4 + \Delta R_4) - (R_2 + \Delta R_2) \cdot (R_3 + \Delta R_3))}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2) \cdot (R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} \cong$$

$$\cong \frac{E}{4} \cdot \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (1.2)$$

Considerando la relazione fondamentale dell'estensimetria, ottenuta trascurando l'effetto piezoresistivo e assumendo che la resistenza del conduttore sia insensibile alle variazioni di temperatura

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon \cdot K \quad (1.3)$$

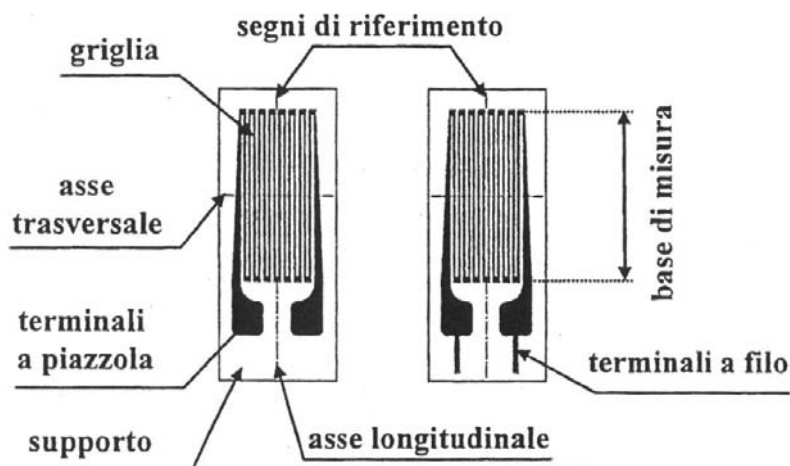
con  $\varepsilon = \Delta L / L$  deformazione in direzione assiale e  $K$  fattore di taratura, è possibile riscrivere la (1.2) come:

$$\Delta V = \frac{E \cdot K}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (1.4)$$

Si osserva che i contributi relativi ai lati opposti del ponte si sommano, mentre quelli sui lati adiacenti si sottraggono; ciò è utile ai fini della compensazione dell'effetto indesiderato della temperatura.

Gli estensimetri sul circuito a ponte possono essere quattro (nel caso di ponte intero), due (mezzo ponte) oppure uno solo (un quarto di ponte). Più estensimetri sono necessari quando la sollecitazione non è monoassiale ed è quindi utile misurare le varie componenti della tensione.

Esistono numerosi tipi di estensimetri che variano per forma, dimensioni, materiale e circuito elettrico; tra i più diffusi vi sono gli estensimetri realizzati per fotoincisione direttamente sulla base. Gli estensimetri fotoincisi sono tra i più utilizzati grazie alla loro compattezza, alla loro facilità di montaggio ed alla grande varietà di forme del circuito elettrico che questa tecnologia di realizzazione consente. Le principali caratteristiche di questi dispositivi sono riportate in (Fig. 1.4).



**Fig. 1.4: estensimetri fotoincisi.**

Oltre agli estensimetri fotoincisi esistono altre tipologie di estensimetri come quelli ad attrito e quelli annegati in materiali plastici.

L'estensimetro ad attrito è un metodo economico, rapido e semplice, per la stima delle distribuzioni della deformazione superficiale su talune strutture. Il dispositivo ha la forma di una sonda portatile, che contiene un estensimetro di tipo intercambiabile di 6 mm, montato su un pezzo di gomma e mantenuto in posizione da una piccola lamina metallica e da una molla. La sonda ed il misuratore sono robusti e facili da trasportare. Per eseguire la misura la sonda ed il misuratore sono premuti contro la struttura che è soggetta ad un carico ciclico.

Il segnale di uscita del sistema può essere letto come una deformazione da cresta a cresta, o RMS (valore efficace), da un'apposita strumentazione. Il segno della stima della deformazione è fornito dalla relazione fra la fase del segnale della deformazione e un segnale di riferimento, meglio se questo segnale è quello del carico.

Si è riscontrato che la sonda è particolarmente utile, quando è usata insieme a sistemi di misura termoelastica per separare i vettori delle sollecitazioni principali; la sonda in questo modo contribuisce ad interpretare i risultati dell'analisi termoelastica.

È stato sviluppato anche un sistema basato su una sonda a rondella. Il sistema è noto come "VU-strain" (deformazione-VU) ed usa una sonda contenente come misuratore dei trasduttori estensimetrici collegati a ponte intero, dotato di estremità puntuali a coltello che forniscono un sistema robusto e particolarmente adatto per l'uso su superfici ruvide. La sonda può essere bloccata magneticamente per l'utilizzo in aree in cui l'accesso è particolarmente difficile. È più costoso da acquistare rispetto al semplice sistema di estensimetro ad attrito, ma significativamente più economico della maggior parte delle tecniche a tutto campo.

La tecnica degli estensimetri annegati in materiali plastici permette la costruzione di modelli e prototipi in materiale plastico, con degli estensimetri posti all'interno con lo scopo di rilevare lo stato di sollecitazione. I modelli possono essere realizzati con diverse modalità, ma in genere viene usata la recente tecnica della prototipazione rapida (Rapid Prototyping Modelling) detta anche RPM.

I modelli così realizzati e strumentati devono essere sottoposti al collaudo ovvero al servizio reale. Il difetto di questa tecnica è che gli oggetti sottoposti a verifica sperimentale sono di materiale plastico che molto raramente è poi utilizzato nelle applicazioni reali.

### 1.2.2 Metodi di analisi di campi di sollecitazione

Questa tipologia di analisi è necessaria per effettuare una mappatura della sollecitazione, quindi per localizzare le concentrazioni della sollecitazione e individuare eventuali zone di cedimento.

Il metodo agli elementi finiti, precedentemente descritto, è una tecnica standard per l'analisi puramente numerica, ma per molte strutture la realizzazione dei modelli non sono soddisfacenti o richiedono troppo tempo per essere sviluppate.

La determinazione sperimentale della distribuzione della sollecitazione nelle strutture reali sotto condizioni realistiche fornisce un contributo vitale per la valutazione del progetto del pezzo.

Esiste un insieme di tecniche sperimentali, le principali fra esse vengono di seguito illustrate.

#### ▪ Fotoelasticità

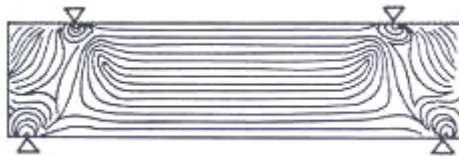
La tecnica di rilevazione fotoelastica richiede la costruzione di un modello in scala di plastica trasparente ed un raggio di luce piana-polarizzata che lo attraversa.

In presenza di un carico statico agente sul modello saranno visibili delle frange d'interferenza, che possono essere osservate attraverso un polariscopio. Per calcolare in un punto della superficie del modello la sollecitazione principale sul piano, le frange devono essere contate iniziando da un valore dato. Tale sollecitazione può essere poi collegata a quella corrispondente nel pezzo reale attraverso una semplice formula. Ruotando il polariscopio, facendo successive misure e seguendo una procedura molto laboriosa, possono essere determinati, lungo la superficie del modello, i singoli vettori delle tensioni principali.

Per mantenere lo schema di sollecitazione interno al modello, può essere utilizzata una tecnica di sollecitazione-raffreddamento, in cui il modello sotto carico deve essere riscaldato finché si rompano i legami secondari. Raffreddando lentamente il modello e poi sezionandolo, si può intraprendere un'analisi della sollecitazione in tre dimensioni.

Gli spettri a frange risultanti necessitano di un'attenta interpretazione, che ha un uso limitato, salvo il caso in cui il modello sia una rappresentazione completamente accurata del pezzo reale. Molte situazioni pratiche, come l'anisotropia o la non omogeneità, sono difficili o impossibili da modellare completamente. Inoltre, è necessaria una precisa conoscenza delle condizioni di carico, e ciò non è sempre facile da valutare.

I problemi connessi con la modellazione e la simulazione del carico possono essere ridotti utilizzando la tecnica di riflessione fotoelastica, in cui un rivestimento plastico birifrangente è collegato alla struttura con un adesivo riflettente. La luce polarizzata deve poi attraversare il rivestimento due volte. La procedura per produrre un rivestimento è piuttosto laboriosa e richiede tempo, in particolare per i pezzi di grandi dimensioni; la tecnica è poi soggetta ad errori a causa delle variazioni di deformazione attraverso lo spessore del rivestimento. L'effetto rinforzante del rivestimento rende tale tecnica inadatta per pezzi sottili o con basso modulo elastico, a meno che vengano applicati appropriati fattori di correzione.



**Fig. 1.5: immagine fotoelastica semplificata di un campione soggetto a flessione.**

La fotoelasticità è principalmente utilizzata per l'analisi della sollecitazione sotto carichi statici, sebbene l'analisi dinamica può essere intrapresa utilizzando tecniche fotografiche ad alta velocità. La fotoelasticità è il metodo più indicato nei casi in cui sia richiesta l'analisi delle sollecitazioni su di un'ampia superficie. I risultati dell'analisi fotoelastica sono proporzionali alla differenza delle sollecitazioni principali.

#### ▪ **Interferometria Moirè**

L'interferometria Moirè, è una tecnica di misura che si basa sull'analisi delle frange di interferenza relative a quei punti dell'oggetto, che presentano lo stesso spostamento in una determinata direzione.

Per poter visualizzare tali frange, occorre incollare sulla superficie della struttura in esame una griglia (model grid), costituita da sottili linee parallele, alternativamente opache e trasparenti, ed illuminare poi la superficie stessa con un interferometro laser contenente una seconda griglia di riferimento (master grid), del tutto simile al precedente. A riposo le due griglie sono identiche e allineate e la luce incidente sul sistema verrà trasmessa sottoforma di bande di spessore pari alla metà del passo  $p$  delle griglie. A causa della diffrazione e della capacità di risoluzione dell'occhio umano tali bande vengono percepite come luce uniforme con intensità pari alla metà di quella del raggio incidente.

Quando il pezzo si deforma sotto l'azione del carico, il passo della model grid varia, poiché varia la larghezza delle bande; l'effetto che si manifesta all'occhio umano è la comparsa delle frange Moirè, alternanza di zone chiare e scure. Ogni frangia corrisponde ad una deformazione della model grid (lungo la direzione primaria, ortogonale alle linee della griglia) pari al passo della master grid. Pertanto, osservando queste frange, si può facilmente risalire, mediante semplici relazioni matematiche, al valore della deformazione.

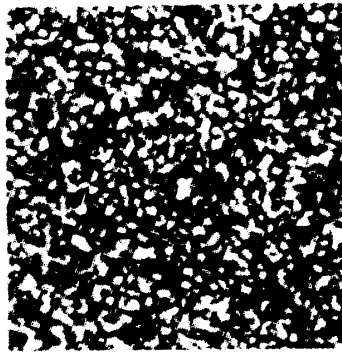
L'utilizzo di griglie ortogonali, permette di ricavare mappe di interferenza in due direzioni. L'interferometria Moirè è una tecnica che si rivela particolarmente adatta per misure su superfici piane; essa viene utilizzata, ad esempio, per il rilievo di fenomeni di creep, per visualizzare la progressione del danneggiamento su materiali compositi, per lo studio della meccanica della frattura e per analizzare comportamenti anisotropi.

Uno dei principali limiti di questa tecnica è l'elevato costo delle griglie; pertanto non è opportuno utilizzare questa tecnica quando le condizioni di misura sono critiche. Inoltre, la tecnica non è adatta per applicazioni dinamiche ad alta frequenza.

#### ▪ **ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry)**

L'ESPI è una tecnica di misura delle deformazioni che si basa sull'effetto speckle. Questo effetto si osserva quando un fascio di luce laser viene ad incidere su una superficie scabra; le onde riflesse in tutte le direzioni dalle asperità presenti sulla superficie, vengono ad interferire tra loro, dando così origine all'immagine speckle, cioè ad

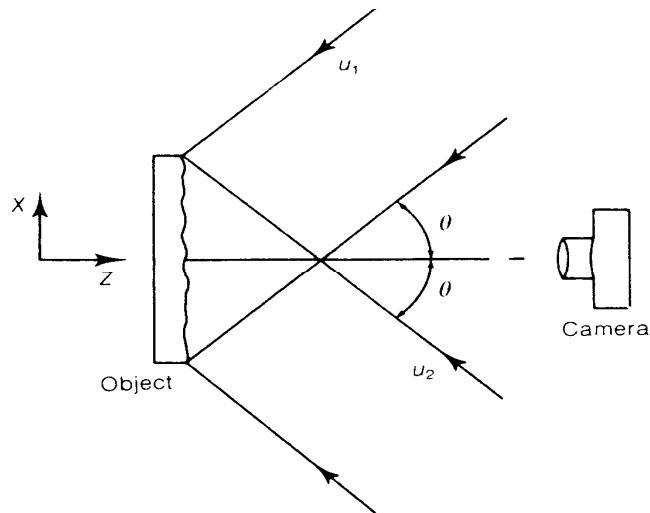
un'immagine formata da grani oscuri e luminosi disposti variamente nello spazio.



**Fig. 1.8: esempio di immagine speckle.**

L'intensità luminosa di un punto che costituisce l'immagine sullo schermo è la somma di un elevato numero di componenti rappresentanti la luce emessa da ogni punto della superficie scabra; l'ampiezza e la fase di ciascun componente sono statisticamente indipendenti tra loro. E' stato dimostrato che il valore più probabile dell'intensità è zero, corrispondente al nero.

Il principio di funzionamento dello strumento prevede che vengano analizzate le immagini speckle ottenute per riflessione da due differenti raggi laser che colpiscono la superficie in esame.



**Fig. 1.9 Speckle interferometro: incidenza simmetrica.**

In assenza di deformazione, ciascun punto dell'immagine mostra una differenza di fase tra i raggi incidenti; quando l'oggetto si deforma sotto carico, si misura un diverso valore della differenza di fase. Per uno spostamento "d" lungo l'asse x, la variazione della differenza di fase  $\Delta\phi$  sarà:

$$\Delta\phi = 2 \cdot k \cdot d \cdot \sin \theta \quad (1.5)$$

Utilizzando una doppia esposizione, prima e dopo la deformazione, si ottiene un'immagine a frange da cui si può risalire allo spostamento nella direzione x che è pari a:

$$d = n \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot \sin \theta} \quad (1.6)$$

L'ESPI utilizza come sorgente coerente il laser, ed un array di CCD, caratterizzato da un'elevata risoluzione e un elevato rapporto segnale/rumore, che registra la sovrapposizione delle due immagini granulari; l'elaborazione dell'immagine viene eseguita al computer.

L'ESPI offre diversi vantaggi: innanzitutto le misure vengono eseguite direttamente sul pezzo e non su modelli, come nel caso della fotoelasticità, e non c'è la necessità di complessi trattamenti superficiali, a patto che ci sia comunque una minima rugosità delle superfici. Nel caso di materiali estremamente lisci come il vetro, lo strumento non riesce ad acquisire informazioni, e bisogna ricorrere a semplici espedienti come la copertura, agevolmente realizzabile con vernici spray.

Lo strumento permette inoltre efficaci indagini anche in prossimità dei bordi del pezzo, e per questo viene spesso impiegato per determinare la forma di oggetti.

Altro aspetto fondamentale da non sottovalutare, è la capacità dello strumento di fornire un'analisi completa di spostamenti nelle tre dimensioni, semplicemente aggiungendo al sistema delle ottiche opportunamente posizionate; è quindi possibile estendere gli studi anche a oggetti tridimensionali complessi, consentendo di trattare con esattezza zone con piccole curvature e brusche discontinuità geometriche nel piano e nello spazio. A differenza dei comuni estensimetri, con cui si determinano le deformazioni medie relative alla superficie occupata dalla griglia, l'ESPI riesce a caratterizzare gradienti di spostamenti e deformazioni, grazie alle elevate risoluzioni spaziali e alla possibilità, qualora queste non fossero sufficienti, di usare l'ESPSI.

L'ESPI inoltre permette di effettuare analisi sia in condizioni dinamiche che statiche, sfruttando dei componenti facilmente reperibili: laser, telecamere con CCD sempre più evoluti, computer, semplici dispositivi ottici dalle agevoli regolazioni (zoom).

Vi sono comunque dei limiti dovuti alla eccessiva sensibilità, ovvero alla capacità di poter elaborare solo piccoli spostamenti: quando i pezzi in esame vengono caricati in maniera apprezzabile, le deformazioni potrebbero provocare movimenti consistenti e dar origine, quindi, ad un numero di frange troppo elevato, che metterebbe in crisi lo strumento.

#### ▪ Vernice fragile

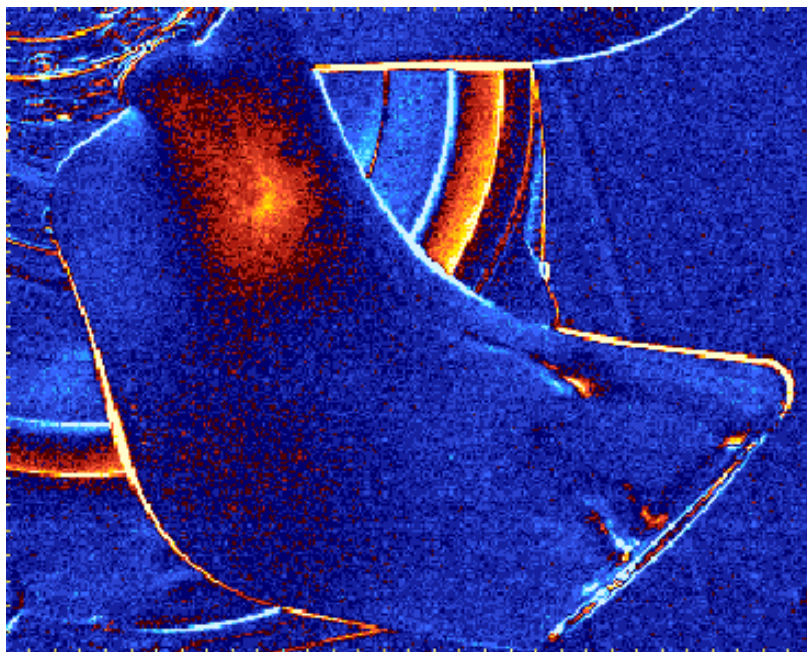
Tale tecnica comprende la verniciatura a spruzzo con un materiale simile alla vernice sulla superficie di un pezzo. La vernice cellulosica fragile può essere virtualmente applicata su ogni struttura o materiale. Ogni crepa che appare nella copertura quando il pezzo è sotto carico, può essere analizzata per la direzione e l'intensità delle deformazioni superficiali di tensione. La copertura cederà ortogonalmente ai contorni della deformazione principale massima, se viene superato il valore limite della vernice cellulosica.

La deformazione limite standard è all'incirca  $500 \mu\epsilon$ , ma è dipendente dalla temperatura e dall'umidità, perciò è consigliabile verniciare a spruzzo le barre di calibrazione nello stesso momento e posto del campione da testare. Durante la realizzazione della vernice vengono aggiunte sostanze plastificanti per produrre coperture con una gamma di deformazioni limite. Il raffreddamento della copertura può ridurre le deformazioni limite a  $300 \mu\epsilon$  o meno. A patto di superare la deformazione limite, la tecnica può fornire una descrizione completa ed adeguata della distribuzione della deformazione e permette di localizzare le concentrazioni della sollecitazione.

Questa è una tecnica da utilizzare "sul posto" (on-site) economica ed utile, se interessano in particolare le sollecitazioni di tensione massime, ma è intrinsecamente imprecisa, ed è essenzialmente usata nell'uso dell'estensimetro, con il fine di ottimizzarne l'utilizzo. La vernice cellulosa fragile è una tecnica monouso, ciò implica che non è adatta per gli impieghi dove sono richieste misurazioni ripetute. Anche le coperture ceramiche sono utilizzabili per materiali che possono essere riscaldati fino a circa 500° C per cuocere la vernice. Queste hanno i vantaggi di stabilità ambientale ed idoneità per le operazioni ad alte temperature.

#### ▪ TSA (Thermoelastic Stress Analysis)

La tecnica di misura termoelastica permette di conoscere lo stato di tensione di una struttura mediante la misura delle variazioni di temperature indotte, per effetto termoelastico, dai carichi esterni. In presenza di carichi statici, l'effetto termoelastico risulta solo temporaneo a causa degli scambi di calore all'interno del materiale e verso l'ambiente esterno che tendono ad annullare i gradienti termici. Affinché l'intero processo possa considerarsi adiabatico, è dunque necessario che le sollecitazioni siano variabili nel tempo con una frequenza sufficientemente elevata.



**Fig. 1.11: mappa termoelastica della pala di un ventilatore.**

Rispetto alle tradizionali tecniche di misura della sollecitazione la tecnica termoelastica ha i seguenti vantaggi:

- facilità a definire la distribuzione delle tensioni su una superficie;
- non richiede un particolare trattamento della superficie se non una verniciatura in nero opaco per uniformare l'emissività (non richiesta per materie plastiche, ceramiche, ecc.);
- non risente della complessità geometrica della superficie poiché l'emissività nell'infrarosso è indipendente dall'angolo di vista fino a 60° dalla normale;
- la risoluzione è superiore;
- la tecnica di misura non è intrusiva;
- si può analizzare una struttura o una parte di essa direttamente nelle reali condizioni di carico;

- non risente apprezzabilmente della temperatura ambiente, dal momento che la misura è di tipo differenziale;
- Il risultato è facilmente interpretabile.

Per contro, i principali limiti sono:

- l'elevato costo iniziale della strumentazione;
- la possibilità di analizzare solo carichi dinamici;
- occorre conoscere il valore della tensione almeno in un punto per poter eseguire la calibrazione dello strumento;
- risente dei vincoli della termografia, in particolare dell'emissività superficiale e della necessità di un accesso ottico;
- richiede che i componenti analizzati restino fissi rispetto alla termocamera.

## CAPITOLO 2

# L'EFFETTO TERMOELASTICO E SUE APPLICAZIONI PER L'ANALISI DELLE TENSIONI

### Introduzione

Ogni sostanza presente in natura, sia essa solida, liquida o gassosa, subisce una variazione di temperatura se soggetta all'azione di una forza che ne modifichi il volume. L'osservazione di tale fenomeno, noto da tempo per i gas, ha trovato nel corso della storia maggiori difficoltà nei materiali solidi, a causa delle piccole variazioni di temperatura indotte.

La relazione, tra la variazione di volume subita da un corpo solido sottoposto all'azione di forze e la relativa variazione di temperatura indotta è nota come effetto termoelastico.

### 2.1 Il principio termoelastico

Le prime osservazioni, che lasciavano intravedere l'esistenza di un nesso tra le deformazioni meccaniche generate in un solido elastico e la variazione di energia termica, furono fatte da Gough (1805) durante i suoi esperimenti su fili in gomma. Successivamente Weber nel 1830 osservò lo stesso fenomeno nei metalli: egli notò, che una variazione di tensione applicata ad un filo metallico, causava una variazione più graduale della frequenza fondamentale del filo, diversa da quella che si sarebbe aspettato. Egli ipotizzò, che questo transitorio fosse dovuto ad un momentaneo cambiamento di temperatura, tanto più grande quanto più alta fosse la variazione di carico applicato.

Il ricercatore, che tuttavia giunse per primo alla completa comprensione di tale fenomeno fisico fu Lord Kelvin, che in un suo trattato pubblicato nel 1878 (*Encyclopaedia Britannica 9th edn.*) caratterizzò termodinamicamente il comportamento dei solidi isotropi soggetti ad un campo generico di tensione, formulando la relazione fondamentale della termoelasticità, nota come legge di Kelvin:

$$\frac{\delta T}{T} = -K_0 \delta \sigma \quad (2.1)$$

in cui  $T$  è la temperatura assoluta del corpo,  $\delta T$  è la variazione di temperatura dovuta all'effetto termoelastico,  $\delta \sigma$  è la variazione della somma delle tensioni principali ( $\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$ ) e  $K_0$  è la costante termoelastica caratteristica del materiale. Le variazioni di temperatura predette dalla teoria di Lord Kelvin furono in seguito confermate sperimentalmente per un gran numero di materiali, con uno scostamento medio dei risultati dello 0,1%.

Per la gran parte dei materiali, l'insorgere di uno stato tensionale di trazione produce una diminuzione della temperatura all'interno di essi, mentre tensioni di compressione generano un riscaldamento; in presenza di uno stato di tensione multiassiale, è la somma algebrica delle componenti principali a determinare la risposta termoelastica del corpo sollecitato.

La relazione che lega le variazioni di temperatura alle deformazioni indotte in un solido isotropo a comportamento elastico, è data dalla seguente equazione:

$$\delta\varepsilon = \frac{(1-2\nu)\cdot\delta\sigma}{E} + 3\cdot\alpha\cdot\delta T \quad (2.2)$$

in cui  $\delta\varepsilon$  e  $\delta\sigma$  sono rispettivamente la somma delle variazioni delle deformazioni e delle tensioni principali,  $E$  è il modulo di Young del materiale,  $\nu$  il modulo di Poisson,  $\alpha$  il coefficiente di dilatazione termica,  $\delta T$  la variazione di temperatura. E' da sottolineare che le quantità  $\delta\varepsilon$  e  $\delta\sigma$  sono invarianti, in quanto non dipendono dall'orientazione del sistema di riferimento assunto e sono da considerarsi grandezze scalari.

Attraverso lo studio termodinamico delle variazioni di entropia per un solido omogeneo ed elastico, si può quantificare la variazione di temperatura al campo tensionale:

$$dT = \frac{T}{\rho c_v} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial T} d\varepsilon_{ij} + \frac{\delta q}{c_v} \quad (2.3)$$

dove  $T$  è la temperatura assoluta del corpo,  $\rho$  la densità,  $c_v$  il calore specifico a volume costante,  $\delta q$  il calore scambiato con l'ambiente,  $\sigma_{ij}$  componente di tensione,  $\varepsilon_{ij}$  componente di deformazione, e  $i, j = 1, 2, 3$ . Considerando il termine, che esprime la derivata parziale del tensore degli sforzi rispetto alla temperatura, se si suppone che il materiale lavori in campo elastico lineare ed è isotropo, con  $\alpha$  indipendente dalla temperatura:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial T} = -\gamma \delta_{ij} = -\frac{E}{1-2\nu} \alpha \delta_{ij} \quad (2.4)$$

dove  $\sigma_{ij} = 1$  se  $i = j$ , oppure  $\sigma_{ij} = 0$  se  $i \neq j$ .

Sostituendo l'equazione (1.4) nella (1.3) si può calcolare la variazione di temperatura  $dT$  da quella corrispondente di volume ( $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ ):

$$dT = \frac{T\gamma}{\rho c_v} d(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + \frac{\delta q}{c_v} \quad (2.5)$$

Se il processo è adiabatico il termine  $\delta q = 0$  la precedente diventa:

$$dT = \frac{T\gamma}{\rho c_v} d(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \quad (2.6)$$

Utilizzando le equazioni di legame otteniamo dalla (1.6):

$$\delta T = -\frac{\alpha T \delta \sigma}{\rho C_p} \quad (2.7)$$

Introducendo i parametri descrittivi del sistema termografico:

$$\delta\sigma = -\frac{DVR\rho C_v}{\alpha T} \quad (2.8)$$

dove R indica il fattore di conversione per compensare gli effetti riconducibili alla dipendenza con la temperatura dell'intensità della radiazione e della lunghezza d'onda emessa.

In condizioni adiabatiche e di deformazioni all'interno del campo elastico, tenendo conto che lo studio si limita all'analisi delle tensioni superficiali, si ottiene (2.9):

$$\Delta T = -K_0 T_0 \Delta(\sigma_x + \sigma_y) \quad (2.9)$$

dove con  $K_0$  si indica la costante termoelastica [ $m^2 / N$ ]:

$$K_0 = \frac{\alpha}{\rho_0 c_p}$$

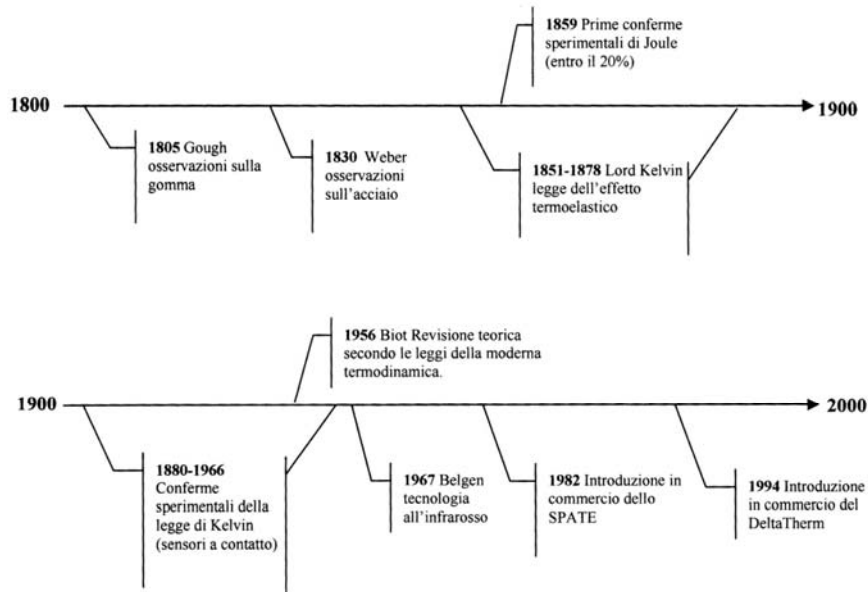
Tale valore è indice della sensibilità del materiale in esame all'effetto termoelastico; il coefficiente di dilatazione termica lineare  $\alpha$  è di norma positivo, dalla (2.9) si deduce che in trazione si ha un raffreddamento, mentre in compressione si ha un riscaldamento [1 - 2].

## 2.2 Analisi delle tensioni mediante termoelasticità

La prima applicazione sperimentale del principio termoelastico, impiegando una tecnica di misura delle variazioni di temperatura senza contatto, per la valutazione dell'entità dei carichi applicati ad una struttura, è da attribuire a Belgen, il quale nel 1967 propose di misurare tale variazione attraverso la rilevazione della conseguente fluttuazione di emissione di energia nel campo dell'infrarosso, ma la scarsa sensibilità degli strumenti dell'epoca limitò l'applicabilità di tali studi all'analisi di corpi sollecitati da carichi molto elevati.

Nonostante il pionieristico lavoro di Belgen, passerà del tempo, prima che i progressi nel campo della termografia nell'infrarosso e nel trattamento dei segnali permettessero di mettere in commercio adeguati sistemi di acquisizione. Nel 1974 venne presentato un primo prototipo di sistema dedicato alla misura del segnale termoelastico, lo SPATE (Stress Pattern Analysis by Thermal Emission).

Lo SPATE, che è dotato di un unico sensore, venne quindi messo in commercio nel 1982, prodotto dalla Ometron Ltd. Un rilevante passo in avanti nel campo dell'hardware si ha con l'avvento del sistema DeltaTherm, della StressPhotonics Ltd, nel 1994. Tale sistema impiega una matrice di sensori, che operando in parallelo, rilevano il segnale termoelastico a campo intero in pochi secondi. Al lavoro di Belgen, ma ancor più alla disponibilità del sistema SPATE si può ufficialmente far risalire la data di nascita della TSA (dall'inglese Thermoelastic Stress Analysis), sigla oggi comunemente impiegata per indicare il metodo di analisi sperimentale delle tensioni basato sull'effetto termoelastico.



**Fig. 2.1: evoluzione nell'applicazione dell'effetto termoelastico per l'analisi delle tensioni.**

La relazione, che consente di determinare la somma delle tensioni principali  $\Delta\sigma$  mediante la misurazione della risposta termoelastica, si ottiene includendo nell'equazione precedente (2.9) i parametri del sensore termografico utilizzato per la misura delle variazioni di temperatura indotte dalle tensioni. Per un generico sistema termografico si può usare la relazione:

$$\Delta\sigma = -\frac{D \cdot R \cdot \rho \cdot C_p}{\alpha \cdot T \cdot \zeta} \cdot V \quad (2.10)$$

in cui  $D$  è la sensibilità del sensore termografico,  $R$  è un fattore correttivo, che compensa le variazioni, legate alla temperatura del target, dell'intensità della radiazione e della sua lunghezza d'onda (secondo la legge di Stefan-Boltzmann),  $\rho$  è la densità del materiale,  $C_p$  è il suo calore specifico a pressione costante,  $\alpha$  è il coefficiente di dilatazione termica,  $T$  è la temperatura assoluta,  $\zeta$  l'emissività della superficie e  $V$  è il valore RMS del segnale di uscita del sensore termico [3].

## 2.3 Fondamenti sulla radiazione infrarossa

Per utilizzare l'effetto termoelastico, è necessario misurare le piccole variazioni di temperatura che si manifestano nel corpo sollecitato adiabaticamente in campo elastico lineare, ipotizzando l'assenza di ogni scambio termico.

L'introduzione della termografia differenziale ad alta risoluzione è stata decisiva per lo sviluppo di tale tecnica. Infatti l'impiego di termocoppie o di altri sensori di temperatura, del tipo a contatto, fornisce soltanto un'informazione puntuale, che può essere ottenuta in modo più efficace impiegando comuni estensimetri elettrici a resistenza. L'impiego, invece, della termografia nell'infrarosso permette di effettuare misure a campo intero con metodo non a contatto.

Si richiamano quindi qui di seguito i principi base della termometria ad irraggiamento.

I sensori di temperatura del tipo a radiazione operano con la radiazione elettromagnetica le cui lunghezze d'onda giacciono nella porzione visibile e infrarossa dello spettro.

Lo spettro visibile è assai stretto: da 0.3 a 0.72  $\mu\text{m}$ , mentre l'infrarosso generalmente viene definito nel campo da 0.72 fino a circa 1000  $\mu\text{m}$ . Al confine con lo spettro visibile, dalla parte delle lunghezze d'onda più basse, ci sono i raggi ultravioletti mentre le microonde limitano lo spettro infrarosso nella parte più alta. I dispositivi di misura della temperatura del tipo a radiazione utilizzano prevalentemente una porzione del campo da 0.3 fino a 40  $\mu\text{m}$ .

I corpi fisici (solidi e gas) possono emettere radiazione elettromagnetica o particelle subatomiche per un numero svariato di motivi. Riguardo la misura di temperatura bisogna interessarsi alla sola parte di radiazione provocata dalla temperatura.

Qualsiasi corpo al di sopra dello zero assoluto di temperatura emette radiazione, dipendente dalla temperatura stessa. Un corpo capace di irraggiare in modo ideale viene detto *corpo nero*.

Tale corpo è capace di assorbire completamente qualsiasi radiazione che lo investe e, per una data temperatura, emette la massima quantità possibile di radiazione termica. La legge che governa questo tipo di radiazione ideale è stata dedotta da Planck:

$$W_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/(\lambda T)} - 1)} \quad (2.11)$$

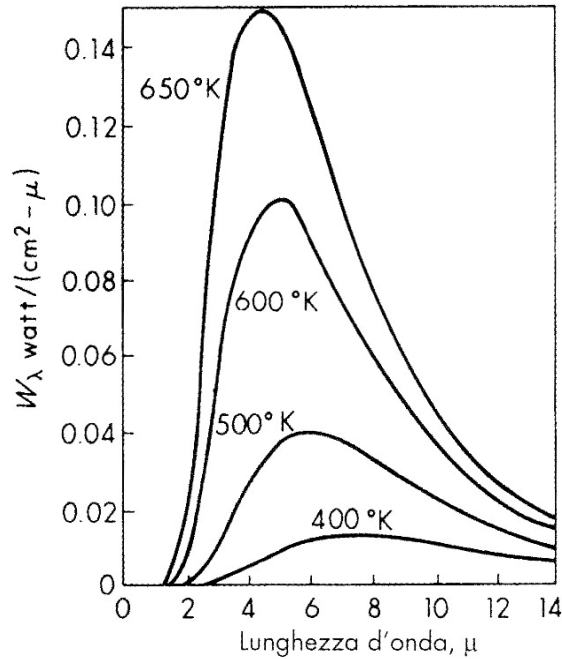
dove  $W_\lambda$  rappresenta l'intensità spettrale radiante emisferica emessa per unità di superficie ad una determinata lunghezza d'onda  $\lambda$ , alla temperatura  $T$ .  $C_1$  e  $C_2$  sono due costanti aventi valore:

$$C_1 = 3,742 \cdot 10^8 \frac{W \cdot \mu\text{m}^4}{\text{m}^2}$$

$$C_2 = 1,439 \cdot 10^4 \mu\text{m} \cdot K$$

L'equazione (2.11), quindi, fornisce la distribuzione dell'intensità radiante in funzione della lunghezza d'onda. In altre parole un corpo nero, ad una certa temperatura emette una quantità di radiazione variabile con la lunghezza d'onda.

Diagrammando  $W_\lambda$  in funzione di  $\lambda$  si ottengono delle curve che, parametrizzate in base alla temperatura assoluta del corpo nero, danno luogo alla "distribuzione di Planck" (fig. 2.2).



**Fig. 2.2: rappresentazione grafica della legge di Planck.**

Le curve mostrano picchi a particolari lunghezze d'onda, e tali valori massimi si trovano a lunghezze d'onda maggiori al decrescere della temperatura. L'area al di sotto di ciascuna curva è la potenza totale emessa e cresce rapidamente con la temperatura. Le equazioni, che forniscono la lunghezza d'onda del picco  $\lambda_p$  e la potenza totale  $W_{TOT}$  ( $T$ ) emessa per unità di superficie sono:

$$\lambda_p = \frac{2.891}{T} \quad [\mu m] \quad \text{LEGGE DELLO SPOSTAMENTO DI WIEN} \quad (2.12)$$

$$W_{TOT}(T) = \sigma T^4 \left[ \frac{W}{m^2 K^4} \right] \quad \text{LEGGE DI STEFAN-BOLTZMANN} \quad (2.13)$$

dove

$$\sigma = \text{costante di Stefan-Boltzmann } 5.67 \cdot 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 K^4} \right]$$

$T$  = temperatura assoluta [K]

La potenza radiante emessa da un corpo o da una superficie reale è, a parità di temperatura, una frazione di quella emessa dal corpo nero, poiché quest'ultimo è un emettitore e un assorbitore perfetto. Il rapporto fra il potere emissivo spettrale di un corpo reale  $W_{\lambda R}$  e quello del corpo nero  $W_\lambda$  alla stessa temperatura e lunghezza d'onda, viene denominata emissività spettrale  $\epsilon_\lambda$ , relativa alla lunghezza d'onda considerata  $\lambda$ .

$$\epsilon_\lambda = \frac{W_{\lambda R}}{W_\lambda} < 1 \quad (2.14)$$

Si definisce inoltre emissività globale il rapporto tra il potere emissivo totale del corpo reale considerato e quello del corpo nero.

$$\varepsilon = \frac{W_{TOT,R}}{W_{TOT}} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} \cdot W_{\lambda} \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} W_{\lambda} \cdot d\lambda} \quad (2.15)$$

L'emissività spettrale è un parametro adimensionale, ed è funzione non soltanto della temperatura e della lunghezza d'onda, ma anche del materiale, della sua forma (angolo di vista) e delle sue caratteristiche superficiali (rugosità, ecc.).

Ciò comporta incertezza nella determinazione del valore numerico da assegnare a tale parametro che, generalmente, viene determinato sperimentalmente sulla superficie del corpo di interesse.

Utilizzando l'emissività globale, è allora possibile esprimere il potere emissivo totale di un corpo reale a partire dalla legge di Boltzmann per il corpo nero:

$$W_{TOT,R} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.16)$$

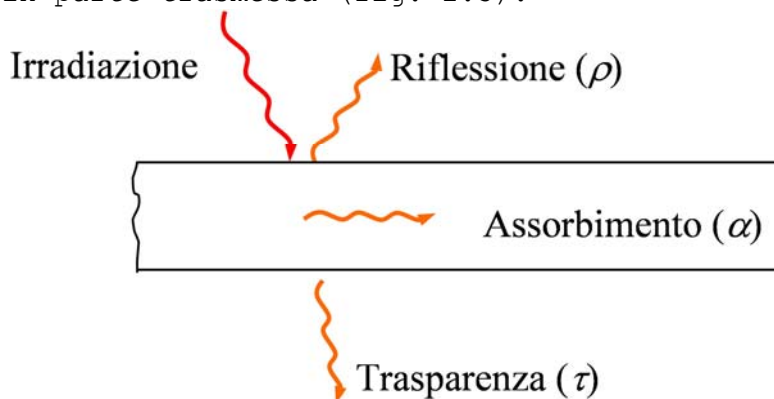
$W_{TOT,R}$  = Potenza radiante emessa, per unità di area, da una superficie reale.

$\varepsilon$  = emissività globale della superficie reale.

$\sigma$  = costante di Stefan-Boltzmann.

$T$  = temperatura assoluta.

Per caratterizzare il comportamento di un corpo reale oltre che come emettitore anche come ricevitore di energia radiante è necessario introdurre, inoltre, i coefficienti di assorbimento ( $\alpha$ ), di riflessione ( $\rho$ ) e di trasparenza ( $\tau$ ). Quando un'onda elettromagnetica incide la superficie di un corpo reale, generalmente la potenza radiante viene in parte riflessa dalla superficie, in parte assorbita all'interno del materiale, ed in parte trasmessa (fig. 2.3).



**Fig. 2.3: funzionamento di un corpo reale come ricevitore di energia radiante.**

Tale comportamento dipende dal tipo di materiale, dalla conformazione della superficie e dalle caratteristiche della radiazione incidente (frequenza, lunghezza d'onda, angolo di incidenza). Possono quindi essere definiti tre coefficienti:

**Coefficiente di assorbimento  $\alpha$**  : rappresenta il rapporto fra la potenza radiante assorbita da un corpo e la potenza radiante incidente;

**Coefficiente di riflessione  $\rho$**  : rappresenta il rapporto fra la potenza radiante riflessa e la potenza radiante incidente;

**Coefficiente di trasparenza  $\tau$**  : rappresenta il rapporto fra la potenza radiante trasmessa e la potenza radiante incidente.

Si può quindi definire la relazione:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.17)$$

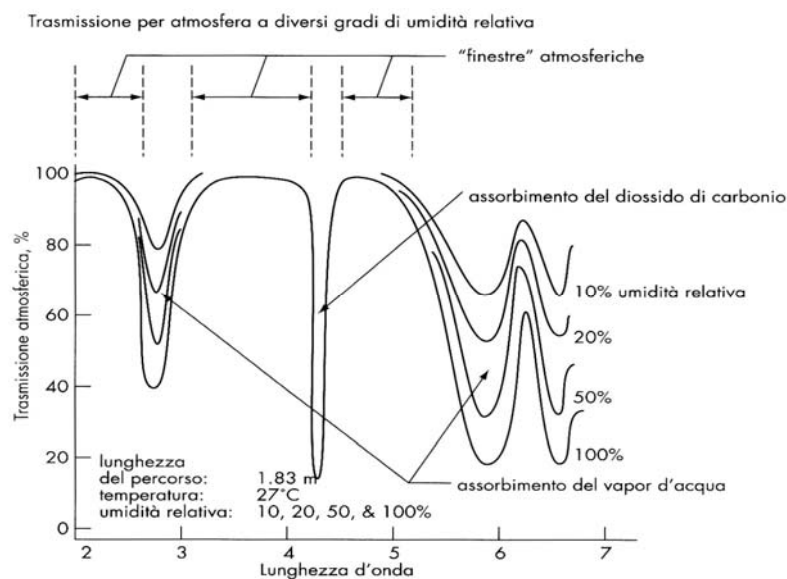
I materiali solidi, che non siano visivamente trasparenti o traslucidi sono praticamente opachi all'irraggiamento, per cui si ha in generale:

$$\begin{aligned} \tau &= 0 \\ \alpha + \rho &= 1 \end{aligned}$$

Il colore gioca un ruolo importante: quelli più scuri sono generalmente associati a fattori di assorbimento più elevati, come d'altra parte è esperienza comune; anche la rugosità della superficie è influente e condiziona in particolare il tipo di riflessione speculare o diffusa. Il corpo nero è caratterizzato dai seguenti coefficienti:  $\alpha = 1$ ,  $\rho = 0$ ,  $\tau = 0$ .

Nelle tecniche di misura della temperatura dei corpi basata sull'emissione di radiazioni termiche (termometria ad irraggiamento), oltre all'incertezza sul valore numerico da assegnare all'emissività delle superfici oggetto di misura, un'altra fonte di errori è legata alle perdite di energia nella trasmissione della radiazione dall'oggetto, sul quale si eseguono le misure fino al sensore di radiazione.

Solitamente lungo il cammino ottico si attraversano gas (spesso l'aria atmosferica) e diverse finestre, lenti, o specchi utilizzati per focalizzare la radiazione e proteggere gli elementi sensibili dall'ambiente circostante. Nell'aria dell'atmosfera l'attenuazione della radiazione è principalmente dovuta alle bande di assorbimento del vapore acqueo, del biossido di carbonio e dell'ozono, così come all'effetto di diffusione dovuto alle particelle di polvere e alla presenza di minuscole goccioline d'acqua. L'effetto dell'assorbimento è mostrato in (fig. 2.4).



**Fig. 2.4: assorbimento atmosferico.**

Poiché l'assorbimento varia con la lunghezza d'onda, gli strumenti di misura sono generalmente progettati per rispondere solo all'interno delle finestre di trasparenza atmosferiche, in modo tale da renderli insensibili a questi effetti (fig. 2.5).

Le lenti impiegate negli strumenti all'infrarosso spesso devono essere realizzate in materiali speciali, dal momento che i vetri solitamente impiegati per uno spettro nel visibile sono quasi totalmente opachi alle radiazioni con lunghezze d'onda maggiori di circa  $2 \mu m$ . La fig. 2.6 mostra la variazione del fattore di trasmissione per vari materiali e in funzione della lunghezza d'onda.

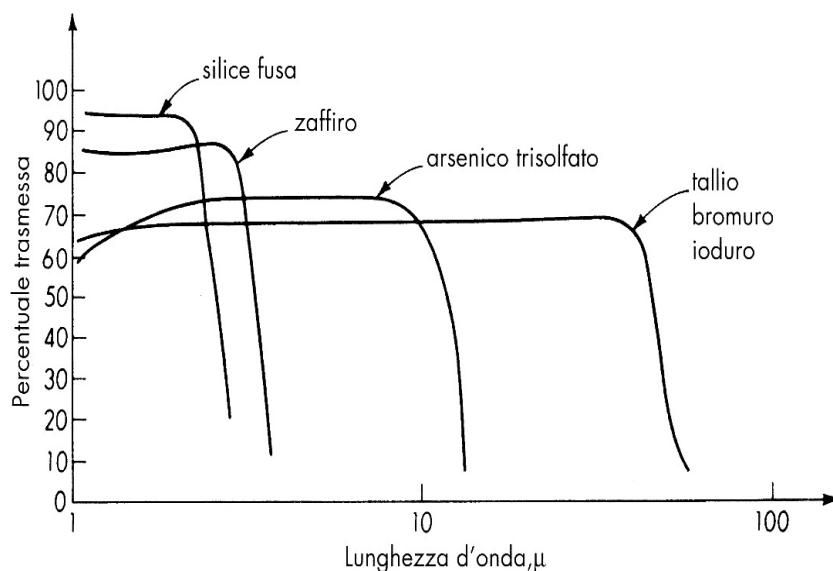


Fig. 2.6: spettro di trasmissione di materiali ottici.

Mentre la radiazione all'infrarosso segue le stesse leggi dell'ottica utilizzate per il progetto di lenti e specchi nel campo del visibile, alcuni materiali utilizzati per le lunghezze d'onda dell'infrarosso (per esempio l'arsenico trisolfato) risultano opachi alle lunghezze d'onda della luce visibile. Per evitare fenomeni d'incertezza, bisogna spazzare le atmosfere, che danno effetti interferenti tra il bersaglio e il sensore e isolare l'elettronica del sistema da ambienti ostili per la ricezione corretta della radiazione.

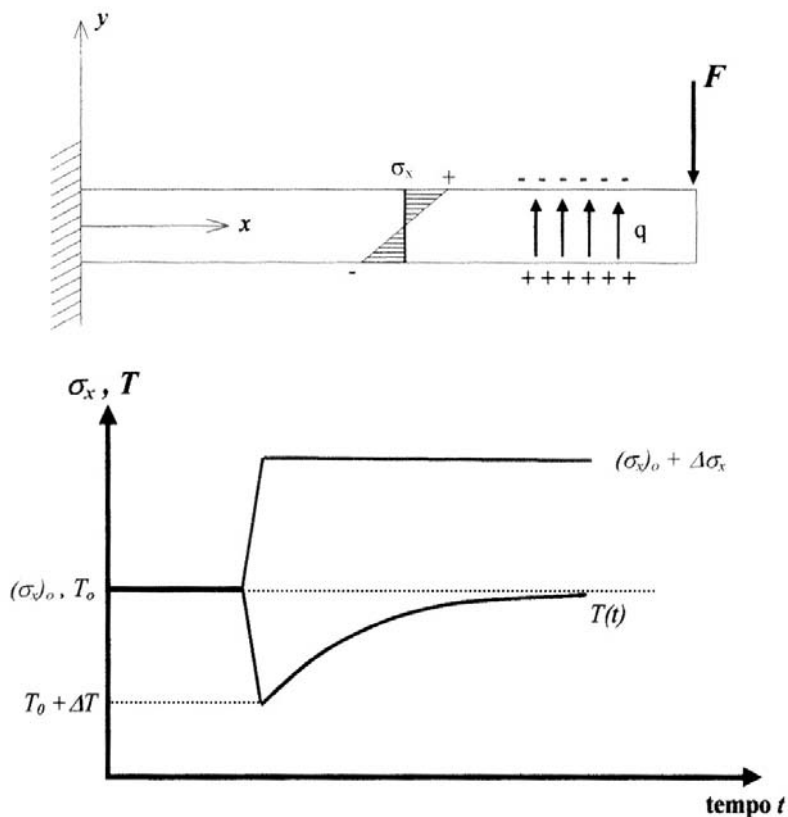
## 2.4 Cause di incertezza nella misura mediante termoelasticità

Le principali cause di incertezza, in un'acquisizione con sistema termoelastico, sono innanzi tutto quei molteplici ingressi interferenti estranei all'effetto termoelastico, che fanno variare la temperatura superficiale del componente meccanico sollecitato.

L'utilizzo dell'equazione (2.6) consente di conoscere lo stato di tensione agente sulla superficie di un corpo mediante la misurazione dell'ampiezza delle corrispondenti fluttuazioni di temperatura indotte per effetto termoelastico; essa è tuttavia strettamente legata all'ipotesi di adiabaticità del processo e quindi all'assunzione che tutto il calore generato in ciascun punto del corpo produca un incremento locale di temperatura, senza alcuna dispersione di calore nell'ambiente per conduzione, convezione od irraggiamento, né flussi termici verso il materiale circostante.

Durante le misurazioni è però improbabile avere un processo perfettamente adiabatico, e ciò comporta un'attenuazione del segnale di misura e quindi incertezza sui risultati ottenuti. Tale dispersione di calore nell'ambiente circostante dipende dal coefficiente di scambio termico del corpo oggetto di studio, mentre la trasmissione interna di calore, strettamente legata alla conduttività del materiale, può essere causata dalla presenza di gradienti di temperatura generati da un diverso stato di tensione indotto dal carico all'interno del corpo o dalla presenza di elementi adiacenti a differente temperatura.

Per rendere trascurabili questi fenomeni di trasmissione del calore e dar luogo ad una condizione di quasi-adiabaticità del processo la sollecitazione della struttura viene realizzata utilizzando carichi variabili, in genere ciclicamente. Infatti se il carico è applicato in modo statico, il calore prodotto dall'effetto termoelastico si propaga da una parte all'altra del corpo ed eventualmente anche nell'ambiente circostante, e quindi la temperatura si uniforma rapidamente. Tale effetto è mostrato in (fig. 3.7) dove si riporta l'andamento qualitativo della temperatura sulla faccia in trazione di una trave a sbalzo sollecitata staticamente a flessione.



**Fig. 2.7: applicazione statica del carico  $F$  su una trave a sbalzo: andamento della tensione e della temperatura.**

Se invece la tensione varia ciclicamente con frequenza sufficientemente elevata, si raggiunge una condizione in cui l'inerzia termica riduce gli effetti della propagazione del calore, e quindi si realizza la condizione di sollecitazione adiabatica. L'effetto della conduzione di calore provoca un ritardo di fase tra la risposta del sistema, ed il segnale di riferimento, relativo al carico applicato alla struttura; tale quantità risulta maggiore alle basse frequenze (fig. 2.8).

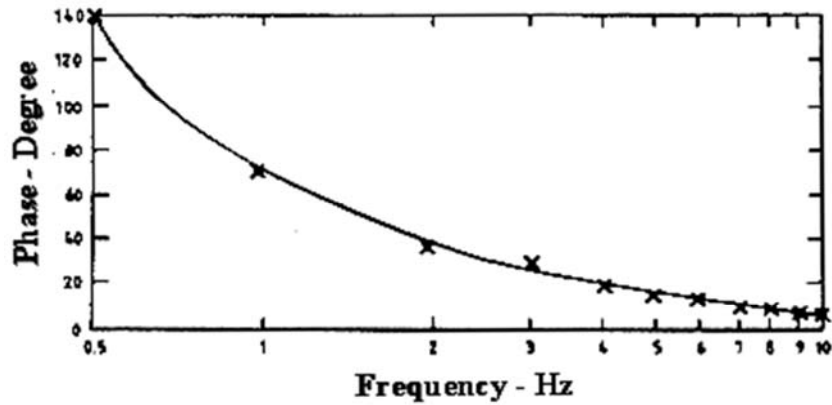


Fig. 2.8: ritardo di fase tra la risposta del sistema di misura ed il segnale relativo al carico applicato alla struttura.

Inoltre per molti componenti in materiale metallico l'applicazione di carichi con frequenze inferiori a 3 Hz comporta la necessità di effettuare correzioni sui valori di fluttuazione di temperatura misurate, proprio per compensare le attenuazioni dovute alla presenza degli scambi di calore (fig. 2.9).

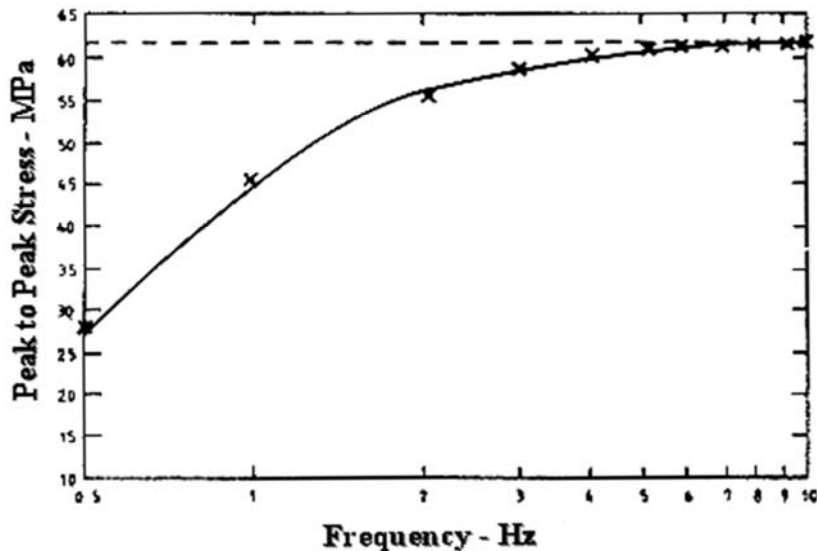


Fig. 2.9: riduzione della risposta termoelastica alle basse frequenze (provino in acciaio).

Un'altra causa di incertezza può essere causata dall'effetto delle riflessioni termiche sulla superficie dell'oggetto in prova, connesso col movimento dello stesso che si ha ovviamente alla stessa frequenza del carico, la non uniforme distribuzione dell'emissività sulla superficie ed un valore basso possono tutte essere notevolmente ridotte verniciando la superficie dell'oggetto in prova. Lo strato di vernice aumenta il rapporto segnale/rumore perché aumenta l'emissività e, se opaco all'infrarosso, riduce drasticamente le riflessioni termiche ma introduce purtroppo un effetto di carico in una tecnica intrinsecamente non intrusiva.

Le vernici comunemente utilizzate presentano, infatti, una costante termoelastica significativamente minore di quelle dei comuni materiali metallici, (dell'ordine dell'11% confrontata con quella dell'alluminio); pur essendo allora soggette alle stesse deformazioni del componente su cui sono applicate si comportano come un 'inerte'.

Le variazioni di temperatura indotte sulla superficie del componente verniciato sono allora generate dal flusso di calore proveniente dal corpo sottostante e risultano generalmente differenti da quelle esistenti sulla superficie del materiale. L'inerzia termica associata allo strato di vernice, strettamente legata al suo spessore, può influenzare allora significativamente le oscillazioni di radiazione emessa dalla superficie del corpo in prova, sia in ampiezza sia in fase. L'effetto risultante di tali meccanismi, noti come *thermal drag-down* e *thermal lag*, è un'attenuazione delle fluttuazioni di temperatura ed un ritardo del relativo segnale di misura rispetto al carico applicato. Per minimizzare tale attenuazione si è visto sperimentalmente che, su strutture sollecitate nella banda di 3-50 Hz, devono essere utilizzati strati di vernice di spessore uniforme, compreso tra i 20-30  $\mu\text{m}$ . Nel caso in cui vengano utilizzati films di vernice di spessore uniforme si nota una certa trasparenza alle radiazioni emesse dal materiale sottostante, mentre per spessori maggiori si rilevano importanti attenuazioni del segnale di misura (fig. 2.10) [4 - 5].

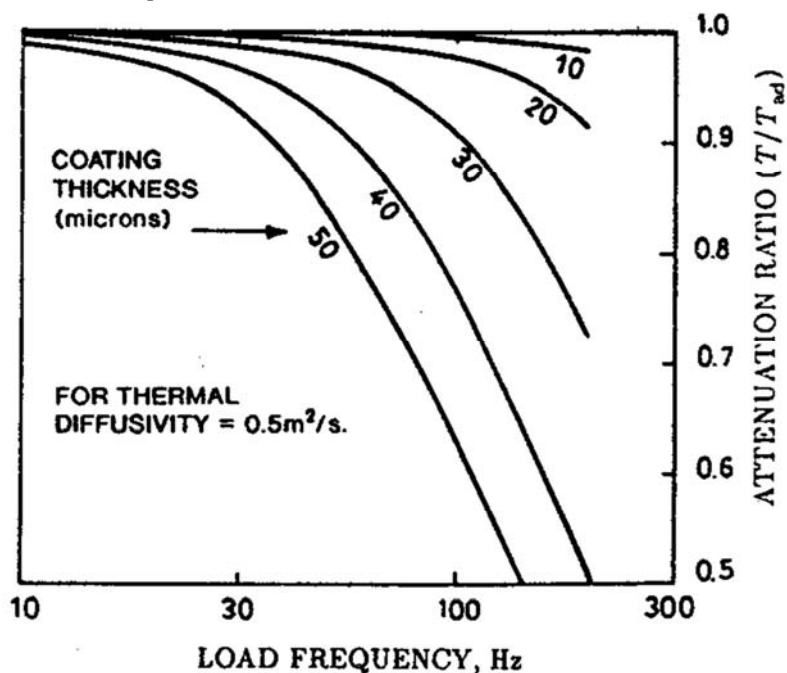


Fig. 2.10: Attenuazione delle fluttuazioni di temperatura al variare dello strato di vernice e della frequenza di carico.

## 2.5 Analisi delle immagini digitali

Da un punto di vista matematico un'immagine termografica viene rappresentata in toni di grigio è una rappresentazione di uno scalare  $I$  su un dominio bidimensionale  $x, y$  (fig. 2.11).

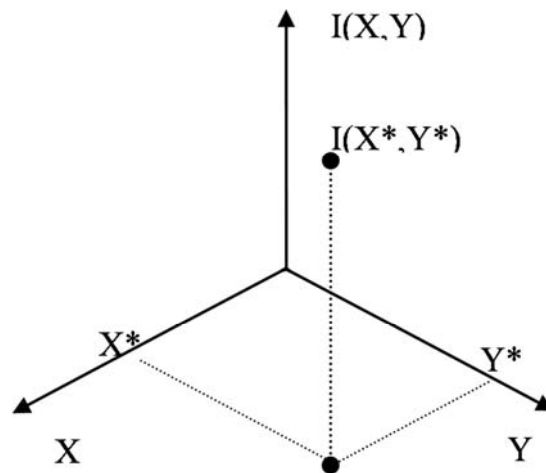


Fig. 2.11: rappresentazione di uno scalare  $I$  su un dominio bidimensionale  $x, y$ .

Se l'elaborazione dell'immagine è affidata al computer, va considerato che esso non lavora con grandezze variabili con continuità (analogiche), bensì con valori discreti (digitali), e quindi è necessario che l'immagine sia digitalizzata, sia nella posizione che nel valore di ampiezza.

Il processo di digitalizzazione divide un'immagine in una griglia di tante piccolissime regioni denominate "picture elements" o "pixels".

Nel computer pertanto, l'immagine è rappresentata da questa griglia digitale detta "bitmap". Ogni pixel della bitmap, è identificato dalla sua posizione nella griglia, come appartenente alla riga numero  $x$  e alla colonna numero  $y$ .

Per convenzione, il sistema di riferimento dei pixels ha l'origine nell'angolo in alto a sinistra della bitmap, la cui posizione è definita come  $(0,0)$  (fig. 2.12).

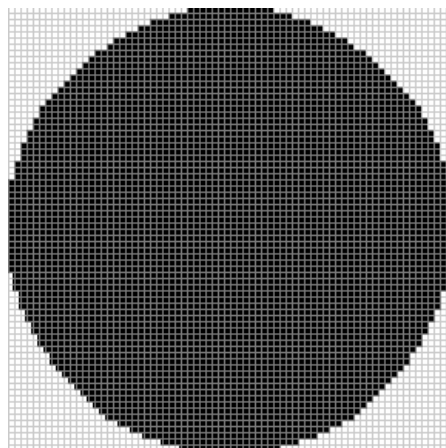


Fig. 2.12: esempio di immagine digitalizzata.

Quando l'immagine sorgente, come una fotografia, è digitalizzata, essa è analizzata come griglia, ovvero, ciascun pixel nell'immagine è campionato individualmente, e la sua luminosità è misurata e quantificata. Questo valore misurato, intero, è associato al pixel, e rappresenta la luminosità dell'immagine in quel preciso punto. Il valore della luminosità è memorizzato nel corrispondente pixel della bitmap dell'immagine. In sintesi, la digitalizzazione di un'immagine, converte una distribuzione continua della luminosità, appartenente a un dominio bidimensionale continuo, in una matrice discreta di  $n$  righe per  $m$  colonne nella quale, ogni coefficiente è rappresentato da un valore intero e discreto dell'intensità luminosa dell'immagine nel punto corrispondente.

Se un'immagine è digitalizzata, le due dimensioni della matrice (bitmap) sono fissate e stabiliscono quella che è definita *risoluzione spaziale*.

In funzione dell'incertezza del sistema di misura e della complessità dell'immagine, il valore della luminosità di un pixel può essere memorizzato utilizzando da 1 a 32 bits. La precisione del valore di luminosità associato al pixel è tecnicamente detta "numero di bit per pixel" BPP (Bit Per Pixel).

Tra varie classi standard di immagini, risultano di frequente impiego quelle in scala di grigio. In tali immagini il valore del generico pixel rappresenta un livello di tinta grigia, che può spaziare dal completo nero al bianco totale. Nei formati grafici utilizzati per la rappresentazione di immagini a colori i toni di grigio vengono ottenuti utilizzando un sottoinsieme dei colori disponibili (le possibili combinazioni dei tre canali RGB con lo stesso valore). Questa classe di immagini è spesso definita come "monocromatica". In un'immagine in scala di grigio a 8 bit, un pixel con valore 0 è totalmente nero, mentre un pixel con valore 255 ( $2^8-1$ ) è assolutamente bianco. Un valore di 127 corrisponde a una tonalità di grigio perfettamente a metà strada tra il nero ed il bianco (grigio medio)..

Le immagini in scala di grigio a 8 bit sono le più comuni per due ragioni:

- la taglia di un byte (8 bit) per pixel rende tali immagini facilmente manipolabili da un computer;
- disponendo di 256 livelli di grigio è possibile riprodurre fedelmente l'immagine monocromatica, poiché l'occhio umano è in grado di distinguere meno di 200 tonalità di grigio.

Altrettanto utilizzate per le immagini digitalizzate ad 8 bit sono le rappresentazioni a 256 sfumature di colori (ad esempio del tipo blu-nero-rosso, blu-verde-rosso, arcobaleno).

Esistono "formati grafici" (in particolari formati scientifici quali il FITS) progettati per fornire la rappresentazione spaziale di una grandezza fisica (temperatura, flusso radio, pressione ecc.) e non per visualizzare colori naturali. In questi formati l'intera "dinamica dell'immagine" è utilizzata per avere la massima precisione della quantità misurata [6].

## **2.6 Sistemi di acquisizione dell'immagine termoelastica**

L'analisi sperimentale delle tensioni basata su termoelasticità (*TSA - Thermoelastic Stress Analysis*) è principalmente condotta mediante tecniche di termografia differenziale.

A differenza della termografia convenzionale, volta alla misurazione di mappe termiche superficiali in termini di temperatura assoluta, la

termografia differenziale consente di misurare variazioni di temperatura nel tempo.

Sono proprio le variazioni temporali di temperatura, indotte per effetto termoelastico nelle strutture sollecitate dinamicamente, a dover essere misurate, per poter risalire, mediante le leggi della termoelasticità, allo stato di tensione superficiale di tali corpi.

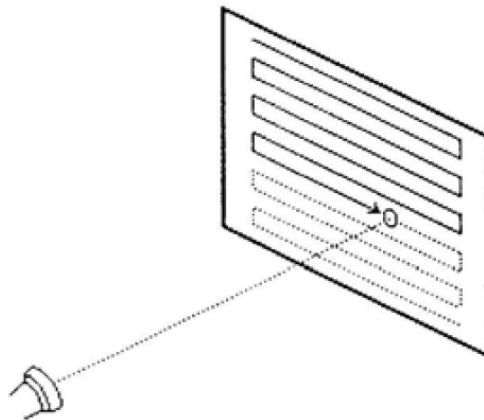
Un ruolo chiave è svolto allora dalla termografia differenziale, che rileva, mediante la misurazione dell'intensità della radiazione infrarossa emessa, le piccole oscillazioni di temperatura, a cui è soggetta la struttura sollecitata.

I sistemi di acquisizione del segnale termoelastico, basati su tecnologia ad infrarossi, ad oggi sviluppati sono due: lo SPATE (realizzato in UK dal 1982 dalla Ometron Ltd), ed il DeltaTherm (realizzato in USA dal 1994 dalla StressPhotonics Inc.). Esistono anche altri esempi di termografi usati per la misura del segnale termoelastico in diversi centri di ricerca, ma ancora non commercializzati.

### 2.6.1 Sistema SPATE

SPATE è un acronimo che sta per "Stress Pattern Analysis by Thermal Emission", ed è il nome del primo sistema commerciale usato per la TSA.

Lo SPATE ha un unico sensore CMT (cadmio-mercurio-tellurio), operante nella banda di lunghezze d'onda compresa tra 8-12  $\mu\text{m}$ . A monte del sensore è collocato un sistema ottico composto da specchi fissi e specchi orientabili, orizzontali e verticali, comandati da un motore interno, mediante i quali si effettua la scansione del corpo in esame (fig. 2.13), in tal modo il segnale termoelastico proveniente da diversi punti della superficie del corpo in esame viene focalizzato sul sensore.



**Fig. 2.13: modalità di scansione progressiva del segnale sulla superficie del provino, dello SPATE.**

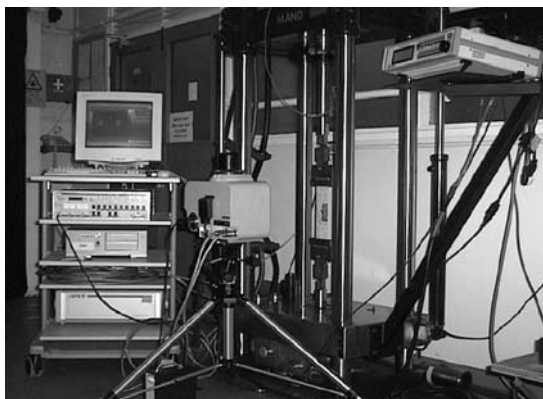
Lo SPATE può effettuare un numero massimo di 256x256 misurazioni (alcuni modelli arrivano a 512x512).

La rotazione minima consentita dal motore, che muove gli specchi, e la distanza della testa della termocamera dalla superficie analizzata determinano la minima distanza tra due punti di misura adiacenti (risoluzione spaziale). Il sensore è raffreddato con azoto liquido. Tale sistema di raffreddamento permette un'autonomia di funzionamento di un paio d'ore. Il segnale acquisito si riferisce ad uno spot circolare, il cui diametro dipende dalla distanza della termocamera dalla superficie analizzata.

La durata di una singola misurazione (relativa cioè ad un singolo spot) viene fissata dall'operatore, ed ha come valore minimo il periodo  $T$  di un ciclo di carico. Per aumentare la qualità della misura del segnale (diminuzione del rumore), è però opportuno adottare tempi di misura più

elevati. Pertanto la scelta del tempo di acquisizione nasce dal compromesso di ottenere misure con basso rumore e con tempi accettabili. Dopo che il segnale è stato correlato con il segnale di riferimento nell'unità di correlazione (Lock-in amplifier), esso è inviato in un convertitore A/D, dove il segnale viene digitalizzato, e quindi memorizzato su supporti magnetici o ulteriormente elaborato per ottenere ad esempio le mappe delle isopache sull'intera regione o i diagrammi del segnale termoelastico lungo una linea.

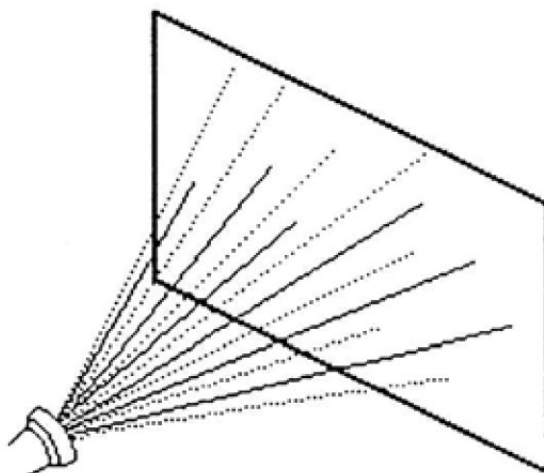
A seguito dell'applicazione del carico ciclico, la struttura subisce degli spostamenti ciclici; il motore interno, che muove gli specchi nella testa di scansione dello SPATE può essere eccitato in modo da compensare gli spostamenti ciclici della struttura, e ciò consente allo spot di misurazione di rimanere a fuoco sempre sulla stessa area della superficie durante la prova, garantendo quindi una buona qualità del segnale.



**Fig. 2.14: sistema SPATE in opera; sullo sfondo del carrello su cui è posizionato il computer ed monitor, è visibile anche l'unità di correlazione (lock-in amplifier).**

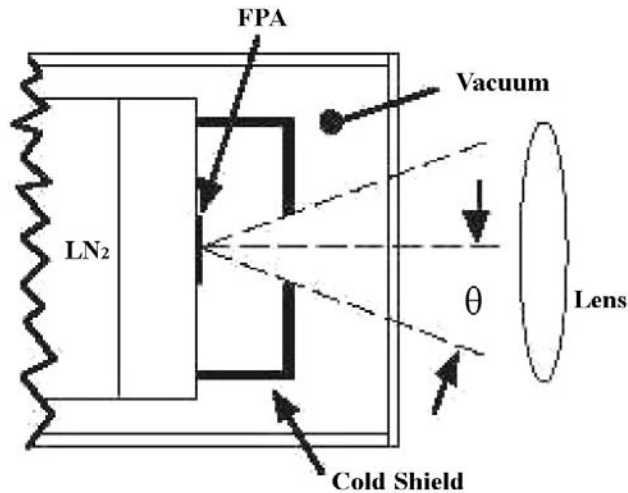
### **2.6.2 Sistema DeltaTherm**

A partire dagli anni '90 è apparsa una nuova generazione di termografi differenziali ad alta risoluzione, aventi una matrice di sensori (Focal Plane Array, FPA). Al contrario dello SPATE, tutti i sistemi FPA non hanno bisogno quindi del sistema di specchi mobili per il rilievo a campo intero del segnale. L'acquisizione avviene contemporaneamente sulla matrice di sensori che, operando in parallelo rilevano il segnale termoelastico a campo intero riducendo i tempi complessivi di acquisizione a pochi secondi, con un miglioramento di ben due ordini di grandezza rispetto ai tempi dello SPATE che invece utilizza un solo sensore.



**Fig. 2.15: modalità di acquisizione del segnale con il DeltaTherm.**

Tra i principali sistemi di questo tipo vi è il DeltaTherm, che è ad oggi lo standard diffuso a livello commerciale per questo tipo di apparecchiature.



**Fig. 2.16: schema del sensore FPA del DeltaTherm, raffreddato con azoto liquido (LN<sub>2</sub>).**

Il DeltaTherm impiega una matrice di sensori InSb (Indio-Antimonio), sensibili alla banda di lunghezze d'onda 2-5  $\mu m$ . Esso è corredato da una unità di elaborazione elettronica del segnale in grado di elaborare dati di misura acquisiti ad un elevato numero di frame/s, ove un frame del segnale è costituito da tutti i pixel della matrice di sensori.

Le dimensioni dell'areola di misura focalizzata in ogni singolo pixel (cioè la risoluzione geometrica della scansione sulla superficie analizzata), dipendono dal numero di elementi che compongono la matrice di sensori e dalla distanza della termocamera dalla superficie del provino in esame. Al variare di tale distanza muta l'area complessivamente inquadrata a parità di numero complessivo di pixels.

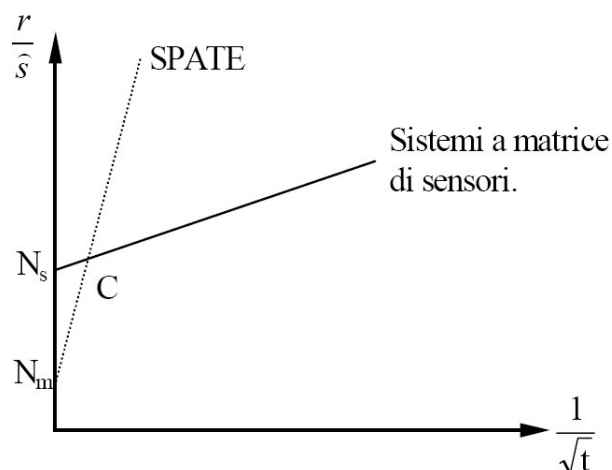
È disponibile un set di diverse lenti che consentono di mettere a fuoco il segnale su ogni pixel per un ampio campo di valori di detta distanza (da pochi centimetri a parecchi metri).

Il sistema di correlazione del DeltaTherm è diverso da quello dello SPATE. Mentre in quest'ultimo il segnale è correlato in modo analogico e dopo viene digitalizzato, nel DeltaTherm il segnale rilevato dalla matrice di sensori viene subito digitalizzato, quindi viene effettuata la correlazione con il segnale di riferimento.

Nei sistemi a matrice di sensori, grazie all'acquisizione in parallelo, è possibile aumentare il tempo di acquisizione del segnale, migliorando il rapporto segnale/rumore pur mantenendo il tempo complessivo di acquisizione di pochi secondi. Infatti per un sensore agli infrarossi il rapporto rumore/segnale,  $r/\hat{s}$ , diminuisce linearmente con  $1/\sqrt{t}$  dove  $t$  è il tempo di acquisizione, con una legge del tipo:

$$\frac{r}{\hat{s}} = m \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} + n \quad (2.18)$$

Tale relazione rappresenta una retta nel sistema di riferimento  $r/\hat{s}$ ,  $1/\sqrt{t}$  riportato in (fig. 2.17).



**Fig. 2.17: confronto del rapporto rumore/segnale tra un sistema SPATE ed uno FPA.**

Il punto di incrocio con l'asse delle ordinate è più basso nello SPATE rispetto ai sistemi a matrice di punti ( $N_m < N_s$ ) ma al contempo il parametro  $m$  è maggiore per lo SPATE.

Ciò indica l'esistenza di un punto di *crossover*  $C$  che stabilisce un tempo di campionamento  $t_c$  al di sotto del quale il sistema SPATE presenta un migliore rapporto rumore/segnale. Come lo SPATE anche i sensori del DeltaTherm hanno la necessità di operare alla temperatura criogenica.

Il sistema di raffreddamento dei primi modelli era realizzato mediante l'impiego di azoto liquido mentre gli ultimi modelli impiegano un ciclo frigorifero che mantiene la matrice di sensori alla temperatura criogenica.

L'introduzione dei sistemi FPA, con il conseguente ridotto tempo di acquisizione, ha apportato un grosso stimolo ed aperto nuove possibilità di applicazione della TSA, in particolare è adesso possibile, ad esempio osservare in tempo reale l'effetto di danneggiamento per fatica e il fenomeno di propagazione della cricca.

### 2.6.3 La termocamera DeltaTherm 1560 e il sistema di acquisizione

Le caratteristiche tecniche della termocamera DeltaTherm 1560, utilizzata nelle nostre prove di laboratorio, sono riassunte nella tabella 2.1.

Tecnologia CCD	Indio Antimonio
Numero di elementi (pixel)	320 x 256 (81920)
Banda passante spettrale	da 3 $\mu\text{m}$ a 5 $\mu\text{m}$
Frequenza di acquisizione	<1000 fotogrammi al secondo
Frequenze di carico	0.6-1000 Hz
Temperatura target	273-323 K (illimitata con l'utilizzo di filtri)
Metodo di raffreddamento	Ciclo Stirling inverso
Tempo di vita del dispositivo di raffreddamento	oltre 5000 ore

Tempo di raffreddamento da 300 K a 77 K	inferiore a 15 min.
Temperatura di esercizio del CCD	da 70 K a 80 K
Risoluzione spaziale	0,15 mm 12 $\mu\text{m}$ circa con zoom
Livello di rumore termico	< 18mK
Risoluzione termica ottenibile tramite software	max 1 mK (con tempo di acquisizione di 30s)

**Tab. 2.1: specifiche tecniche della termocamera DeltaTherm 1560.**

Lo strumento è costruito attorno ad un sensore CCD (Charge Couple Device) costituito da una matrice di 320x256 elementi fotosensibili posizionati nel piano focale FPA (Focal Plane Array). Tali elementi sono semiconduttori, che rispondono al flusso di fotoni che li investe con una carica elettrica, generando così un segnale elettrico che varia proporzionalmente all'intensità della radiazione ricevuta. La sensibilità di tali elementi varia con la lunghezza d'onda della radiazione incidente. La termocamera *Delta Therm 1560* utilizza sensori in Indio-Antimonio (InSb) particolarmente sensibili nel range di lunghezza d'onda 3-5 $\mu\text{m}$ , all'interno del medio infrarosso (2-7 $\mu\text{m}$ ), dove tale materiale consente di avere un'efficienza abbastanza uniforme.

Il tempo di esposizione di ciascun pixel al flusso di fotoni è controllato elettronicamente tramite un otturatore elettronico (Electronic shutter). Durante tale periodo le cariche generate da ciascun sensore sono accumulate in un condensatore (tempo di integrazione del pixel) e campionate alla frequenza di frame. La situazione ideale si ottiene per tempi di integrazione pari alla frequenza di frame così da massimizzare il segnale generato.

La frequenza di campionamento della termocamera è limitata dalla sensibilità dei sensori costituenti l'array termografico ed è inferiore a 1000 frames/s.

La frequenza di applicazione del carico può raggiungere valori prossimi ai 1000 Hz in quanto è possibile lavorare anche in condizioni di aliasing per la misura dell'ampiezza picco-picco delle fluttuazioni di temperatura.

La termocamera è dotata anche di un sistema di raffreddamento interno a ciclo chiuso (ciclo Stirling inverso) in grado di ridurre la temperatura del sensore CCD a 77 K in meno di 15 minuti. Il raffreddamento del sensore si effettua principalmente per aumentare lo scambio di potenza radiante tra sensore e target e quindi per incrementare il rapporto segnale/rumore.



Fig. 2.18: termocamera Delta Therm 1560 con zoom per elevate risoluzioni spaziali.

## 2.7 Acquisizione ed elaborazione dell'immagine

La risoluzione richiesta ad una termocamera è dell'ordine del millesimo di grado Kelvin. Valori così esigui del segnale sono ovviamente soggetti all'influenza di diverse possibili fonti di rumore (come variazioni della temperatura ambiente provocate ad esempio da lievi correnti d'aria, altre macchine o persone che operano vicino).

L'effetto di gran parte di tali fonti di disturbo si elimina mediante una semplice operazione di filtraggio operata sulle armoniche che hanno frequenza diversa da quella del segnale termoelastico, infatti mentre il segnale termoelastico ha la stessa frequenza del carico applicato, i segnali spuri hanno in genere frequenze differenti.

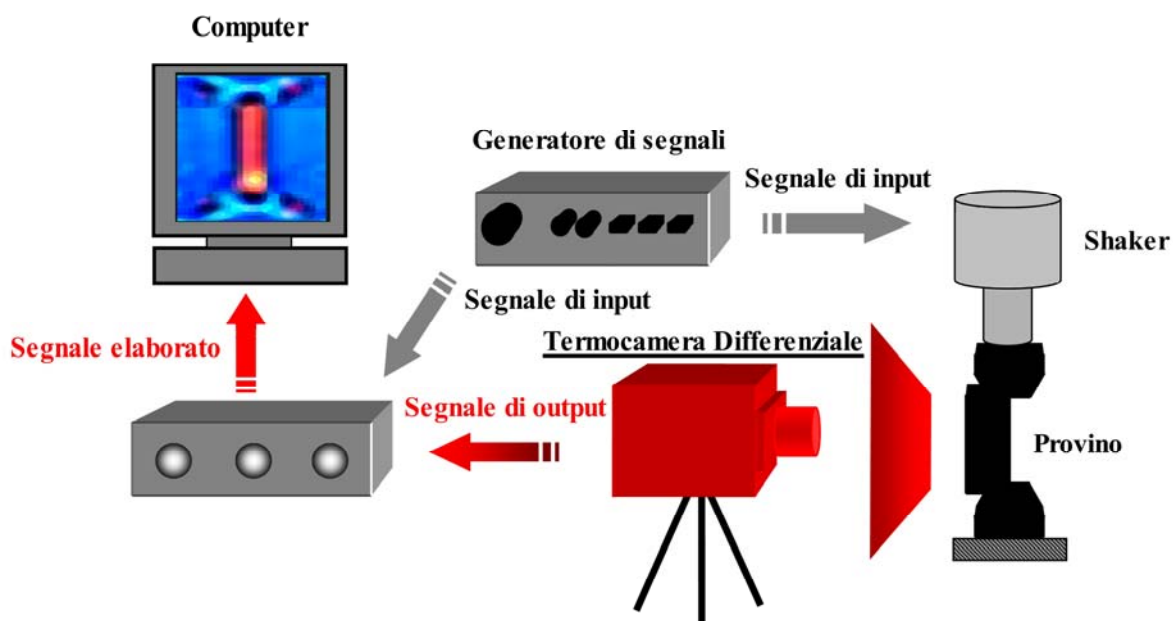


Fig. 2.19: sistema di misura generalmente utilizzato per l'analisi termoelastica delle tensioni (T.S.A. - Thermoelastic Stress Analysis).

I sistemi di acquisizione impiegati nella TSA adoperano in particolare una correlazione in frequenza, ampiezza e fase, del segnale rilevato con quello di riferimento proveniente dal sistema di carico.

### 2.7.1 Correlazione in frequenza

Tale processo è eseguito da una specifica elettronica (SPU Signal Processing Unit) che attua la tecnica di *lock-in*. Questa unità riceve, contemporaneamente al segnale in uscita da ogni pixel della termocamera,

un segnale  $\hat{S}$  che rappresenta in forma e frequenza il carico che sollecita la struttura (segnale di riferimento); tale segnale può essere fornito dallo stesso generatore che pilota il dispositivo sollecitante la struttura o da trasduttori di forza, pressione, deformazione, etc.

Il segnale di riferimento ( $\hat{S}$ ) di frequenza  $f_r$ , viene normalizzato e trasformato in onda quadra ( $\hat{R}$ ); mediante un mixer viene moltiplicato per il segnale di output di ciascun pixel quando entrambi si trovano in fase.

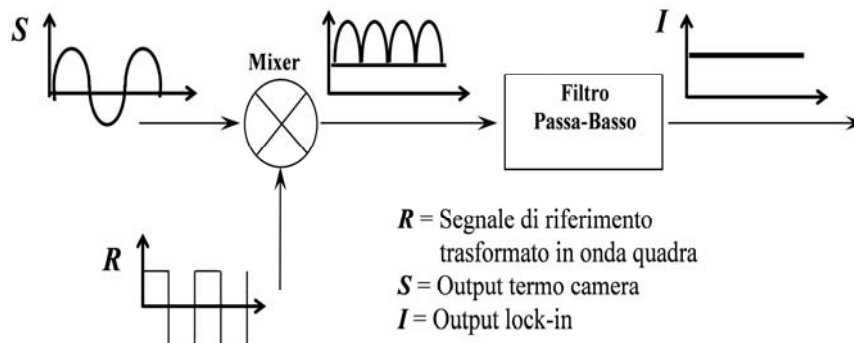


Fig. 2.20: elaborazione del segnale (processo di lock-in).

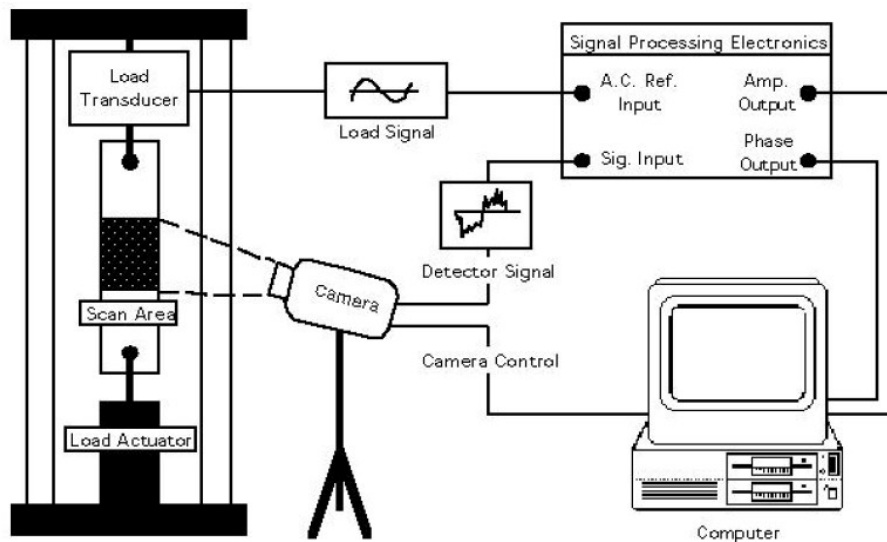
Lo spettro del segnale risultante contiene allora la somma e la differenza delle frequenze dei segnali di partenza. Poiché la componente

del segnale di misura  $\hat{S}$  di effettivo interesse, quella cioè proporzionale alle oscillazioni di temperatura subite dal provino per effetto termoelastico, ha la stessa frequenza del segnale di riferimento ( $f_s=f_r$ ), il segnale risultante avrà una componente continua (di frequenza  $f_s-f_r=0$ ), di ampiezza proporzionale alla parte del segnale misurato che si trova alla frequenza di carico (segnale d'interesse).

Nel segnale uscente dal mixer sarà anche presente una componente di frequenza pari alla somma di quelle di partenza ( $f_s+f_r$ ) che, insieme alle altre componenti dovute principalmente a rumore con frequenza generalmente diversa da quella di riferimento ( $f_i \neq f_r$ ), sono per la maggior parte eliminate per mezzo di un filtro passa-basso.

In (fig. 2.21) è rappresentata schematicamente la tipica catena di misura. In genere il segnale di riferimento viene ricavato in uno dei seguenti modi:

1. dal generatore di funzione che viene usato per impostare la modalità di carico nella macchina prova materiali;
2. dalla cella di carico della macchina di prova;
3. da un estensimetro applicato alla superficie del corpo in esame.



**Fig. 2.21: catena di misura del sistema termoelastico.**

Ovviamente la correlazione in frequenza dei segnali non rende quello termoelastico completamente scevro da rumore. Infatti alcune fonti di rumore possono essere modulate alla stessa frequenza di applicazione del carico, e quindi non vengono filtrate con il metodo precedentemente descritto. Il rumore ancora presente nel segnale all'uscita del processo di *lock-in* dipende essenzialmente dalla costante di tempo  $\tau$  del filtro. La banda spettrale di rumore non filtrata  $\Delta f$  è legata generalmente a  $\tau$  dalla seguente relazione:

$$\Delta f = \frac{0,125}{\tau} \quad (2.19)$$

### 2.7.2 Correlazione in ampiezza e fase

Il confronto tra segnale misurato e quello di riferimento non si limita però alla sola correlazione in frequenza ma, come già detto, riguarda anche l'ampiezza e la fase dei segnali in questione.

Per capire meglio come si realizza questo ulteriore confronto è

conveniente rappresentare il segnale termoelastico  $\hat{S}$  ed il segnale di riferimento  $\hat{R}$  con il metodo dei fasori, ossia come due vettori, in generale sfasati tra di loro, che ruotano con una velocità proporzionale alla comune frequenza. Evidentemente essendo la velocità uguale nei due vettori, l'angolo iniziale di sfasamento si mantiene costante.

Scegliendo la direzione ed il verso del vettore relativo al segnale di riferimento  $\hat{R}$  come riferimento  $X$ , il segnale termoelastico  $\hat{S}$  può essere rappresentato sia dalla sua ampiezza  $\hat{S}$  che dall'angolo di sfasamento  $\vartheta$  rispetto ad  $\hat{R}$ , sia dalle componenti cartesiane  $\hat{S}_X$  ed  $\hat{S}_Y$  (fig. 2.22).

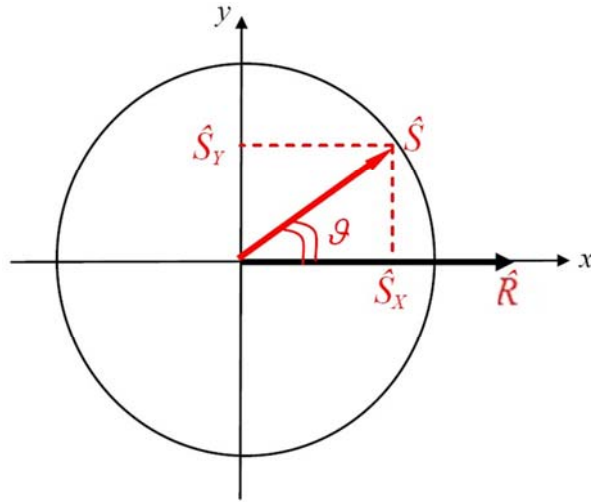


Fig. 2.22: rappresentazione vettoriale del segnale termoelastico  $\hat{S}$  e del segnale di riferimento  $\hat{R}$ .

I legami analitici tra queste componenti scalari sono dati dalle seguenti relazioni:

$$|\hat{S}| = \sqrt{(\hat{S}_x)^2 + (\hat{S}_y)^2} \quad (2.20)$$

$$\vartheta = \arctg \frac{\hat{S}_y}{\hat{S}_x} \quad (2.21)$$

$$\hat{S}_x = |\hat{S}| \cdot \cos \vartheta \quad (2.22)$$

$$\hat{S}_y = |\hat{S}| \cdot \sin \vartheta \quad (2.23)$$

Qualora il segnale di misura in uscita da ciascun pixel si trovi in fase con il segnale di riferimento, la componente  $\hat{S}_y$  risulta nulla e la  $\hat{S}_x$  è massima. Qualora sia presente uno sfasamento  $\vartheta$  tra i due segnali la componente  $\hat{S}_y$  è diversa da zero ed il processo di *lock-in* viene effettuato quando i segnali non risultano completamente in fase, dando luogo ad un errore pari a  $\hat{S}_x \cdot (1 - \cos \vartheta)$ . Il controllo di tali due componenti consente allora la correzione di eventuali sfasamenti presenti tra i due segnali: la regolazione di fase può essere infatti effettuata rendendo minima la componente  $\hat{S}_y$  del segnale, e massimizzando così la  $\hat{S}_x$ .

Il controllo di fase può essere anche eseguito confrontando la (2.22) con la (2.20) che si mantiene costante anche in presenza di sfasamento ma che non fornisce informazioni sul segno del segnale di misura, non permettendo quindi di caratterizzare lo stato di tensione misurato sulla struttura in prova (trazione o compressione).

La correzione di fase può essere effettuata automaticamente dal software o manualmente agendo sulla fase del campionamento della termocamera (*phase auto set*)

Una volta in fase con il segnale di riferimento, quello elaborato e relativo ad ogni singolo pixel, campionato e quantizzato da un convertitore analogico-digitale ad 8 bit, è finalmente pronto per rappresentare lo stato di tensione relativo a ciascun punto di misura sull'area inquadrata del provino.

In questo capitolo è stata introdotta la teoria termoelastica, e la maniera in cui viene sfruttata per effettuare campi di stress. A tal proposito, sono stati descritti gli strumenti di misura sviluppati, ed i loro componenti, al fine di comprendere le operazioni effettuate. Si può, quindi, intervenire, se necessario sui componenti della catena di misura stessa, per migliorare, quando è possibile, le operazioni eseguite, oppure per effettuare, come nel presente lavoro, il post processing delle immagini termografiche [8-9].

## CAPITOLO 3

### PROBLEMATICHE LEGATE AL MOVIMENTO NELLE MISURE EFFETTUATE MEDIANTE TERMOELASTICITA'

#### Introduzione

Quando si effettuano indagini sulla distribuzione di tensione agente su componenti meccanici mediante termoelasticità, devono essere limitati gli spostamenti e le deformazioni indotte, al fine di garantire l'accuratezza della misura. Nel presente capitolo vengono descritti alcuni effetti presenti nelle mappe di tensione provocati dal movimento, ed le soluzioni possibili.

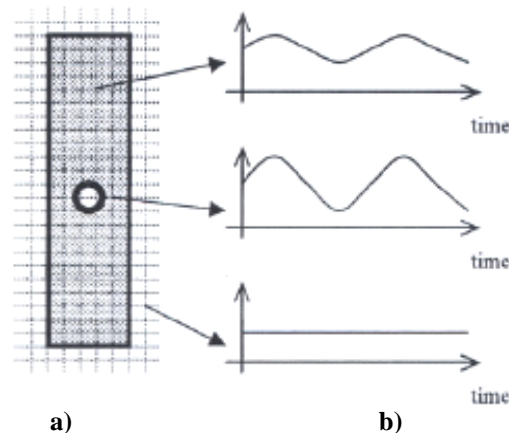
#### 3.1 Effetti del movimento su mappe termoelastiche acquisite con sistemi a CCD

Il sistema del Delta Therm 1560, di cui ne abbiamo ampiamente parlato nel capitolo precedente, consente di rilevare le variazioni di temperatura, sincrone con una frequenza di riferimento, per ogni pixel costituente il CCD (charge couple device) della termocamera.

Nel caso in cui l'oggetto in analisi sia in movimento, la zona di indagine, scelta su di esso, subisce uno spostamento nel tempo, e l'elemento sensibile della termocamera, ossia il CCD, rileva le fluttuazioni di energia termica, che verranno in seguito interpretate erroneamente dal software quali concentrazioni locali di tensioni.

Per comprendere tale problema è opportuno ricorrere ad un esempio: consideriamo un provino forato soggetto ad un carico alterno, che non produce deformazioni eccessive, sul quale si vuole effettuare una misura mediante TSA.

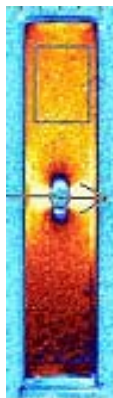
Ogni pixel, del sensore CCD, riceve energia raggiante da una singola zona del provino, che viene, così discretizzato in aree elementari (fig. 3.1a), la cui dimensione dipende dal tipo di ottica adottata e dalla distanza della termocamera dal provino.



**Fig. 3.1: discretizzazione dell'area di vista andamenti temporali delle temperature di alcuni pixel.**

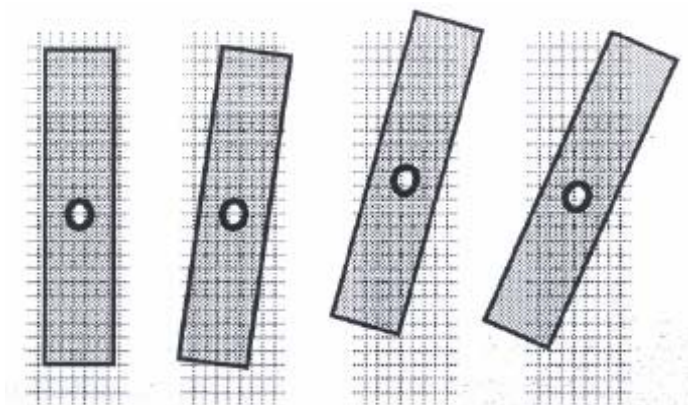
Durante il ciclo di carico, ogni pixel ha il compito, quindi, di acquisire la storia temporale della temperatura di una ben determinata

area elementare (fig. 3.1b). Il segnale di ogni pixel viene, così, filtrato dall'amplificatore lock-in, ed elaborato dal software Delta Vision; si giunge alla misura dello stress, presente su ogni area elementare, con cui è stata discretizzato il provino. Effettuando questo tipo di analisi in parallelo su tutti i pixel che costituiscono l'immagine, è possibile presentare il risultato come una mappa di stress superficiale (fig. 3.2).



**Fig. 3.2: mappa di stress superficiale agente sul provino.**

Il vantaggio di questa tecnica è quello di fornire una immediata visualizzazione delle zone con maggiore concentrazione di tensione. Supponiamo di effettuare la stessa misura in presenza di movimento rigido arbitrario ed assenza di carico, ipotizzando che vi sia una differenza tra l'energia radiante emessa dalla superficie del provino e lo sfondo. Durante il moto, il provino assume posizioni diverse in ogni istante successivo, mentre la griglia, che rappresenta il CCD della termocamera, rimane fisso solidale ad essa (fig. 3.3).



**Fig. 3.3: spostamento relativo tra termocamera e provino.**

Di conseguenza ogni singolo pixel inquadra, in modo casuale aree diverse del provino e/o lo sfondo; vengono così rilevate apparenti fluttuazioni di energia termica provocate dal movimento. Tali fluttuazioni saranno erroneamente interpretate dal sistema come variazioni di tensione. Il solo processo di elaborazione del segnale (lock-in), pur se in grado di ridurre di una quantità significativa il "rumore" presente nel segnale in uscita dalla termocamera, non è sufficiente ad ovviare a disturbi legati al movimento. Di seguito verranno mostrati gli effetti presenti nelle mappe termoelastiche provocati dal moto del componente in esame.

### 3.1.1 Pseudo-segnali di tensione

Un esempio tipico si verifica quando il C.C.D. della termocamera acquisisce segnali, che hanno la stessa frequenza del carico, quindi, dell'effetto termoelastico.

Supponiamo di voler analizzare lo stress su un'area di un provino, con due campi di temperatura differente.

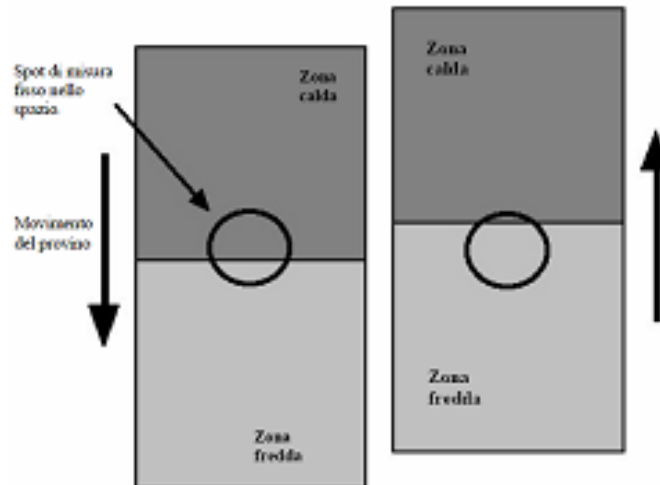


Fig. 3.4: il provino in moto, e l'area (il cerchio) di misura fissa.

Il provino è in moto rigido, rispetto alla termocamera, e quindi, l'area di misura varia istante per istante; tale dispositivo acquisisce fluttuazioni di energia radiante dovuti allo spostamento dell'areola da una zona calda all'altra più fredda (fig. 3.4).

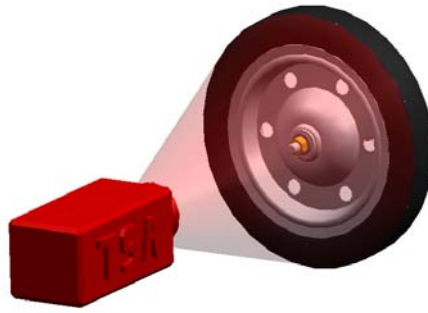
Se il moto è periodico, dovuto all'applicazione di un carico dinamico, possiede, quindi, la stessa frequenza del segnale d'eccitazione. Per questo motivo, lo pseudo-segnale di tensione non viene filtrato dall'amplificatore lock-in, e viene ad integrarsi nel segnale termoelastico.

In conclusione si può dire che lo pseudo-segnale viene interpretato come concentrazione di tensione laddove vi è, in seguito al movimento dell'oggetto di indagine, un semplice passaggio da una zona a temperatura maggiore ad una a temperatura minore o viceversa [10].

### 3.1.2 Effetto spigolo

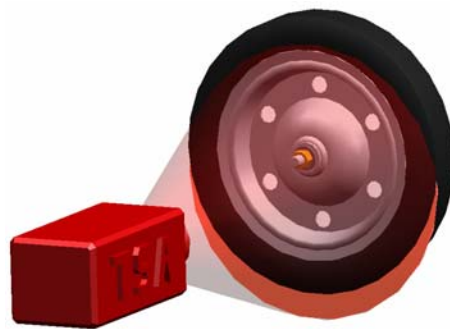
Questo effetto è dovuto alla variazione di emissione di energia radiante nelle zone prossime allo spigolo provocate dal movimento periodico del carico.

Il C.C.D. è interessato nell'istante iniziale dall'emissione di energia radiante dell'oggetto in esame (fig. 3.5); supponiamo che all'istante successivo (fig. 3.6) subisca un piccolo spostamento verticale, per tale



**Fig: 3.5: oggetto in esame all'istante iniziale.**

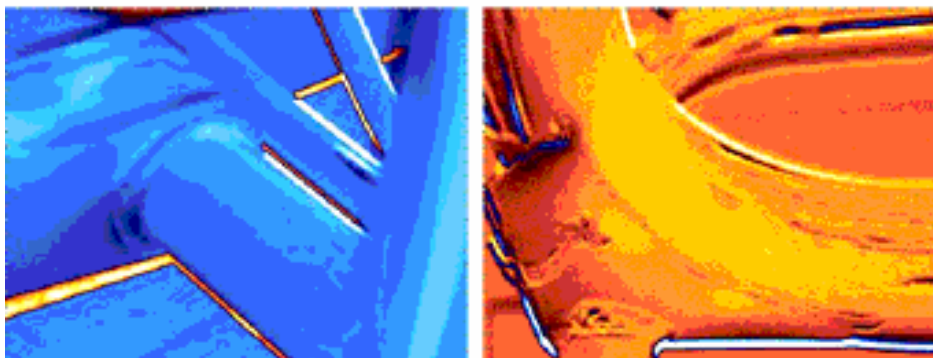
motivo alcuni elementi sensibili del C.C.D. acquisiscono l'energia raggiante emessa dello sfondo.



**Fig. 3.6: istante successivo, inquadratura parziale dello sfondo.**

A causa di questo effetto spigolo, la mappa termoelastica, che il software elabora, mostra un'elevata concentrazione di tensione fittizia sui bordi del componente. Infatti, la differente temperatura dell'oggetto stesso e dello sfondo, che alternativamente vanno ad occupare la medesima posizione nell'area inquadrata della termocamera, viene erroneamente interpretata come una forte concentrazione di tensioni.

Di seguito riportiamo alcune mappe, che mostrano tale problema (fig. 3.7).

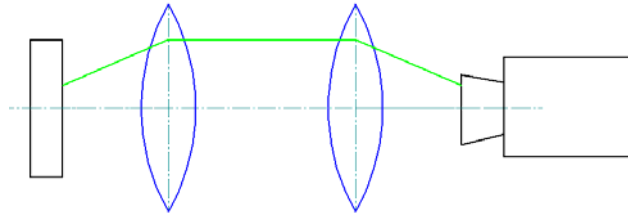


**Fig. 3.7: mappe termografiche che mostrano effetto spigolo.**

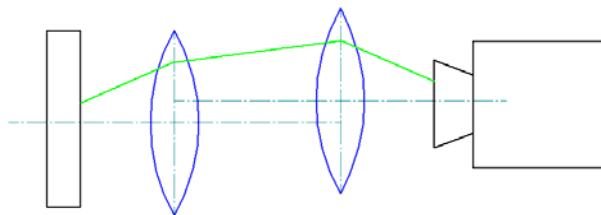
Per cercare di ridurre l'effetto spigolo esistono alcune tecniche:

- a) Riduzione del carico applicato: in tal modo si limita lo spostamento dell'oggetto che è responsabile dell'effetto spigolo.
- b) Variazione dell'angolo di vista della termocamera: il movimento dell'oggetto inquadrato deve essere lungo l'asse della stessa e non

- perpendicolare ad essa; se ciò non è possibile, è comunque indicato l'utilizzo di specchi a 45° per ottenere il medesimo effetto.
- c) Resa uniforme della temperatura dello sfondo a quella dell'oggetto: la soluzione pratica consiste nel disporre un pannello piano dietro l'oggetto, rivestito con vernice ad alta emissività.
- d) Utilizzo di un sistema ottico: se lo spostamento dell'oggetto è alternato e compreso entro un range, si può ricorrere ad un particolare sistema ottico, costituito da due lenti bifocali (una solidale all'oggetto e l'altra solidale alla termocamera), in grado di mantenere l'immagine dell'oggetto immobile rispetto alla termocamera (fig. 3.8 e fig. 3.9).



**Fig. 3.8: sistema ottico per la correzione dell'effetto spigolo (strumento allineato con il misurando).**



**Fig. 3.9: sistema ottico per la correzione dell'effetto spigolo (strumento non allineato con il misurando).**

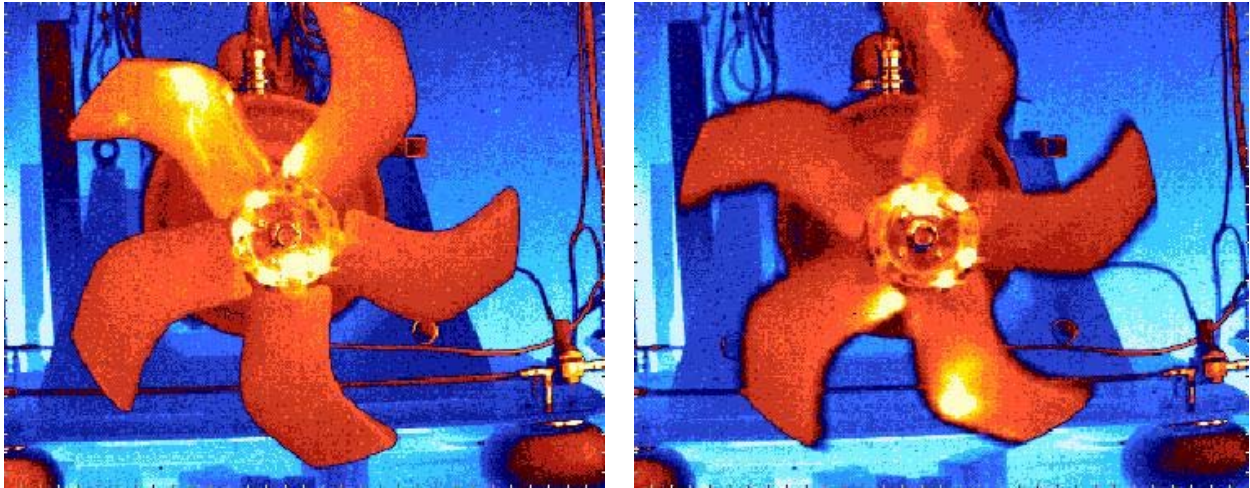
- e) soluzione di tipo software: se il moto del misurando è puramente rigido, l'effetto può essere compensato attraverso un software (Motion Compensation Software), messo a disposizione dalla Stress Photonics [11].

### 3.2 Misure su oggetti in movimento

Le soluzioni precedenti non sono attuabili qualora il movimento dell'oggetto non sia imputabile alla sollecitazione, ma sia proprio dell'oggetto in esame, oppure lo spostamento risulti essere estremamente ampio, tale da non poter essere sufficientemente ridotto.

Si considerino, ad esempio, degli organi in rotazione soggetti ad un carico; tali componenti presentano accanto al problema dell'effetto spigolo precedentemente esposto, quello legato al movimento (rotazione), che in tal caso non può più considerarsi piccolo come in precedenza.

Pertanto, poiché il tempo di acquisizione del CCD è troppo alto rispetto alla velocità di moto dell'oggetto, viene acquisito un segnale spurio, che viene comunemente chiamato "effetto scia" (fig. 3.10 b).



**Fig. 3.10: termografia su oggetto fisso rispetto alla termocamera (sinistra); termografia su ventola in rotazione (destra).**

Per risolvere questo difetto del sistema si possono adottare quattro possibili soluzioni:

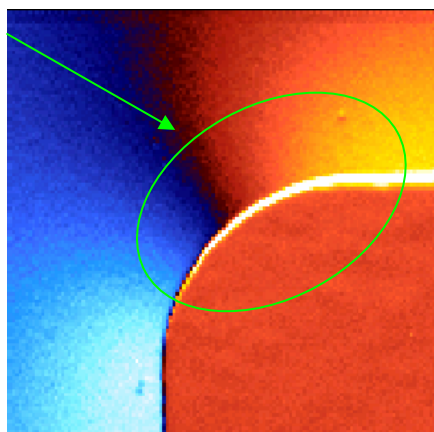
- a) Diminuzione del tempo di acquisizione, al fine di ridurre il più possibile il movimento dell'oggetto di misura all'interno del filmato termico.
- b) Sistema ottico che compensa il movimento, con l'ausilio di un sistema di specchi, senza il supporto di ulteriori correzioni di tipo software.
- c) Utilizzo di un sistema software per compensare il movimento dell'oggetto mediante inseguimento delle immagini, estrapolate dal filmato termico (metodo post-processing).

### **3.2.1 Diminuzione del tempo di acquisizione**

Diminuire il tempo di acquisizione della termocamera consente di ridurre considerevolmente l'errore di misura. Questo perchè ogni punto del corpo si sposta di poco in ogni istante successivo del filmato termico. Il problema di tale soluzione è che comunque non viene eliminata la rotazione del corpo, per cui continua a essere presente un certo errore, dovuto all'effetto scia. Non risulta, inoltre, possibile sapere e controllare, l'esatto intervallo tra un valore acquisito e quello successivo, è pertanto impossibile determinare il tempo che intercorre fra due acquisizioni consecutive di un generico pixel appartenente all'array di sensori. Questo aspetto pregiudica inevitabilmente la possibilità di far coincidere la frequenza di acquisizione dei dati, con la velocità angolare dell'oggetto rotante, per cercare di farlo apparire fermo rispetto alla termocamera.

### **3.2.2 Soluzione mediante software**

Il software del sistema Delta Therm della Stress Photonics, denominato Delta Vision, ha una funzionalità, che consente di compensare il movimento di una struttura sottoposta ad un carico. Come già ampiamente discusso, l'applicazione di un carico ciclico ad una struttura, induce necessariamente moti periodici. In taluni casi, il movimento influenza la misurazione dello stato tensionale, dando origine a segnali artificiali o "pseudo-segnali", che risultano essere particolarmente intensi in corrispondenza dei bordi della struttura (fig. 3.11):



**Fig. 3.11: effetto bordo in corrispondenza di uno spigolo.**

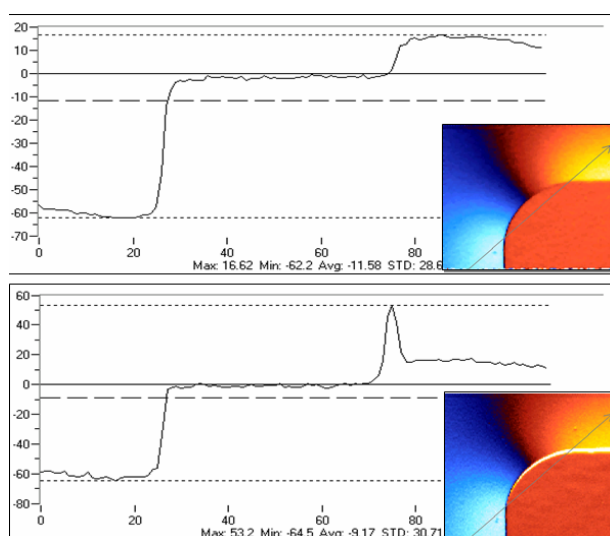
Inizialmente, anche la Stress Photonics suggeriva l'adozione di metodi meccanici, per ridurre l'effetto margine.

In seguito, lo sviluppo della tecnica termoelastica ha portato alla elaborazione di software pensati appositamente per tale scopo, come il MoComp (Motion compensation) della Stress Photonics.

Tale software calcola lo stress dovuto all'effetto termoelastico, dopo aver compensato i piccoli spostamenti dei bordi dovuti al carico applicato. Le fasi di tale elaborazione sono due: la prima è la scelta, da parte dell'utente, dei punti di riferimento sulla mappa termica, e la seconda è il riallineamento vero e proprio delle immagini acquisite utilizzando l'algoritmo sviluppato.

La validità di tale metodo viene anche confermata dall'utilizzo della "interrogation line crosses", che indica l'andamento della variazione di temperatura, lungo una determinata linea di applicazione definita dall'utente.

Come è possibile notare dalla mappa acquisita senza MoComp (fig. 3.12 in basso), il grafico evidenzia un picco di temperatura in prossimità del bordo, mentre l'altro non presenta tale effetto (fig. 3.12 in alto).



**Fig. 3.12: andamento della variazione di temperatura lungo una linea di interrogazione.**

Quando viene effettuata un'acquisizione in modalità MoComp vengono mostrate tre mappe: immagine 1, immagine 2 e MC; le mappe termiche 1 e 2 sono relative alle condizioni estreme del carico, mentre la MC rappresenta la distribuzione di stress.

Il grosso limite di questa tecnica risiede nella sua applicabilità a corpi dotati essenzialmente di moto rigido e periodico.

Il software, inoltre, in questione non riesce ad elaborare immagini con la presenza di scie al loro interno, quasi inevitabile nelle misure di oggetti rotanti. Perciò, questo procedimento non è utilizzabile nel caso in cui il movimento del misurando sia sufficientemente ampio e presenti velocità consistenti. Infine, e non per importanza, i risultati sperimentali conseguiti dimostrano come, da un punto di vista qualitativo, la compensazione del movimento mediante MoComp fornisca un valido aiuto nell'analisi tensionale di oggetti in movimento, il cui moto sia ripetibile nel tempo, cioè di natura puramente ciclica o traslazionale. Quindi tale tecnica di compensazione non è applicabile per oggetti dotati di movimento casuale, data la non correlabilità dello spostamento con il carico applicato [9]. Nei prossimi capitoli di questo lavoro di tesi verrà mostrato l'utilizzo del software MoComp, per individuare gli sforzi di sollecitazione agenti sul vincolo tra contatori di uso domestico, e condotta quando sono sottoposti a vibrazione. Saranno, inoltre, valutate le prestazioni metrologiche ante e post vibrazione dei contatori.

### **3.2.3 Soluzione mediante post-processing**

Tale metodologia è stata sviluppata nell'ambito di questo lavoro di tesi di dottorato, consente di effettuare misure di campi di stress mediante T.S.A. su componenti meccanici in moto qualsiasi o in rotazione. I passi principali sono i seguenti:

- 1) Acquisizione del filmato termico mediante il programma Delta Therm.
- 2) Compensazione del movimento utilizzando il software Thermoimage.
- 3) Elaborazione dei frame, in uscita dal Thermoimage, per ottenere la distribuzione degli stress; per tale fine sono stati sviluppati in ambiente Mat-Lab due algoritmi, il primo è basato sulla DFT, il secondo fa riferimento alle elaborazioni tipiche dell'amplificatore lock-in.

## CAPITOLO 4

### ALLESTIMENTO DI BANCHI PROVA PER LA QUALIFICA DI MISURATORI PORTATA

#### Introduzione

In questo capitolo vengono descritti i banchi prova messi a punto ed utilizzati per la qualifica meccanica di misuratori di portata. Per i misuratori con  $Q_n < 16 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $Q_n$  = portata nominale, uso domestico) sono stati messi a punto due banchi di prova: uno "idraulico" per la taratura del contatore dell'acqua ed usato sia prima che dopo la prova a vibrazione, l'altro "meccanico" per sottoporre il misuratore di portata al ciclo di vibrazione stabilito dalla "Proposta di Direttiva del Parlamento Europeo", e per le successive analisi termoelastiche sui supporti.

Per i contatori con  $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$ , è stato realizzato un banco prova per sottoporli al ciclo di vibrazione previsto, mentre per la taratura idraulica viene utilizzato il banco messo a punto dal Gruppo di Misure Meccaniche dell'Università Politecnica delle Marche.

#### 4.1 Caratteristiche tecniche dei contatori oggetto delle prove

##### 4.1.1 Contatori con $Q_n < 16 \text{ m}^3/\text{h}$

Il contatore da provare è stato gentilmente fornito dalla società distributrice dell'acqua potabile per la nostra regione "Umbra Acque s.p.a.", appartenente alla serie di strumenti che normalmente installa negli impianti di propria competenza.

Si tratta di un contatore fabbricato da "MADDALENA s.r.l." modello "CD ONE TBR", che come mezzo di misura utilizza una turbina a getto unico, dotato di quadrante bagnato e speciali lancette a coltello che permettono la lettura diretta su rulli numerati, cassa e testa in ottone titolato, alberino portarulli in acciaio inox e disco trasparente in vetro temprato (fig. 4.1).



Fig. 4.1: il primo contatore testato.

La calotta è tonda con coperchietto, inoltre è libera di ruotare di 360 gradi per rendere più facile l'installazione e la lettura del volume totalizzato.

Idoneo alla misura di acque dolci e limpide, dove non siano possibili incrostazioni che possano bloccare l'orologeria o rendere difficoltosa la lettura, in un campo di temperatura tra 0 e 30 °C, fornisce prestazioni idrauliche secondo la Classe B delle Normative CEE 75/33. (Per la definizione delle Classi metrologiche fare riferimento al paragrafo

A1.7.2).

Quello da noi testato era destinato ad utenze domestiche, perciò dotato delle caratteristiche dimensionali e di impiego riportate tab. 4.1:

Calibro	mm	13
	pollici	1/2"
Q <sub>min</sub> : portata minima con errore ± 5 %	l/h	30
Q <sub>t</sub> : portata di transizione con errore ± 2 %	l/h	120
Q <sub>n</sub> : portata nominale	m <sup>3</sup> /h	1,5
Q <sub>max</sub> : portata massima	m <sup>3</sup> /h	3
Sensibilità	l/h	7-8
Pressione di esercizio	bar	16
Perdita di carico a Q <sub>max</sub>	bar	1

**Tab. 4.1: caratteristiche del primo contatore in prova.**

Il secondo contatore in esame è il modello PO.SH -GM/RP costruito dalla "ICA srl" (fig. 4.2).



**Fig. 4.2: il secondo contatore testato.**

Si tratta di un contatore a getto ripartito, più comunemente noto come getto multiplo, provvisto di una camera di misura (distributore in resina sintetica antincrostante, inserito all'interno della cassa) avente una doppia serie di fori tangenziali ed equidistanti.

La turbina, all'interno del distributore, viene colpita da più getti di acqua e ruota in perfetto equilibrio assicurando nel tempo le prestazioni idrauliche iniziali. E' importante ricordare che i contatori a getto multiplo sono sicuramente i più affidabili non essendo minimamente influenzati dalle condizioni di esercizio a monte.

La lettura dei metri cubi avviene direttamente sui rulli numerati mentre per i sottomultipli si usano gli indicatori con le lancette a coltello. I rulli numerati sono contenuti in una capsula sigillata, riempita di liquido trasparente ed atossico, e non sono quindi in contatto con l'acqua erogata.

La trasmissione del movimento dai ruotismi immersi nell'acqua, ai rulli numerati è meccanica e la tenuta è garantita da uno speciale O-ring che funge da premistoppa a basso attrito.

Non è quindi influenzabile da elementi perturbatori esterni. La lettura dei consumi è sempre possibile anche se il contatore è impiegato con acque incrostanti o non perfettamente pulite.

Questo modello di contatore, può fornire prestazioni idrauliche sia secondo la classe B della Normativa CEE 75/33. L'ultimo contatore in esame, utilizzato nella rete idrica di Milano, è prodotto da "SENSUS METERING SYSTEM" modello "620 M", ed il suo principio di funzionamento è basato su un sistema a pistoni.



**Fig. 4.3: il terzo ed ultimo contatore in esame.**

Questo modello fornisce prestazioni idrauliche secondo la classe C della medesima Normativa.

#### **4.1.2 Contatore con $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$**

Il misuratore in esame è un Flowstar M (fig. 4.4) prodotto dalla Actaris; è un contatore di Classe C a getto con diametro nominale DN 80. Le sue prestazioni metrologiche superano le norme ISO/CEE di Classe C. Tale misuratore presenta una trasmissione magnetica diretta tra la turbina e l'orologeria senza alcun meccanismo intermedio nell'acqua misurata.

La struttura molto robusta e affidabile, in grado di sopportare la maggior parte dei tipi di ambiente d'acqua potabile. La facilità di lettura negli ambienti più umidi (es. tombini inondati) è garantita dal registro sigillato ermeticamente (scatola in rame / involucro in vetro minerale).



**Fig. 4.4: Flowstar M prodotto dalla Actaris.**

Il Flowstar M è dotato di una sfera sull'asse della turbina rotante, che aumenta la durata alle basse portate. Il bilanciamento idrodinamico e la

struttura della turbina offrono una buona resistenza alla portata di picco. Il principio di funzionamento del contatore è denominato "getto unico"; il flusso d'acqua è canalizzato da un iniettore di forma tronco-conica, che raddrizza il profilo del flusso prima di raggiungere la turbina. La sua ampia area di alesaggio impedisce l'eccessiva velocità del flusso dovuta a intasamenti.

Non necessita di un sistema di regolazione tramite by-pass; il movimento della turbina è trasmesso direttamente all'orologeria a quadrante asciutto, attraverso un accoppiamento magnetico senza alcun meccanismo intermedio immerso nell'acqua misurata. Nelle tabelle di seguito riportiamo le caratteristiche tecniche (tab. 4.5)

<i>Diametro nominale DN</i>	<i>80 mm - 3"</i>
<i>Flusso iniziale</i>	<i>50 l/h</i>
<i>Precisione 2% da *</i>	<i>180 l/h</i>
<i>Precisione 5% da *</i>	<i>120 l/h</i>
<i>Flusso massimo consentito (2 ore max)**</i>	<i>90 m<sup>3</sup>/h</i>
<i>Temperatura max per breve periodo</i>	<i>60 °C</i>
<i>Pressione max consentita</i>	<i>20 bar</i>

**Tab.4.2:caratteristiche del misuratore di portata.**

\* Valori medi

\*\*Senza conseguenze sulle prestazioni di precisione metrologiche (tab. 4.3) del misuratore in esame:

Classe di approvazione CEE/ISO	Classe C posizione orizzontale*
Portata nominale Q <sub>n</sub>	30 m <sup>3</sup> /h
Portata massima Q <sub>max</sub>	60 m <sup>3</sup> /h
Precisione 2% classe C Q <sub>t</sub>	450 l/h
Precisione 5% classe C Q <sub>min</sub>	180 l/h
Pressione di collaudo	32 bar
Temperatura massima	30 °C
Perdita di carico	0.6 bar
Intervallo di scala minimo	0.5 l
Intervallo indicativo	999999.99 m <sup>3</sup>
Certificato di approvazione CEE	F98.00.382.003.0 F97.00.382.004.0

**Tab. 4.3: caratteristiche metrologiche.**

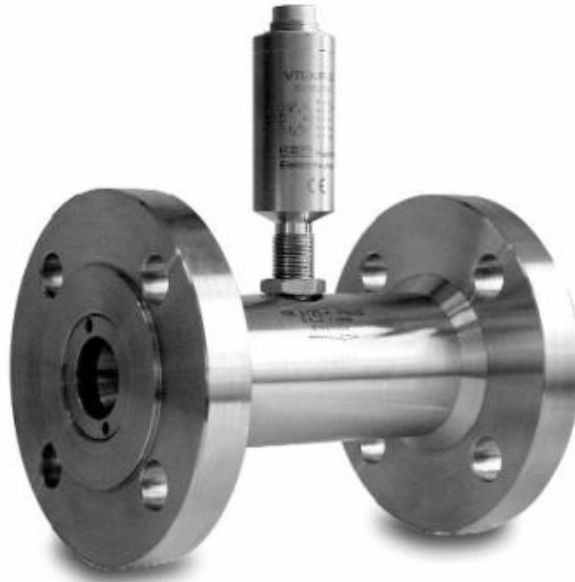
\* approvato in classe B in altre posizioni.

Il contatore deve essere installato in posizione orizzontale con il totalizzatore rivolto verso l'alto per prestazioni ottimali (Classe C posizione orizzontale).

## 4.2 Caratteristiche tecniche dei misuratori utilizzati come riferimento

### 4.2.1 Misuratore avente $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$

La tipologia dello strumento (fig. 4.5) è una turbina assiale con lettura in frequenza, prodotto da Koppers Elektromechnik GMBH modello Vorsicht HM 50F.



**Fig. 4.5: il misuratore campione.**

Questo tipo di strumenti viene utilizzato per effettuare misure di portata istantanea con elevata precisione in fluidi a bassa viscosità (acqua, benzina, gas liquefatti, fluidi farmaceutici, solventi e olio combustibile leggero). Il peso ridotto delle pale permette una veloce accelerazione del rotore da fermo fino a regime di rotazione nominale in un intervallo di tempo che va da 5 a 50 ms. Per questa ragione questo tipo di misuratori sono particolarmente adatti ad effettuare misure dinamiche; la risoluzione è di circa 35000 impulsi per litro. Può lavorare con temperature del fluido comprese tra  $-20$  e  $+120$  °C. La sezione lasciata libera dai supporti dei cuscinetti e dal rotore è di grandi dimensioni così da evitare l'ostruzione del passaggio o il bloccaggio del rotore in caso di contaminazione del fluido con piccole particelle solide. I principali dati tecnici sono riportati nella tabella 4.4.

Modello	Campo di misura L/min	K-factor medio* Impulse/litro	Frequenza* Hz	Segnale output mVss
HM 50	Da 70 a 1200	65	1400	Da 6 a 64

**Tab. 4.4: dati tecnici del misuratore.**

\*tutti i valori di K e del segnale output sono valori medi, gli impulsi vengono raddoppiati per viscosità oltre  $8 \text{ mm}^2/\text{s}$ .

Nella fig. 4.6, viene rappresentata la sezione del misuratore utilizzato, il principio di funzionamento è descritto nell'Appendice 2.

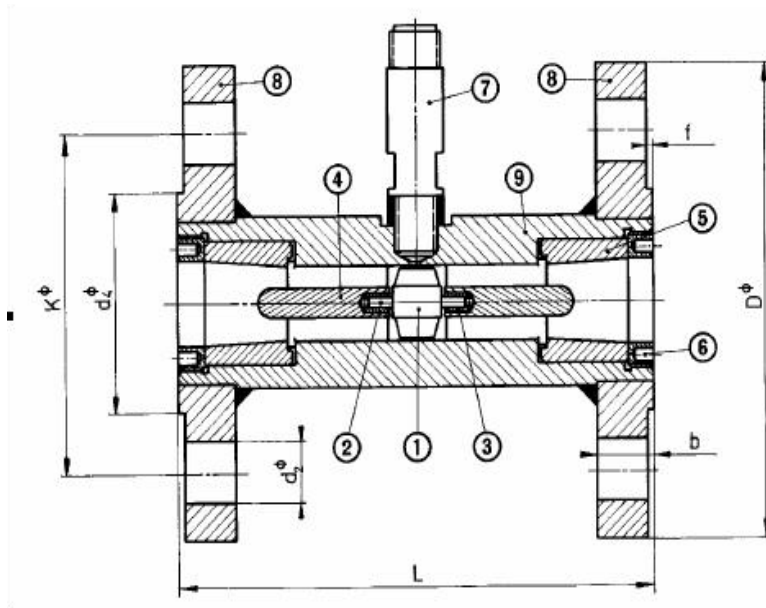


Fig. 4.6: 1 rotore, 2 albero, 3 cuscinetti, 4 condizionatore di flusso, 5 canalizzatore entrata, 6 guarnizione, 7 sensore, 8 flangie, 9 corpo principale.

Lo strumento di riferimento è stato tarato al centro SIT del Politecnico di Milano, i punti di taratura e le relative incertezze sono riportati nella tabella seguente.

N° del punto di taratura	Frequenza misurata $f_m$ [Hz]	Portata misurata $Q_m$ [l/s]	Portata campione $Q$ [l/s]	Correzione $C=Q-Q_m$ [l/s]	Correzione relativa $C/Q_m$	Incertezza estesa $U(C)$ [l/s]	Incertezza estesa relativa $U(C)/Q_m$
1	215.16	3.07	2.96	-0.11	-3.58%	0.01	0.33%
2	293.26	4.19	4.45	0.26	6.21%	0.02	0.48%
3	388.68	5.55	5.91	0.36	6.49%	0.03	0.54%
4	481.17	6.87	7.35	0.48	6.99%	0.03	0.44%
5	577.25	8.25	8.80	0.55	6.67%	0.07	0.48%
6	675.24	9.65	40.26	0.61	6.32%	0.06	0.62%
7	769.59	10.99	11.71	0.72	6.55%	0.04	0.36%
8	868.45	12.41	13.18	0.77	6.20%	0.06	0.48%
9	962.46	13.75	14.62	0.87	6.33%	0.09	0.65%
10	1059.38	15.13	16.11	0.98	6.48%	0.10	0.66%

Tab. 4.5: punti di taratura e relative incertezze.

Nella tabella  $Q_m$  rappresenta la portata dedotta ("misurata") dallo strumento in taratura mediante lettura dal frequenzimetro ad esso associato, tramite l'applicazione della formula  $Q_m = f_m / K$  (con  $K=70$ );  $C$  rappresenta la correzione da applicare a tale portata, mentre  $Q$  è la portata calcolata tramite la vasca campione. I valori della correzione  $C$  sono stati rilevati sulla base di 9 letture istantanee del valore di portata indicato dallo strumento in taratura, letture eseguite ad intervalli di tempo appropriati durante ogni singola misura della portata campione generata dall'impianto di prova. Per ognuna delle portate di taratura è stata eseguita una singola prova, ad eccezione del valore di portata di 15.13 l/s, per il quale sono state eseguite 3 serie di prove.

Le incertezze di misura, dichiarate in questa tabella, sono state determinate conformemente al documento EA-4/02, e sono espresse come incertezza estesa ottenuta moltiplicando il valore tipo per il fattore di copertura  $k$  (di norma vale 2) corrispondente a livello di fiducia di circa il 95%.

#### 4.2.2 Misuratore avente $Q_n < 16 \text{ m}^3/\text{h}$

Per la scelta del tipo di strumento da impiegare come riferimento, sono stati valutati misuratori di portata con principio di funzionamento diverso: a turbina di classe superiore al contatore da provare, volumetrico ad ingranaggi ed elettromagnetico.

Dopo un'attenta analisi comparativa tra i diversi possibili candidati, è stato scelto il misuratore di tipo elettromagnetico da usare come strumento di riferimento, dato che è l'unico in grado di misurare con opportuna incertezza le basse portate che si intendeva indagare, mantenendo semplicità d'installazione, basse perdite di carico ed un costo accettabile.

Il misuratore elettromagnetico (fig. 4.7) utilizzato è fornito dalla Ditta "ISOIL Industria s.p.a.", ed è composto dalla coppia sensore modello "MS 501" e dal convertitore/trasmittitore "ML 110" direttamente montato sul sensore.



**Fig. 4.7: il misuratore di portata elettromagnetico.**

Il sensore scelto ha diametro nominale del tubo di misura di 3 mm, che consente di misurare le portate nel campo tra 25 e 170 l/h di interesse per la prova, condizione essenziale affinché l'incertezza della misura si attesti sul  $\pm 0,4 \%$  con una ripetibilità migliore dello 0,2%.

I principali componenti che lo costituiscono sono gli attacchi filettati in acciaio inox AISI 304, i due elettrodi di misura in acciaio inox AISI 316L, il tubo con rivestimento interno in materiale isolante PTFE; la pressione massima di esercizio è di 16 bar e una temperatura massima del fluido di 100 °C.

Il convertitore a microprocessore, alimentato da rete elettrica 90 ÷ 265 Vac - 45/66 Hz, fornisce al sensore la corrente per la generazione del campo magnetico, provvede all'amplificazione e al condizionamento del segnale proveniente dagli elettrodi.

Inoltre permette la visualizzazione di tutti i parametri di misura, sia istantanei che totali, grazie al display digitale di 2 righe a 16 cifre. Il rivestimento è in materiale plastico Nylon PA66 rinforzato con fibra di vetro e la classe di protezione elettrica è IP65.

E' possibile modificare le varie costanti di calibrazione per effettuare misure sia in massa che in volume di fluidi con diversi pesi specifici ed indicare, qualora lo si desideri, solamente la misura della velocità del liquido.

### 4.3 I banchi prova "idraulici"

#### 4.3.1 Banco prova per contatori con $Q_n < 16 \text{ m}^3/\text{h}$

Questo banco di prova è stato assemblato, usando componenti di facile reperibilità sul mercato e normalmente usati nelle applicazioni industriali e domestiche.

In particolare sono utilizzate tubazioni, curve a gomito e raccordi in ferro zincato da 1/2" pollice di diametro, due riduzioni da 1/2" a 1/4" di pollice dello stesso materiale, due pezzi di tubo in gomma retinato; il tutto è stato collegato interponendo dei giri di Teflon tra le filettature per garantire la tenuta. Lo schema dell'impianto idraulico realizzato è realizzato in fig. 4.8.

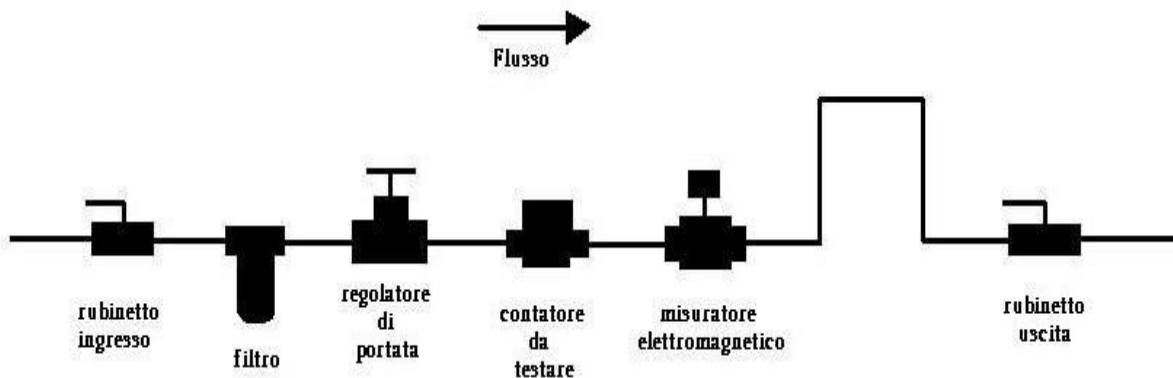


Fig. 4.8: schema del banco idraulico utilizzato per la prova.

Tutto il circuito idraulico viene alimentato da un rubinetto presente in laboratorio, attraverso un tratto di tubo in gomma.

Come primo componente è stato installato un filtro a retina, necessario per evitare l'ingresso di corpi estranei nei misuratori, seguito dal regolatore di portata munito di manometro, organo fondamentale per permettere la precisa regolazione del flusso, cosa impossibile da fare con normali rubinetti a sfera.

Si è posizionato, quindi, il contatore da tarare e poi il misuratore elettromagnetico usato come riferimento; quest'ordine è stato scelto poiché lo strumento di riferimento, dato il piccolo diametro del foro per il passaggio dell'acqua, introduce perdite di carico più elevate rispetto a quello da tarare.

Nell'installazione dei misuratori si è prestata particolare attenzione al rispetto delle lunghezze dei tratti minimi di tubazione rettilinea a monte e a valle richiesti da ogni tipo di strumento, in modo da evitare significativi disturbi al flusso.

A valle degli strumenti è stato posizionato un tratto di tubazione a forma di "collo d'oca", necessario per creare una certa contropressione e poter arrestare rapidamente il flusso d'acqua fra le varie misurazioni. Come ultimo organo viene montato un rubinetto a sfera, con lo scopo di impedire lo svuotamento dell'impianto, che provocherebbe il malfunzionamento dello strumento elettromagnetico. Lo scarico è stato posizionato nel lavabo per mezzo di un secondo tratto di tubazione in gomma.

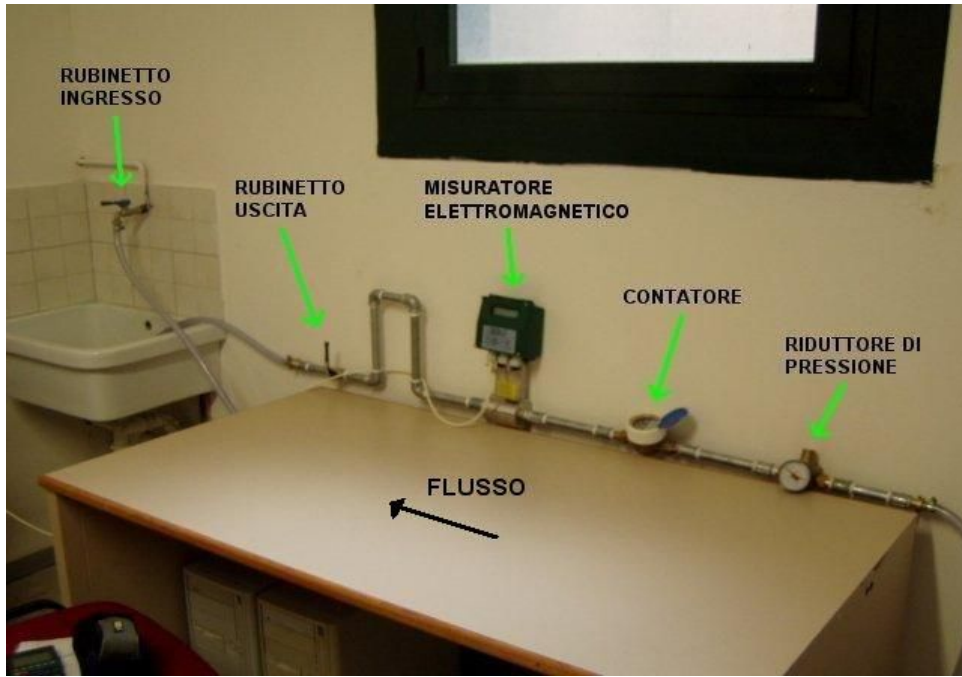


Fig. 4.9: foto del banco prova idraulico.

#### 4.3.2 Banco prova per contatori con $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$

##### A) Schema dell'impianto idraulico

Per effettuare le prove è necessario un impianto idraulico (fig. 4.10) con un range di portate che va da 4,8 a  $60 \text{ m}^3/\text{h}$ .

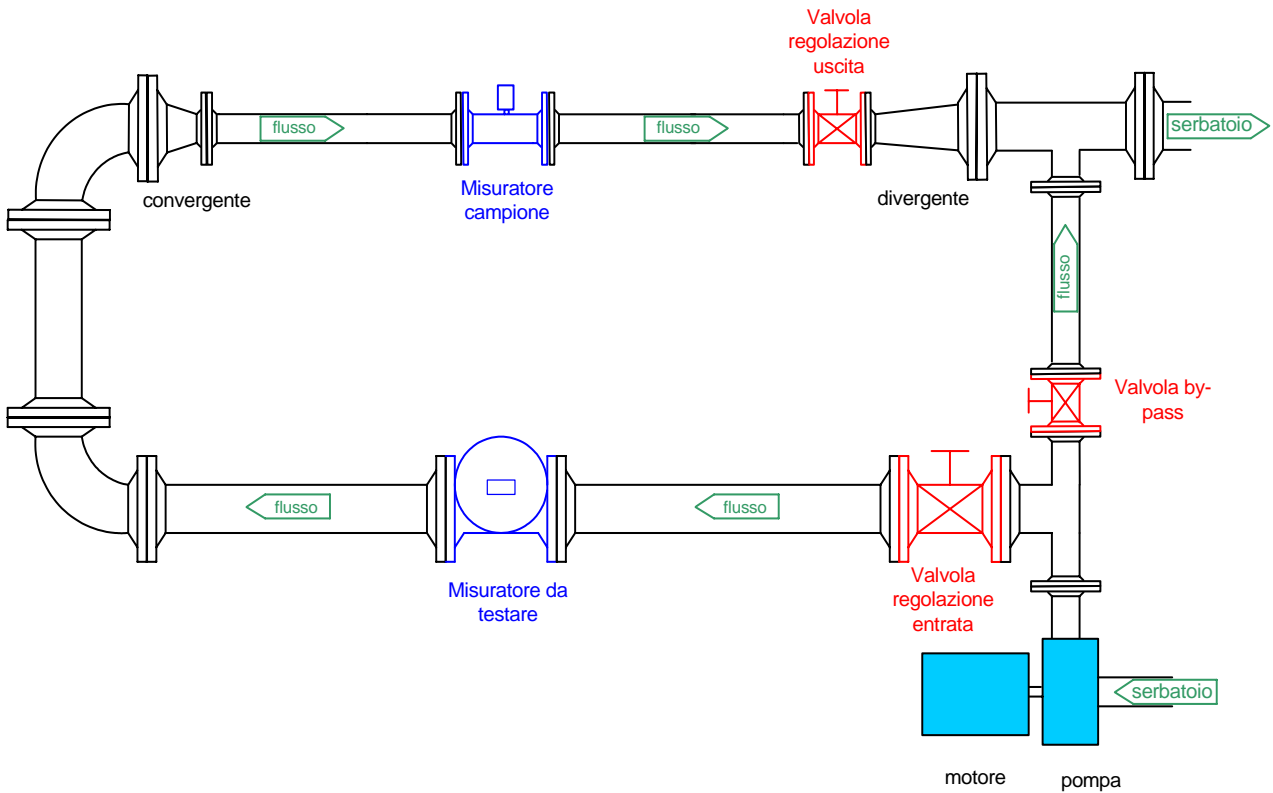


Fig. 4.10: schema dell'impianto idraulico in esame.



**Fig. 4.11: immagine dell'impianto utilizzato.**

La portata dell'impianto viene regolata mediante le valvole di entrata, di by-pass (fig. 4.12), e di uscita (fig. 4.13); è inoltre necessario agire sulla valvola di by-pass per evitare carichi eccessivi sia sulla pompa che sul tratto di tubatura che la divide dalla valvola di entrata. L'utilizzo dell'impianto con la valvola di by-pass chiusa a basse portate, causa pressioni elevatissime nel tratto di tubatura a valle della pompa, e il probabile rischio di danneggiare il motore.



**Fig. 4.12: valvola di regolazione entrata (destra) e valvola by-pass (sinistra).**



**Fig. 4.13: valvola di uscita e tratto divergente.**

Tale pompa è di tipo centrifugo (fig. 4.14), installata sotto battente, ed è trascinata da un motore elettrico trifase da 15 Kw, che permette di raggiungere portate superiori a 60 m<sup>3</sup>/h.



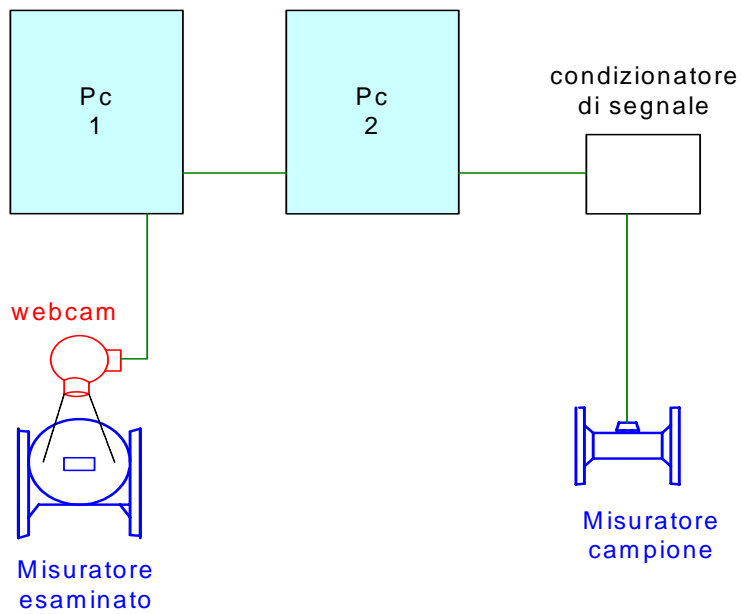
**Fig. 4.14: la pompa centrifuga e il motore.**

#### **B) Sistema lettura e memorizzazione dati**

Bisogna innanzi tutto evidenziare, che mentre dalla turbina di riferimento si legge la portata istantanea espressa in l/s, dal misuratore da testare è possibile leggere soltanto il totale della quantità di fluido passato attraverso lo strumento in m<sup>3</sup>. Risulta perciò necessario definire il tempo di durata del test ed effettuare le letture dello strumento in esame esattamente all'inizio ed alla fine di tale intervallo mentre vengono memorizzati i dati forniti dal misuratore campione; in condizioni ideali il valore di tali dati dovrebbe essere costante durante l'intervallo di prova, ciò risulta ovviamente impossibile in pratica, il che comporta la necessità di effettuare più letture con frequenza elevata per calcolarne il valor medio. Riassumendo, riportiamo i punti salienti del procedimento:

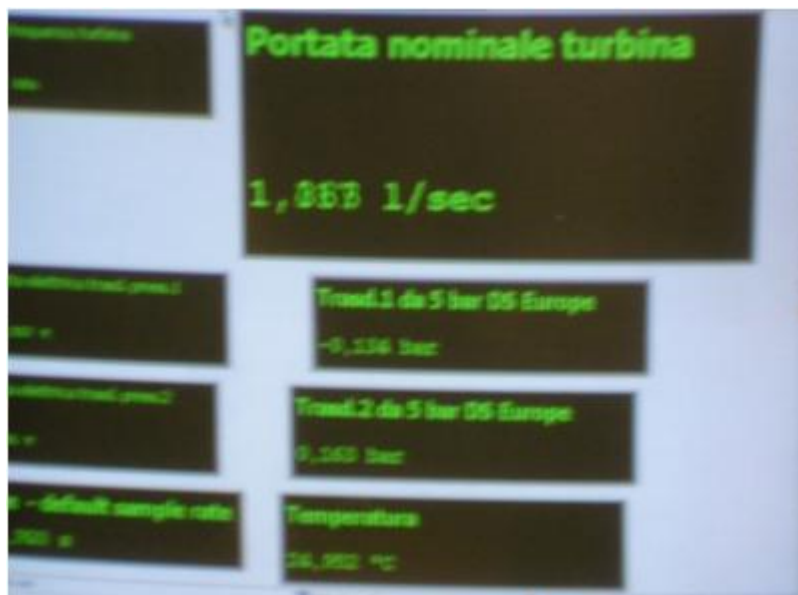
- si calcola la quantità di flusso misurata sottraendo il valore di lettura iniziale a quello finale (valore relativo al misuratore in prova).
- si calcola la quantità di flusso, facendo la media di tutti i valori provenienti dalla turbina di riferimento, e moltiplicando tale valore per l'intervallo di tempo di durata della prova. Questi dati verranno poi corretti mediante il certificato SIT relativo allo strumento campione.
- si traccia la curva di incertezza avendo a disposizione i valori misurati e reali nei punti previsti dalle normative.

È necessario, quindi, effettuare contemporaneamente due operazioni: lettura contatore Actaris e inizio-fine memorizzazione dal misuratore di riferimento; queste operazioni sono rese possibili dalla catena di misura (fig. 4.15) costituita da due computer, una webcam, software dedicato alla turbina campione e un programma Labview.



**Fig. 4.15: schema del sistema acquisizione dati.**

Nel PC 2 è installato il software dedicato alla turbina campione, che consente di visualizzare e memorizzare il valore della portata istantanea (fig. 4.16);



**Fig. 4.16: output del software dedicato alla visualizzazione dei dati provenienti dal misuratore di riferimento.**

mentre nel PC 1 viene utilizzato un programma sviluppato utilizzando Labview (fig. 4.17);



**Fig. 4.17: front panel del programma per acquisizione immagini.**

mediante l'uso di tale software viene inserita la durata (espressa in s) della prova. Una volta dato il via, un segnale (trigger) viene inviato al PC 2, che inizia a memorizzare i dati provenienti dalla turbina per tutta la durata del test. Il PC1 acquisisce l'immagine del display del misuratore in esame all'inizio ed alla fine della prova utilizzando una webcam (fig. 4.18).



**Fig. 4.18: la webcam posizionata sopra al display di lettura del misuratore.**

Con questo sistema si può incontrare difficoltà nella lettura delle immagini quando i valori del display non sono ben definiti, ossia intermedi. Per semplificare la lettura, vengono acquisite 5 immagini in rapida successione a inizio (fig. 4.19) e a fine prova (fig. 4.20); risulta così possibile leggere correttamente i valori.

La frequenza di acquisizione di tali immagini viene impostata nel programma; tale valore aumenta al crescere della portata misurata.



Fig. 4.19: immagini inizio prima prova (lettura:  $83.805 \text{ m}^3$ ).

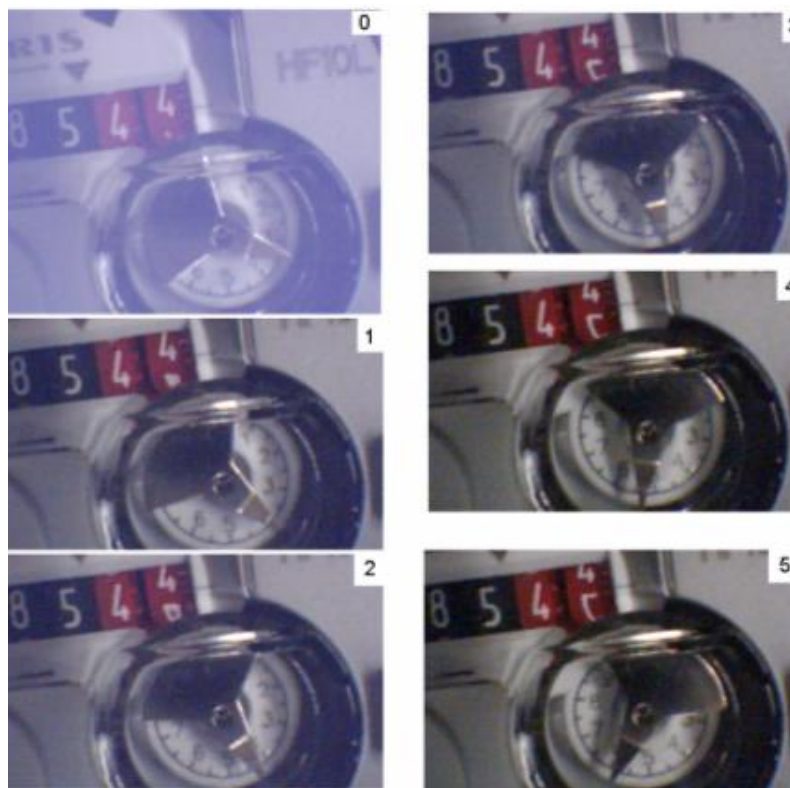


Fig. 4.20: immagini fine prima prova (lettura:  $85.443 \text{ m}^3$ ).

## 4.4 Il banco prova meccanico

### 4.4.1 Il banco prova per misuratore con $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$

Le attrezzature per effettuare il test a vibrazione sono le seguenti:

- ⇒ eccitatore elettrodinamico (shaker)
- ⇒ amplificatore shaker PA 1000L
- ⇒ accelerometro piezoelettrico
- ⇒ controller generatore di segnale
- ⇒ sistema di supporto del contatore

Lo schema di collegamento di tutte le attrezzature è illustrato in fig. 4.21. Il software del controller permette, inoltre, di verificare, che i valori di frequenza ed accelerazione impostati siano quelli realmente presenti sullo shaker, analizzando il segnale in uscita dall'accelerometro appositamente installato. Infatti, come si può notare dallo schema precedente, il controller genera un segnale diretto all'amplificatore e all'eccitatore elettrodinamico ed un altro in uscita dall'accelerometro passando per il condizionatore di segnale viene ricevuto dal computer. Il software controlla che al segnale emesso risponda effettivamente quello prodotto dall'accelerometro corrispondente ai valori di accelerazione e frequenza impostati; nel caso sia differente il calcolatore modifica opportunamente il segnale guida dello shaker.

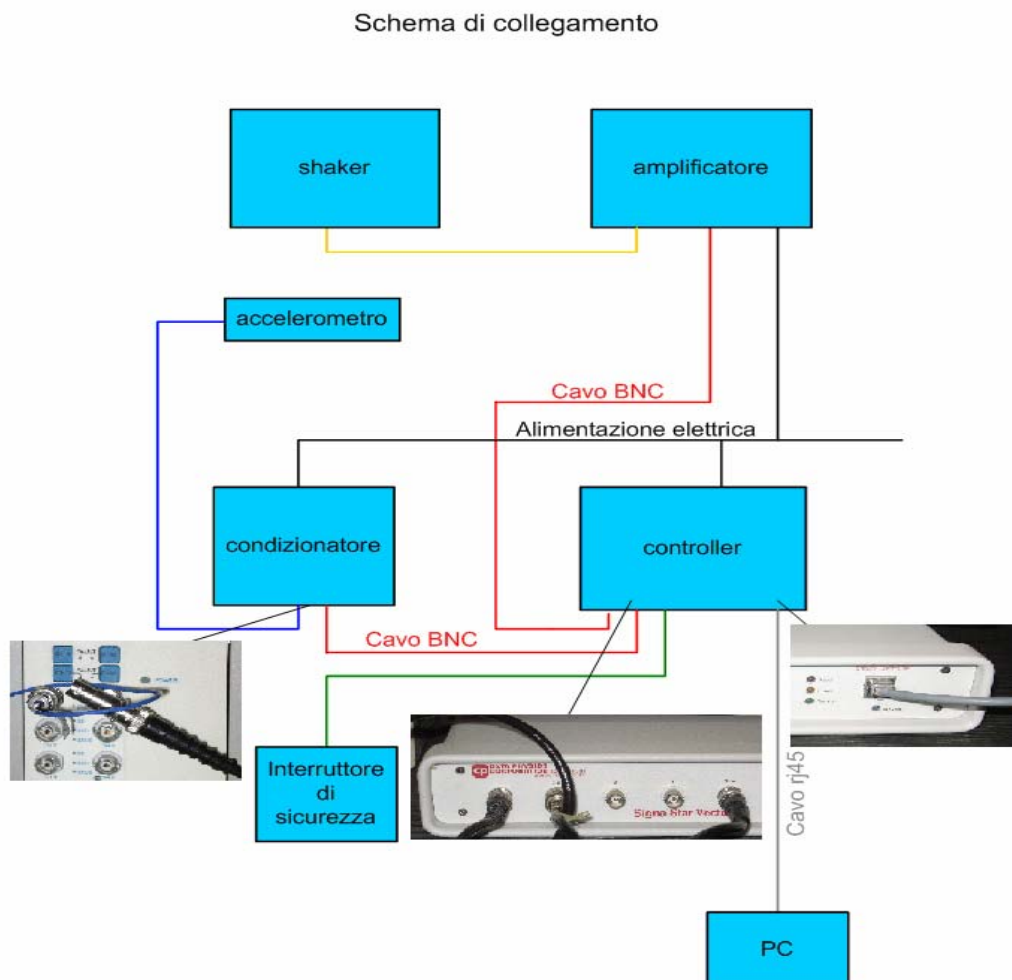


Fig. 4.21: allestimento per la prova a vibrazione.

L'interfaccia grafica permette di visualizzare e monitorare l'andamento della sollecitazione durante tutta la prova.

⇒ **Eccitatore elettrodinamico (shaker)**

Nell'ambito delle prove a vibrazione, è stato utilizzato un eccitatore elettrodinamico V650 prodotto dalla LDS. Questo shaker (fig. 4.22) è progettato per sviluppare una forza vettoriale sinusoidale fino a 2.200 N. Tale dispositivo può fornire vibrazioni con frequenza predefinita da 5 a 5.000 Hz ed è alimentato da un amplificatore di potenza fino a 2,5 kV·A, ed è in grado di supportare carichi verticali fino a 50 Kg, con possibilità di movimento completo.



**Fig. 4.22: lo shaker utilizzato.**

E' composto da una struttura magnetica che alloggia e supporta l'assemblaggio dell'armatura e le bobine di campo. Le bobine di campo e di armatura sono raffreddate ad aria attraverso un'apposita ventola di aspirazione separata dallo shaker. Sono presenti anche bobine di degauss per minimizzare i campi magnetici di dispersione dell'armatura sopra alla tavola. L'intero strumento poggia su quattro isolatori ad aria ed è equipaggiato con interruttore di fine corsa. L'eccitatore elettrodinamico, che fa vibrare il sistema, consiste in una struttura magnetica cilindrica in acciaio disegnata per sostenere meccanicamente e contenere il blocco armatura, le bobine di campo e di degauss. Il polo centrale e il piatto inferiore sono accoppiati rigidamente per mezzo di appositi bulloni, così da formare un unico pezzo, che si estende dalla parte inferiore dello shaker a quella superiore. Il cilindro del corpo e il piatto superiore completano la struttura magnetica.

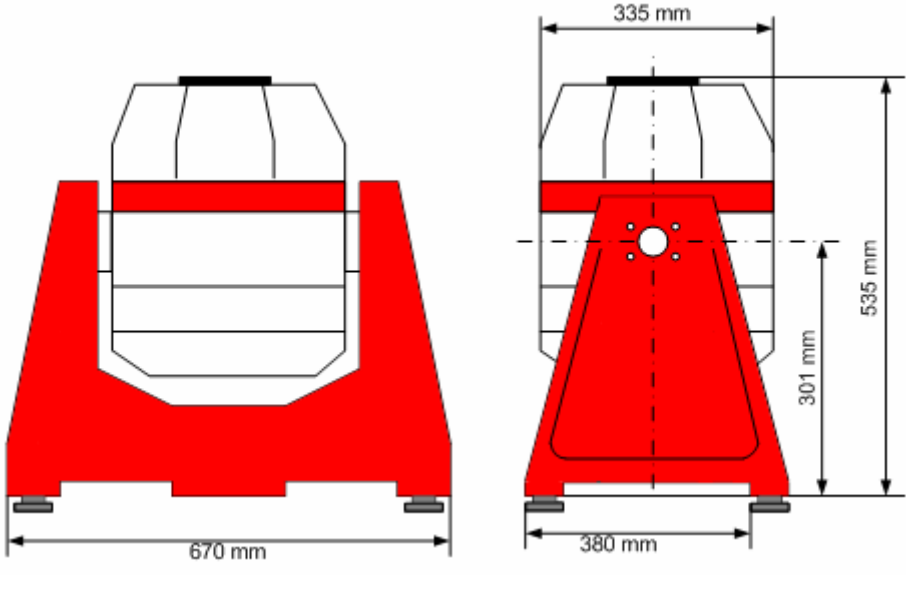
Il blocco armatura consiste in un avvolgimento cilindrico accoppiato ad una struttura radiale ricavata per fusione. La bobina viene collocata in un traferro anulare costituito dal piatto superiore e dal polo centrale. L'albero guida dell'armatura scorre assialmente su di un cuscinetto a sfere, fondamentale per limitare i movimenti laterali dell'armatura. Quattro rulli oscillanti su elementi flessibili in polipropilene assicurano la limitazione del movimento laterale e rotatorio dell'armatura, mentre due sospensioni in gomma assicurano la rigidità assiale.

L'armatura e il carico vengono sostenuti da un sistema di supporto ad aria compressa, con pressione a 5,58 bar (80 psi). Un regolatore di pressione controlla la posizione statica dell'armatura e questo, insieme all'indicatore, sono montati sulla struttura di sostegno.

Il sistema di supporto dello shaker permette di esercitare la forza

assiale verticalmente o orizzontalmente, cambiando in modo opportuno l'asse di vibrazione.

Nella tabella di seguito, vengono riportati alcuni dati dello shaker:

		
Diametro armature	156 mm	
Massa	189 kg	
Massima forza sinusoidale	1920 N	
Massima forza random	1090 N	
Frequenza di risonanza delle armature	3800 Hz	
Campo di frequenze	DC-5000 Hz	
Massa effettiva dell'elemento movente	2.24 kg	
Massima velocità (regime sinusoidale)	1.4 m/s	
Massima accelerazione (regime sinusoidale)	723 m/ s <sup>2</sup>	
Massima accelerazione (frequenze random)	486 m/ s <sup>2</sup>	
Modello di amplificatore	PA 1000L	
Spostamento massimo	25.4 mm	
Frequenza di risonanza del sistema	< 15 Hz	
Massimo peso sopportabile	50 kg	
Portata aria di raffreddamento	0.061 m <sup>3</sup> /s	
Portata aria di raffreddamento amplificatore	0.09 m <sup>3</sup> /s	
Pressione aria compressa (sospensioni)	5.5 bar	
Potenza elettrica assorbita (shaker)	3.11 kVA	
Potenza elettrica assorbita (amplificatore)	2.04 kVA	
Temperatura dell'ambiente di lavoro	0-30 °C	
Temperatura dell'ambiente di lavoro (amplificatore)	5-40 °C	
Rumore acustico emesso ad un metro di distanza	72 dBA	

**Tab. 4.6: dati principali dello shaker.**

L'amplificatore PA 1000L costruito con tecnologia MOSFET, per eliminare gli effetti di saturazione, è in grado di fornire prestazioni con basso rumore e basse distorsioni; possiede una protezione per le sovracorrenti che protegge sia l'amplificatore che lo shaker.

#### ⇒ **Accelerometro piezoelettrico**

Questi dispositivi sono i rilevatori d'accelerazione più diffusi poiché presentano:

1. Buona linearità.
2. Peso ridotto (talvolta minore di 1 grammo).
3. Ampia gamma dinamica (160 dB).
4. Ampia gamma di frequenza (da 0,2 Hz a oltre 10 kHz).
5. Robustezza e semplicità di progetto (alcuni sopportano urti fino a 20.000 g).
6. Alta resistenza agli agenti ambientali.
7. Bassa sensibilità trasversale.
8. Semplice metodo di montaggio.

L'accelerometro utilizzato per la prova a vibrazione è il modello 623C11 prodotto dalla PCB, del quale riportiamo le principali caratteristiche nella tab. 4.8.

<b>prestazioni</b>	
Sensibilità ( $\pm 5\%$ )	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )
Campo di misura	$\pm 490$ m/s <sup>2</sup>
Campo di frequenze ( $\pm 5\%$ )	2.4 - 8000 Hz
Campo di frequenze ( $\pm 10\%$ )	1.7 - 10,000 Hz
Campo di frequenze ( $\pm 3$ dB)	0.8 - 15,000 Hz
Frequenza di risonanza	40 kHz
Risoluzione (1 - 10,000 Hz)	981 $\mu$ m/s <sup>2</sup>
Linearità	$\pm 1\%$
Sensibilità trasversale	$\leq 5\%$
<b>Ambiente di misura</b>	
Limite di sovraccarico (Shock)	49,050 m/s <sup>2</sup>
Campo di temperature	Da -54 a +121 °C
Isolamento elettrico	IP68

**Tab. 4.8: caratteristiche dell'accelerometro PCB 623C11.**

#### ⇒ controller

Il dispositivo utilizzato è il Signalstar Vector (fig. 4.23) prodotto dalla Data Physics Corporation, che comprende il Data Physics DSPcentric ABACUS, hardware in un sistema modulare e espansibile; fornisce la possibilità di completo controllo della vibrazione con potenti caratteristiche di analisi.



**Fig. 4.23: il controller utilizzato.**

Il sistema di controllo di vibrazione SignalStar Vector soddisfa tutti i modi di prova di vibrazione: casuale, sinusoidale, ricerca di risonanza, scossa classica, SRS, transitorio, modello misto e analisi FFT.

#### ⇒ Condizionatore di segnale

Come già accennato, il condizionatore di segnale è uno strumento che può assolvere svariate funzioni. Può, infatti, operare come elemento convertitore di variabile (ad esempio, per mezzo dell'integrazione

permette il passaggio dall'accelerazione alla velocità e/o dalla velocità allo spostamento), come elemento manipolatore di variabili (opera un'elaborazione del segnale per ottenerne una forma che consenta una più efficiente trasmissione o per amplificarne il livello) e/o come filtro (il filtro permette il passaggio solo di certe componenti in frequenza del segnale).

Il condizionatore di segnale utilizzato è il modello 441A42 (fig. 4.24) prodotto dalla PCB.



Fig. 4.24: condizionatore di segnale.

#### ⇒ Sistema di supporto del contatore

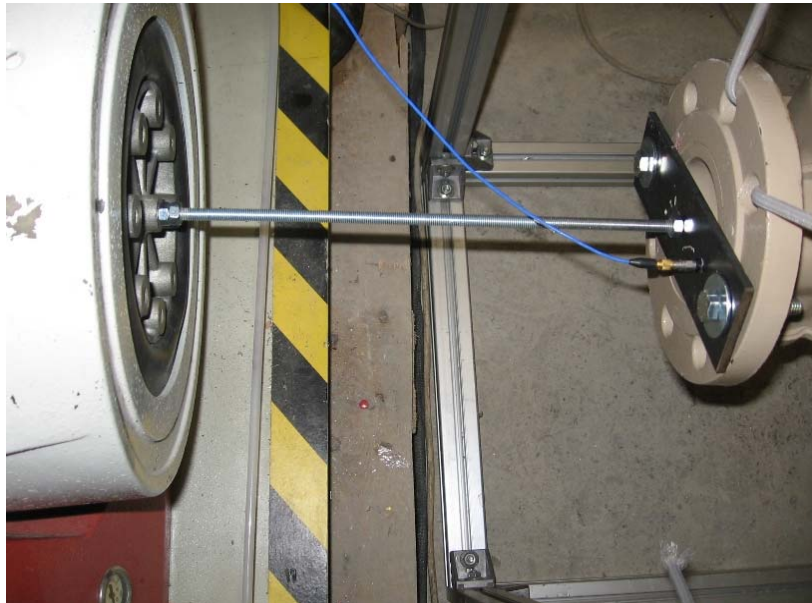
L'eccentricità del baricentro del contatore e la sua massa considerevole, non hanno permesso di posizionarlo direttamente sulla testa dell'eccitatore elettrodinamico; ciò è stato fatto per evitare il danneggiamento della bobina mobile dello shaker, causato da sollecitazioni eccessive dovute al momento flettente. Il misuratore viene, così vincolato ad una struttura mediante delle corde elastiche (fig. 4.25) e poi sollecitato in direzione orizzontale.

Utilizzando tale struttura, il peso del misuratore va a scaricarsi completamente attraverso le corde elastiche, sulla struttura in alluminio, mentre il sollecitatore elettrodinamico è soggetto soltanto alle forze di inerzia dovute alla massa del contatore stesso.



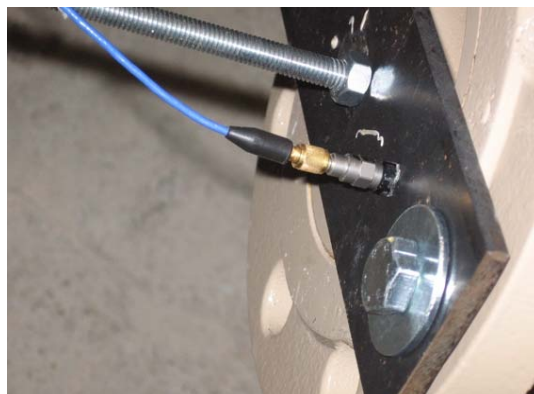
Fig. 4.25: sistema di supporto del misuratore.

Una barra filettata trasmette la vibrazione della parte vibrante dello shaker al misuratore; tale barra è vincolata mediante una piastra al contatore (fig. 4.26).



**Fig. 4.26: collegamento shaker-contatore.**

Il livello di accelerazione viene rilevato sulla piastra di collegamento come illustrato nella figura seguente.



**Fig. 4.27: posizionamento dell'accelerometro.**

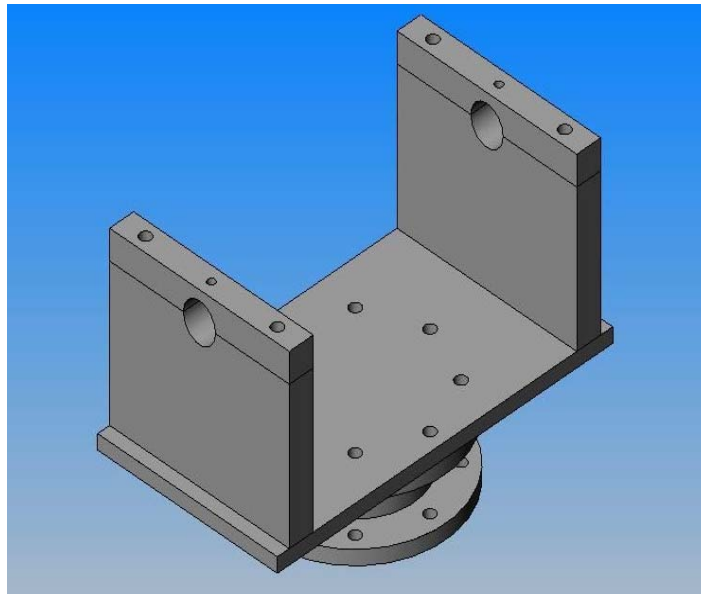
#### **4.4.2 Il banco prova per misuratore con $Q_n < 16 \text{ m}^3/\text{h}$**

I principali componenti del banco prova "meccanico" (fig. 4.28) sono l'eccitatore elettrodinamico ed il supporto del contatore.



**Fig. 4.28: il banco prova meccanico.**

Tale supporto è stato realizzato (fig. 4.29) da un'officina meccanica su nostre specifiche, in acciaio FE360, e progettato in modo tale da sottoporre il contatore alle accelerazioni e agli spettri di carico previsti dalla Proposta di Direttiva sugli strumenti di misura; il contatore viene così vincolato rigidamente allo shaker.

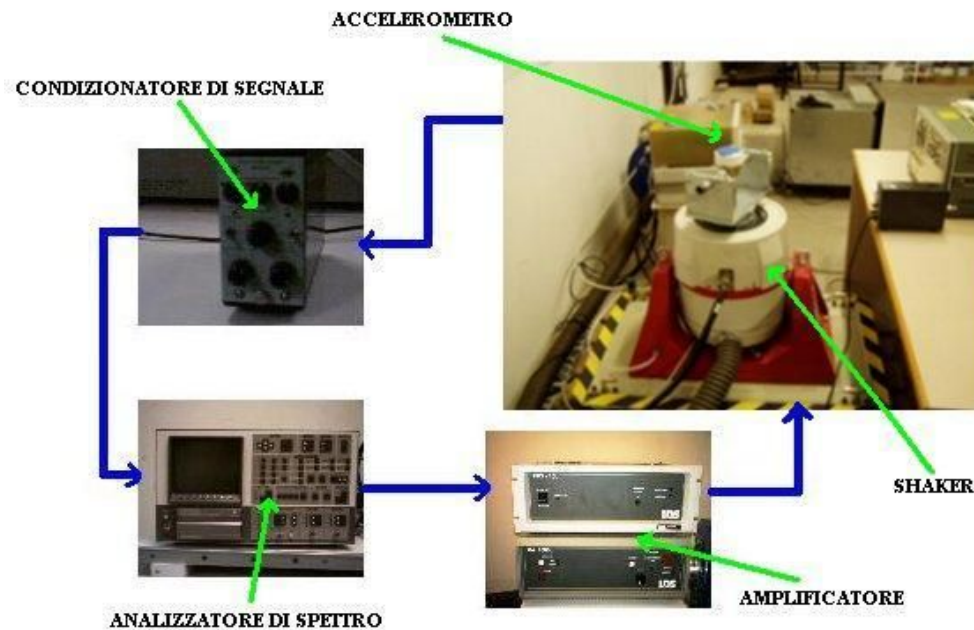


**Fig. 4.29: modello cad del supporto.**

La strumentazione per rilevare le vibrazioni comprende un trasduttore accelerometrico, un amplificatore di carica ed un analizzatore di spettro; quindi riassumendo, i componenti del banco ed i relativi strumenti utilizzati sono (fig. 4.30):

- Un eccitatore elettrodinamico LDS V650
- Un analizzatore di spettro Ono Sokki CF940 con generatore di segnale interno
- Un condizionatore di segnale B&K tipo 2635

- Un accelerometro B&K tipo 4375
- Un supporto in acciaio FE360



**Fig. 4.30: la catena di misura e il banco prova.**

L'allestimento della prova prevede di vincolare rigidamente, per mezzo del supporto in acciaio, il contatore allo shaker, in modo che lo spostamento, prodotto dallo shaker, avvenga lungo la direzione assiale della turbina di misura. Il livello d'accelerazione misurazione è stato rilevato con un accelerometro piezoelettrico. Nel paragrafo seguente si riporta una breve descrizione dell'analizzatore di spettro, che non è stato citato precedentemente.

⇒ **Analizzatore di spettro (Ono Sokki CF940)**

L'Ono Sokki è lo strumento della catena di misura che svolge l'importante funzione di convertitore del segnale da analogico a digitale (DAC), e le funzioni di analisi del segnale come: visualizzazione della forma d'onda nel tempo, involuppo nel tempo, i filtri digitali, le analisi standard della FFT (visualizzazione parte reale, immaginaria, fase e modulo della FRF, autospettro, crosspettro e funzioni di coerenza).



**Fig. 4.31: Ono sokki.**

## CAPITOLO 5

### ESECUZIONE DELLE PROVE DI QUALIFICA MECCANICA SU MISURATORI DI PORTATA

#### Introduzione

Nel presente capitolo vengono descritte le modalità di qualifica meccanica dei misuratori di portata, con cui sono state eseguite le prove, il loro svolgimento ed i risultati ottenuti.

I test in laboratorio sono stati effettuati utilizzando le strumentazioni citate nel precedente capitolo e sono consistiti in tre fasi distinte, ciascuna rivolta ad uno specifico scopo:

1. Una prima taratura idraulica, eseguita usando l'apposito banco prova, avente l'obiettivo di rilevare la corrispondenza del contatore da testare alla Normativa soddisfatta in sede di omologazione dello stesso e di rilevare i volumi d'acqua dispersi, cioè quelli transitati ma non conteggiati dal misuratore.

2. Una prova di vibrazione, effettuata con il banco "meccanico", consistente nel sottoporre il contatore ai cicli di prova stabiliti dalla "Proposta di Direttiva del Parlamento Europeo" sugli strumenti di misura relativa all'Ambiente Meccanico.

3. Una seconda taratura idraulica, svolta come la prima, con lo scopo di rilevare eventuali perdite di prestazioni metrologiche imputabili ai cicli di vibrazioni, a cui il contatore è stato sottoposto nella prova precedente. Per i contatori con portata nominale inferiore a  $16 \text{ m}^3/\text{h}$ , è stata valutata l'accuratezza della misura per valori della portata compresi tra 25 e 170 l/h; per il contatore con portata nominale superiore a  $16 \text{ m}^3/\text{h}$  il range di interesse varia da 4,8 a  $60 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Verranno, inoltre, mostrate le mappe di sollecitazione sul vincolo tra condotta e contatore, e lo sviluppo del banco prova.

Questo banco utilizza uno shaker elettrodinamico (v. capitolo 4), per applicare il carico. Le mappe, come sarà mostrato in seguito, risentono dell'eccessivo moto della tubo dovuto al carico applicato, che rende la misura poco accurata; è stato utilizzato un tool (Motion compensation), presente nel software Delta Vision, per poter attenuare tale effetto dovuto al movimento.

#### 5.1 Prove su misuratori con $Q_n < 16 \text{ m}^3/\text{h}$

##### 5.1.1 Prima taratura idraulica

La prima taratura è stata eseguita usando il banco "idraulico" dopo aver messo a punto la seguente metodologia. Inizialmente è stato aperto sia il rubinetto di ingresso che quello di uscita e quindi, agendo sul regolatore, viene impostata una determinata portata, letta sul display del misuratore elettromagnetico sfruttando la funzione di misura istantanea.

Impostata la portata, si è fatto transitare attraverso l'impianto un certo volume d'acqua che è stato quantificato da entrambi gli strumenti. Confrontando il dato indicato dallo strumento elettromagnetico usato come riferimento, e quello indicato dal contatore da tarare, si è potuti


risalire alla misura del volume disperso, cioè al calcolo dell'errore commesso dal contatore. Tale errore è stato calcolato in percentuale usando la seguente formula:


$$\text{errore (\%)} = (\text{mis. da tarare} - \text{mis. di rif}) / (\text{mis. da tarare}) \quad (5.1)$$

Modificando l'apertura del regolatore si è ripetuta la prova con la stessa modalità alle altre portate, fino a coprire tutto il campo d'interesse per la prova.

Nella tab. 5.1 sono riportati i risultati ottenuti dalla prima prova idraulica dove è evidenziata con le due colorazioni la suddivisione delle zone di portata in base agli errori massimi tollerati, come richiesto per l'omologazione in Classe di precisione B e C della Normativa CEE 75/33.

Test N°	Portata	Errore misuratore PG	Errore misuratore AN	Errore misuratore MI
	Litri/ora	%	%	%
1	30	-17.7	-100	-25
2	35	-5	-100	-
3	40	0	-100	-21.82
4	45	6	-100	-
5	48	-	-100	-
6	50	-17.7	-100	-9.21
7	55	-	-100	-
8	60	-5	-100	-6.38
9	70	0	-52.8	-4.46
10	80	6	-10	-2.31
11	90	-1	-8	5.06
12	100	-5	-9.09	1.76
13	110	-6.32	-9	3.68
14	120	-8.57	-10	-5.26
15	126	-	5	-
16	130	5.26	0	-5.36
17	140	1.25	-7	-5.91
18	150	3.3333	-5.56	2.34
19	160	-0.44	-3	3.97
20	170	-1.25	4.17	4.07

 errore max tollerato = ± 5%

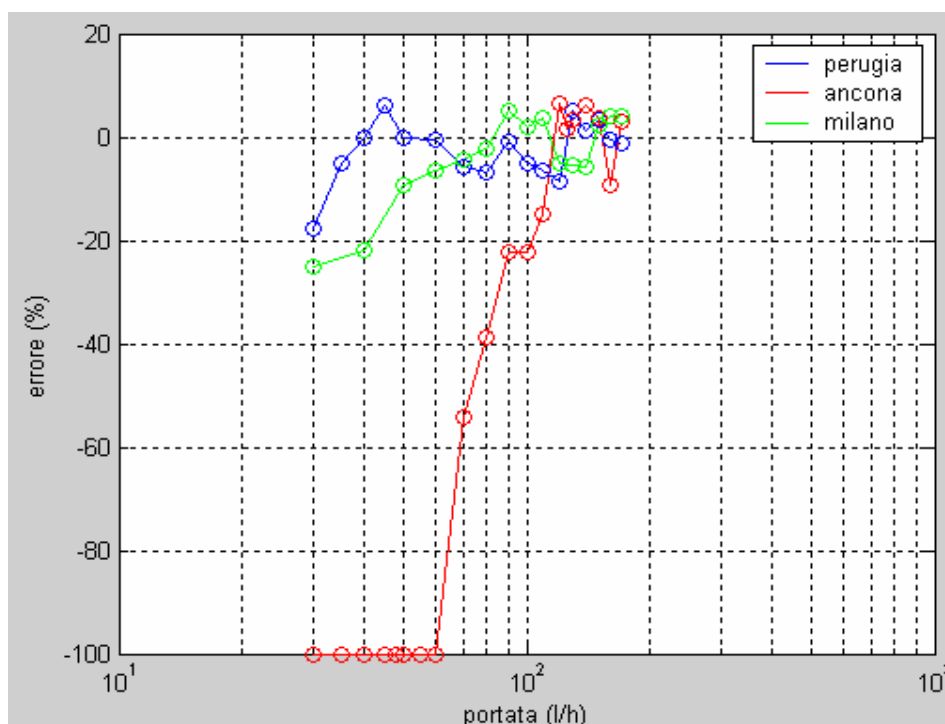
 errore max tollerato = ± 2%

Tab. 5.1: risultati ottenuti dalla prima taratura idraulica per i contatori in esame.

Dai valori dell'errore rilevati dopo la prima taratura (tab. 5.1) possiamo dedurre che:

- Gli errori di misurazione fatti dallo strumento in uso ad Ancona sono sempre maggiori del  $\pm 5\%$  per le portate comprese tra i 30 e i 110 l/h, mentre la Normativa prevede, per gli strumenti di classe B, errori inferiori al  $\pm 5\%$ . Risultano migliori invece le misurazioni effettuate dal contatore in uso a Perugia; l'errore, in molti casi, è al di sotto del  $\pm 5\%$ .
- Per le portate comprese tra 110 ai 170 l/h, per le quali la Normativa prevede che i misuratori di classe B abbiano un errore compreso tra  $\pm 2\%$ , il contatore in uso a Perugia rispetta ancora, nella maggior parte dei casi, i limiti imposti. Alle medesime portate il contatore in uso ad Ancona offre migliori prestazioni, rispetto alla zona del  $\pm 5\%$ , ma gli errori di misura non rientrano comunque nei limiti imposti dalla Normativa.
- Per quanto riguarda lo strumento in uso a Milano gli errori di misura commessi, dopo la prima taratura idraulica, sono quasi sempre al di sopra del  $\pm 2\%$ , mentre la Normativa prevede, per misuratori di portata appartenenti alla classe C, errori inferiori o uguali  $\pm 2\%$ .

Quanto detto può essere osservato in Fig. 5.1, dove è stato riportato il confronto tra le curve degli errori commessi dai contatori rilevati dalla prima taratura idraulica.



**Fig. 5.1: confronto tra le curve errore-portata dei contatori Perugia - Ancona - Milano prima del test di vibrazione.**

### 5.1.2 La prova di vibrazione

La prova di vibrazione è stata eseguita utilizzando il "banco meccanico" descritto nel capitolo precedente.

Dopo aver allestito il banco (Fig. 5.2), e la catena di misura per rilevare il livello d'accelerazione a cui viene sottoposto il contatore, si procede all'esecuzione della prova. Viene impostato il generatore di segnale, integrato nell'Ono Sokki, per generare uno sweep in frequenza

tra 10 e 150 Hz con ampiezza di accelerazione pari a  $10 \text{ m/s}^2$ , come stabilito dalla 'Proposta di Direttiva del Parlamento Europeo'. La prova si è ripetuta per venti cicli di scansione consecutiva, conformemente alla Normativa.




Fig. 5.2: il banco prova allestito.


### 5.1.3 Seconda taratura idraulica

La seconda taratura idraulica è stata effettuata dopo aver sottoposto il contatore alle prove di vibrazioni, con le stesse modalità della prima prova idraulica ed utilizzando il medesimo banco prova. Nella Tab. 5.2 sono riportati i risultati ottenuti. Come prima si individuano gli errori di misura massimi tollerati dalla Normativa dalle due zone colorate.

Test N°	Portata	Errore misuratore PG	Errore misuratore AN	Errore misuratore MI
	Litri/ora	%	%	%
1	30	-3.75	-100	-100
2	35	-4.74	-100	-
3	40	-2.5	-100	-97.06
4	45	-3.13	-100	-
5	48	-	-100	-
6	50	-9.86	-100	-38.33
7	55	-	-100	-
8	60	-0.67	-100	4.49
9	70	3.22	-54.29	14.6
10	80	-6.64	-38.75	1.48
11	90	-3.85	-22.22	0

12	100	1.43	-22.22	4.35
13	110	3.64	-15	1.03
14	120	-15	6.3636	4.31
15	126	-	1.6667	-
16	130	-1.25	3.3333	1.37
17	140	4	6.1538	4.51
18	150	5.45	3.5294	0
19	160	2.86	-9.2308	-9.47
20	170	10.91	3.0769	2.08

 errore max tollerato =  $\pm 5\%$

 errore max tollerato =  $\pm 2\%$

**Tab. 5.2: risultati ottenuti dalla seconda taratura idraulica per i contatori in esame.**

Dai dati rilevati dalla seconda taratura idraulica e riportati nella tabella 5.2, possiamo accorgerci come le prestazioni metrologiche di tutti e tre i misuratori siano peggiorate dopo la prova di vibrazione. In particolar modo possiamo osservare che:

- Le misurazioni fatte con lo strumento in uso a Perugia sono ancora accurate per le portate che vanno dai 30 ai 110 l/h; mentre, per valori compresi tra 120 e 170 l/h, si ha un netto peggioramento delle prestazioni rispetto alla prima taratura idraulica.
- Aumentano gli errori di misura dello strumento in uso ad Ancona per il quale, su quasi tutte le portate prese in esame, sono di gran lunga superiori a quelli imposti dalla Normativa per i contatori appartenenti alla classe B.
- Peggiorano le prestazioni del contatore in uso a Milano, su tutto il campo di misura.

Possiamo concludere dicendo che, per quello che riguarda le prestazioni metrologiche, il misuratore in uso a Perugia risulta essere complessivamente molto più preciso rispetto agli altri due, soprattutto per portate comprese tra i 30 e 120 l/h.

A conferma di quanto esposto si può osservare la Fig. 5.3 dove è stato riportato il confronto tra le curve errore-portata dei tre contatori relativi alla seconda taratura idraulica.

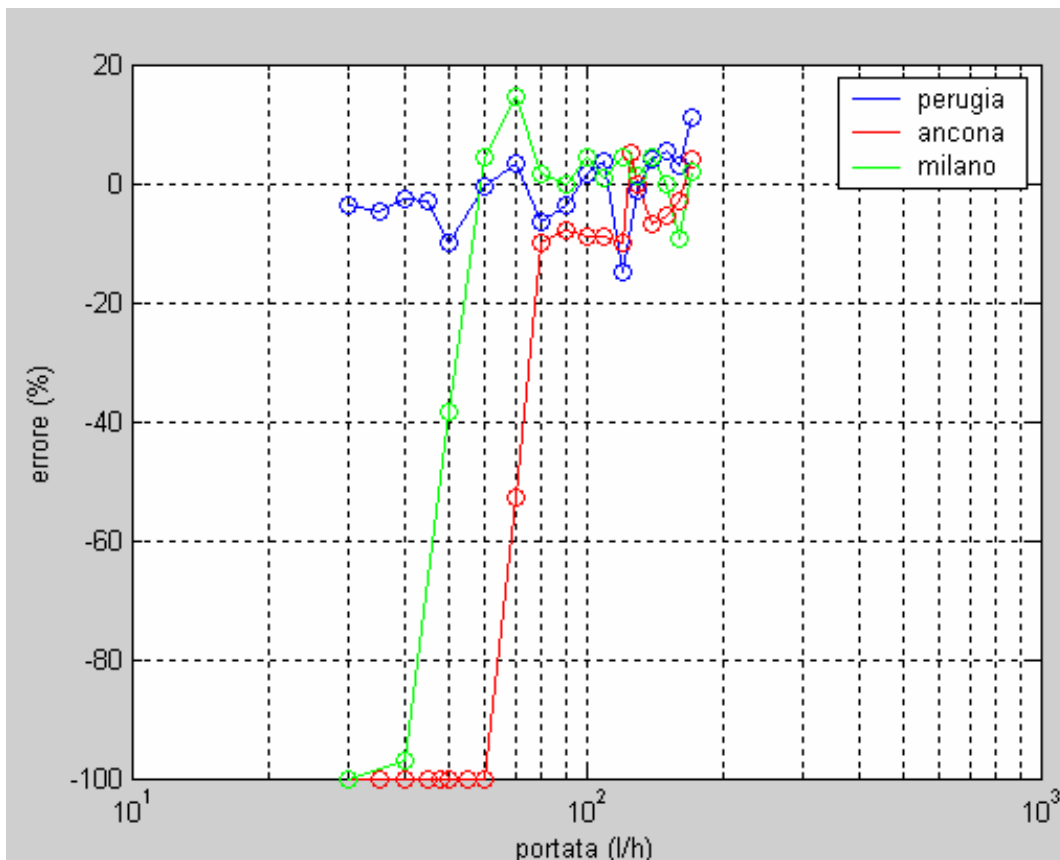


Fig. 5.3: confronto tra le curve errore-portata dei contatori Perugia - Ancona - Milano post - vibrazione.

#### 5.1.4 Valutazione del decadimento prestazionale dopo il ciclo di vibrazioni

A seguito delle prove effettuate sui contatori, si possono trarre le seguenti conclusioni:

1. Dopo aver sottoposto i contatori ai cicli di vibrazione previsti dalla "Proposta di Direttiva del Parlamento e del Consiglio", si nota come la struttura esterna e le filettature non abbiano riportato alcun danno.
2. Al contrario è rimasta danneggiata l'orologeria interna, infatti, nella seconda taratura idraulica, i contatori hanno presentato errori maggiori rispetto alla prima; ciò si può dedurre dall'esame dei valori degli errori commessi riportati nelle tabelle. Possiamo, quindi, affermare che esiste una certa sensibilità dei contatori agli urti e alle vibrazioni; perciò vanno prese le opportune precauzioni durante l'installazione degli stessi al fine di preservare le caratteristiche metrologiche. Nelle Fig. 5.4, 5 e 6, sotto riportate, sono state tracciate le curve degli errori commessi dai contatori testati, prima e dopo essere sottoposti ai cicli di vibrazione.

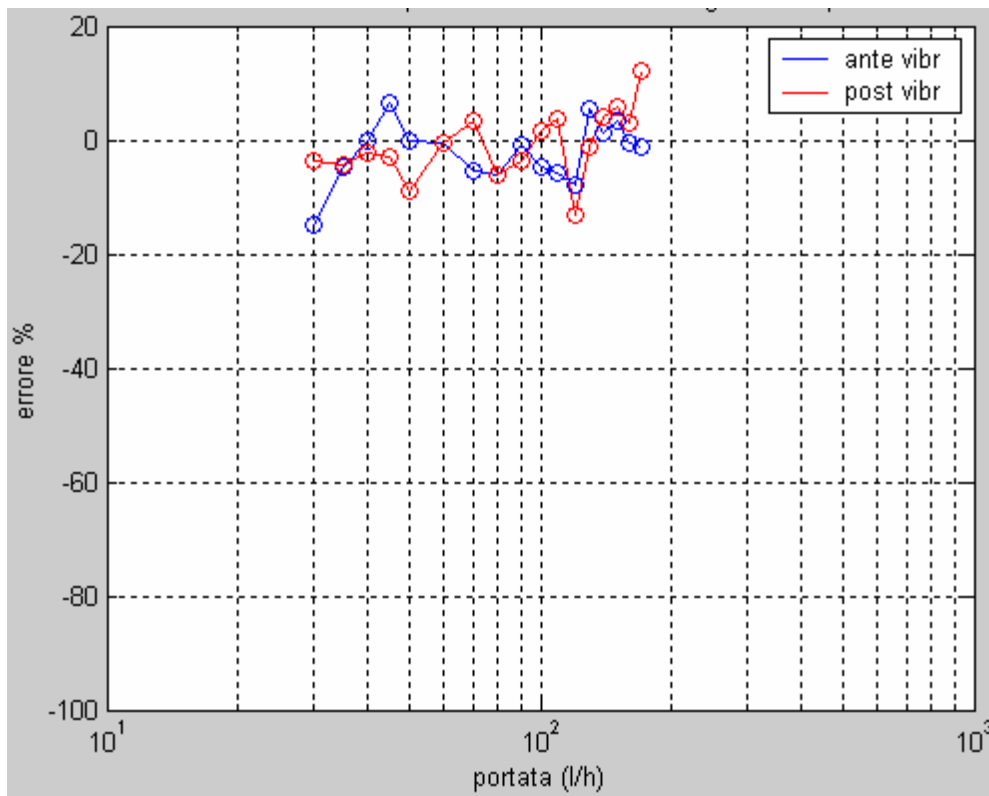


Fig. 5.4: confronto delle prestazioni ante e post vibrazione del contatore in uso a Perugia.

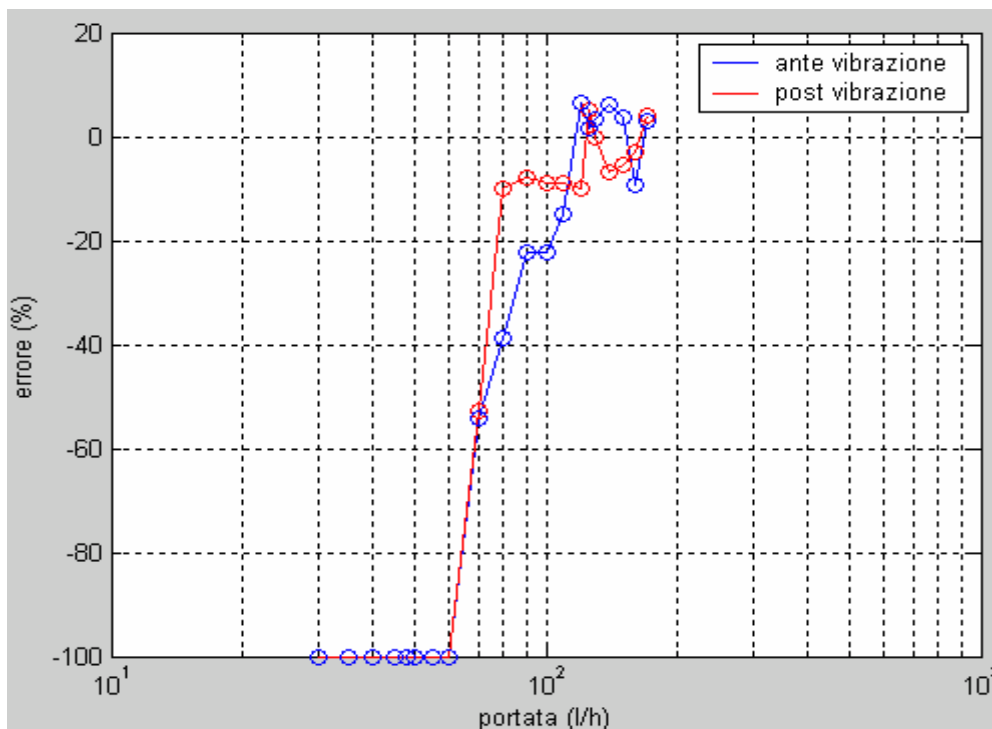


Fig. 5.5: confronto delle prestazioni ante e post vibrazione del contatore in uso ad Ancona.

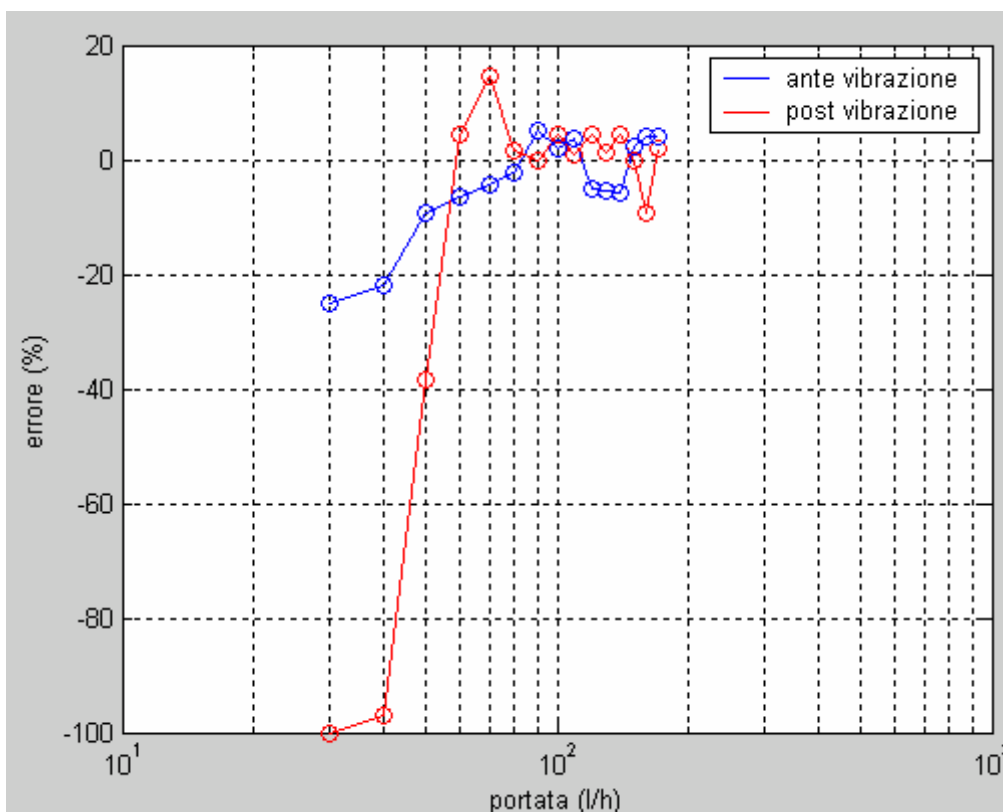


Fig. 5.6: confronto delle prestazioni ante e post vibrazione del contatore in uso a Milano.

In particolar modo si osserva che:

- Le misurazioni fatte dallo strumento di Ancona, prima e dopo la prova di vibrazione, non possono essere considerate soddisfacenti per uno strumento di classe B.
- Le prestazioni dello strumento in uso a Perugia sono accurate e rientrano perfettamente nei limiti imposti dalla Normativa per gli strumenti di classe B, prima, ma non dopo la prova di vibrazione. Un discorso a parte va fatto per il misuratore in uso a Milano, facente parte della classe C della Normativa (più accurata rispetto alla B), e per il quale erano attese le prestazioni migliori, tra i tre dispositivi testati. Al contrario gli errori di misura osservati sono di gran lunga superiori rispetto a quelli previsti dalla Normativa sia prima che dopo la prova di vibrazione. Possiamo affermare quindi che lo strumento testato non rientra nella classe di precisione C della Normativa.

## 5.2 Prove su misuratori con $Q_n > 16 \text{ m}^3/\text{h}$

### 5.2.1 Prima taratura idraulica

Le normative per le prove di taratura prescrivono, di effettuare la taratura alle portate indicate nella seconda e terza colonna riportate nella tab. 5.3 rispettivamente in  $\text{l/s}$  e  $\text{m}^3/\text{h}$ . Le stesse norme indicano, inoltre, come durata minima della prova il tempo necessario a far compiere al misuratore 200 scatti; la durata della prova dovrà, comunque, essere maggiore di 1 min.

Il misuratore in esame compie 200 scatti per una quantità di fluido di  $2 \text{ m}^3$ . Dividendo la quantità di flusso ( $2 \text{ m}^3$ ) per la portata prescritta

dalla normativa si trovano i tempi di durata della prova (ultime due colonne della tab. 5.3).

Le portate qui riportate non corrispondono a quelle indicate dalla MID nell'appendice 1, perché le prove sono state effettuate precedentemente all'emissione di tale normativa.

PROGRAMMA PROVE

Portate*	Q		m <sup>3</sup>	T	durata [s]
	l/s	m <sup>3</sup> /h			
Q1	1,33	4,8	2	25	1500,0
Q1 + (Q2- Q1)/3	1,60	5,76	2	20,83	1250,0
Q1 + (Q2-Q1)*2/3	1,87	6,72	2	17,86	1071,4
Q2	2,13	7,68	2	15,63	937,5
Q2 + (Q2 -Q1)/3	2,40	8,64	2	13,89	833,3
Q2 + (Q2 -Q1)2/3	2,67	9,6	2	12,5	750,0
(Q3-Q2)/2	5,60	20,16	2	5,95	357,1
Q3	13,33	48	2	2,5	150,0
(Q4 +Q3)/2	15,00	54	2	2,22	133,3
Q4	16,67	60	2	2	120,0

Tab. 5.3: dati relativi al programma delle prove.

I risultati della taratura sono riportati nella tab. 5.4:

N° del punto di taratura	Portata misurata Q <sub>m</sub> (l/s)	Portata campione Q (l/s)	Incertezza ((Q- Q <sub>m</sub> )/Q <sub>m</sub> )*100 (%)
1	1,43	1,41	-1,37
2	1,74	1,71	-1,56
3	2,05	2,00	-2,44
4	2,31	2,30	-0,62
5	2,56	2,53	-1,01
6	2,91	2,87	-1,10
7	6,13	5,96	-2,77
8	14,34	14,14	-1,39
9	15,88	15,95	0,40
10	16,45	17,84	8,48

Tab. 5.4: risultati della taratura ante vibrazione.

Le portate nella terza colonna (Q, tab. 5.4) mostrano il valor medio effettivo rilevato dalla turbina di riferimento; la portata riportata

nella tab. 5.8 è differente da quella indicata nelle normative, dovuto alla difficoltà di regolazione dell'impianto.

I valori della seconda colonna ( $Q_m$ ) sono quelli rilevati dal contatore flowstar, che sono calcolati, dividendo la quantità di flusso, rilevata direttamente dallo strumento per la durata della prova (il procedimento verrà spiegato più dettagliatamente nel paragrafo delle prove post sollecitazione meccanica).

Con le portate  $Q$  e gli errori  $((Q - Q_m)/Q_m) \cdot 100$  dell'ultima colonna viene tracciata la curva in fig. 5.9.

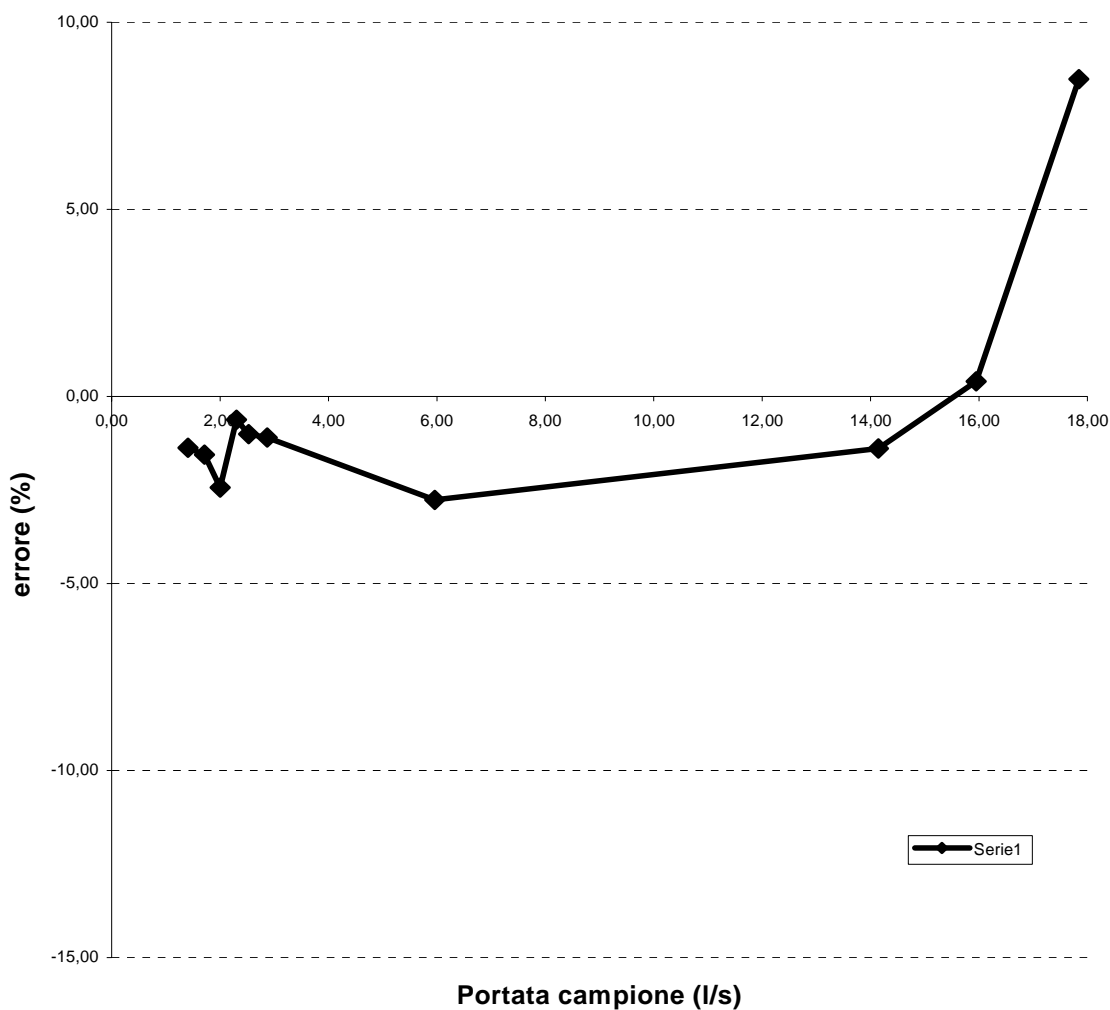


Fig. 5.7: la curva di taratura ante vibrazione.

### 5.2.2 La prova di vibrazione

La prova di vibrazione aleatoria (frequenza random) è appropriata, ai fini di valutare le condizioni, in cui il valore della grandezza d'influenza non è stabile. Il contatore viene sollecitato con una vibrazione aleatoria piuttosto che sinusoidale, perchè non si conoscono nè particolari frequenze di risonanza del dispositivo nè le frequenze alle quali sarà sottoposto il contatore in normale esercizio.

Di seguito viene riportata la tabella relativa alla prova di vibrazione aleatoria della Direttiva del parlamento europeo e del consiglio relativa agli strumenti di misura 15/09/2000 COM(2000)566 definitivo 2000/0233 (COD). La prova è stata effettuata con i valori relativi al livello di rigore 1.

Livello di rigore	1	2
Gamma di frequenze (Hz)	10-15	10-150
Livello RMS complessivo (m/s <sup>2</sup> )	1.6	7
Livello ASD 10-20 Hz (m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )	0.048	1
Livello ASD 20-150 Hz (dB/ottava)	-3	-3
Numero di assi	3	3
Durata per asse	Due minuti in ciascuna delle modalità funzionale o un periodo più lungo, se necessario, per portare a termine la misurazione	

**Tab. 5.5: livelli di vibrazione aleatoria.**

### 5.2.3 Seconda taratura idraulica

Il valore della portata media viene calcolato, con una procedura sviluppata in Matlab, dai valori istantanei registrati dal software dedicato alla turbina. Nella tabella 5.6 vengono riportate tutte le informazioni raccolte dalla seconda taratura.

n° punto di taratura	Portata media Campione Q (l/s)	Durata Prova (s)	Frame Acquisizione Immagini (ms)	Valore Iniziale flusso (m <sup>3</sup> )	Valore finale flusso (m <sup>3</sup> )	Delta m <sup>3</sup>	Portata Misurata Qm (l/s)
1	1,344368	1500	500	83,807	85,443	1,636	1,090667
2	1,646943	1250	500	86,355	88,171	1,816	1,4528
3	1,851273	1071	300	88,507	90,253	1,746	1,630252
4	2,034932	938	300	92,956	94,687	1,731	1,845416
5	2,433414	833	250	95,674	97,556	1,882	2,259304
6	2,646312	750	200	97,834	99,665	1,831	2,441333
7	5,682739	357	150	100,168	102,014	1,846	5,170868
8	13,4679	150	100	103,654	105,509	1,855	12,36667
9	15,11128	133	100	107,859	109,614	1,755	13,19549
10	17,03505	120	100	111,821	113,506	1,685	14,04167
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>

**Tab. 5.6: dati della taratura post-vibrazione.**

⇒ **Descrizione tabella 5.6:**

- colonna 2: le portate  $Q$  sono quelle calcolate con il programma in matlab.
- colonna 3: i tempi vengono calcolati dalle portate teoriche della tabella 5.3 imponendo 200 scatti del contatore ( $2 \text{ m}^3$ )  $T=2*1000/Q$ .
- colonna 4: l'intervallo di tempo fra l'acquisizione di un'immagine e la successiva (espresso in ms) viene definito in base all'esperienza; il tempo diminuisce (la frequenza aumenta) all'aumentare della portata.
- colonne 5 e 6: i valori in  $\text{m}^3$  vengono letti dalle immagini acquisite
- colonna 7: colonna 6 - colonna 5
- colonna 8: colonna 7\*1000 / colonna 3

N° del punto di taratura	Portata misurata $Q_m$ (l/s)	Portata campione $Q$ (l/s)	Errore $((Q - Q_m) / Q_m) * 100$ (%)
1	1,090667	1,344368	23,26112
2	1,4528	1,646943	13,36337
3	1,630252	1,851273	13,55747
4	1,845416	2,034932	10,26957
5	2,259304	2,433414	7,706369
6	2,441333	2,646312	8,396177
7	5,170868	5,682739	9,899124
8	12,36667	13,4679	8,904811
9	13,19549	15,11128	14,51855
10	14,04167	17,03505	21,31787

**Tab. 5.7: quadro riassuntivo della portate misurate e campione.**

Le portate nella terza colonna ( $Q$ , tab. 5.7) sono quelle medie effettive rilevate dalla turbina di riferimento; la differenza con quelle teoriche è dovuta alla difficoltà di regolazione dell'impianto.

I valori della seconda colonna ( $Q_m$ ) sono quelli rilevati dal contatore flowstar, che sono calcolati, dividendo la quantità di flusso rilevata direttamente dallo strumento per la durata della prova.

Con le portate  $Q$  e l'errore  $((Q - Q_m) / Q_m) * 100$  dell'ultima colonna viene tracciata la curva di taratura (fig. 5.10).

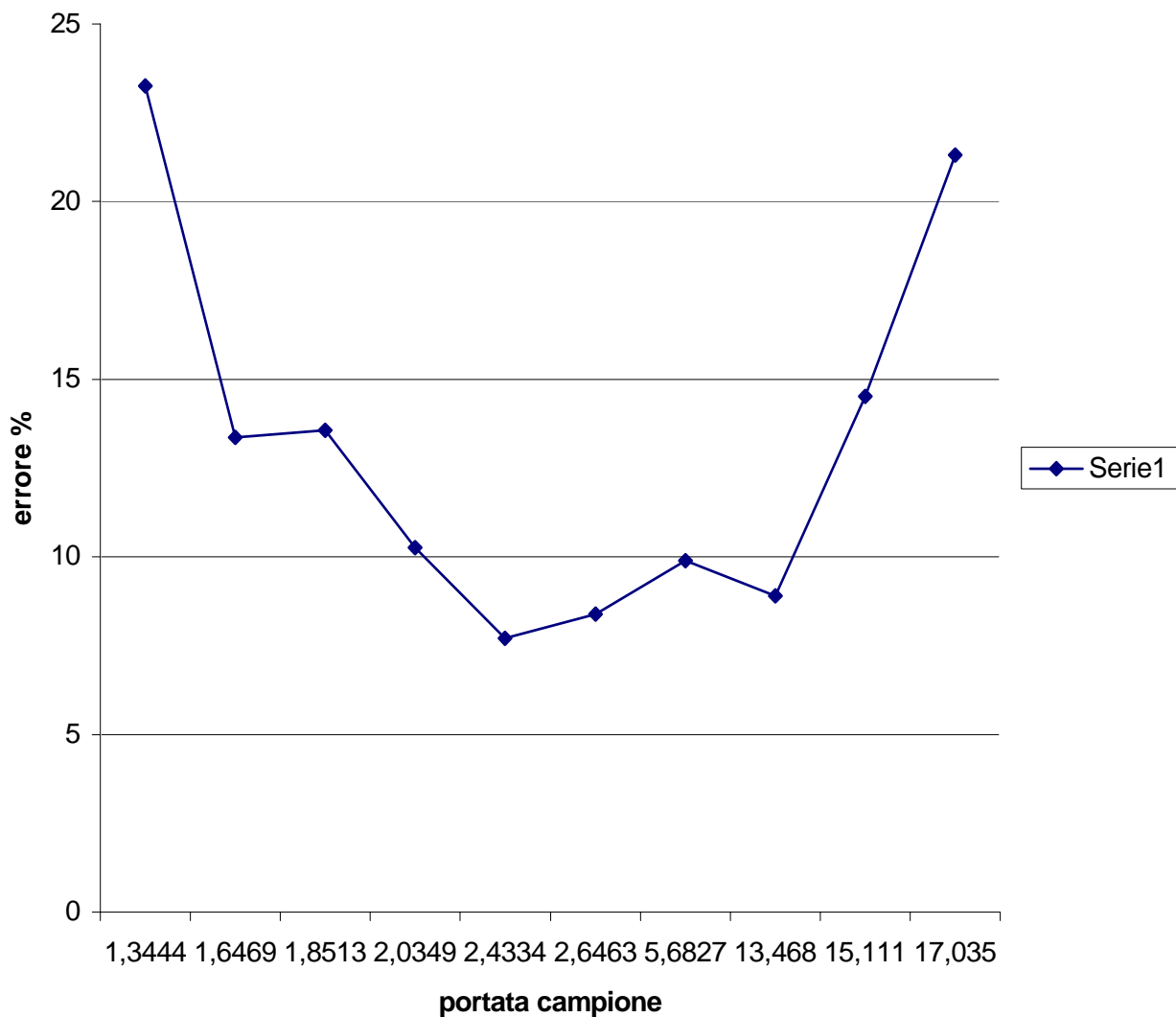


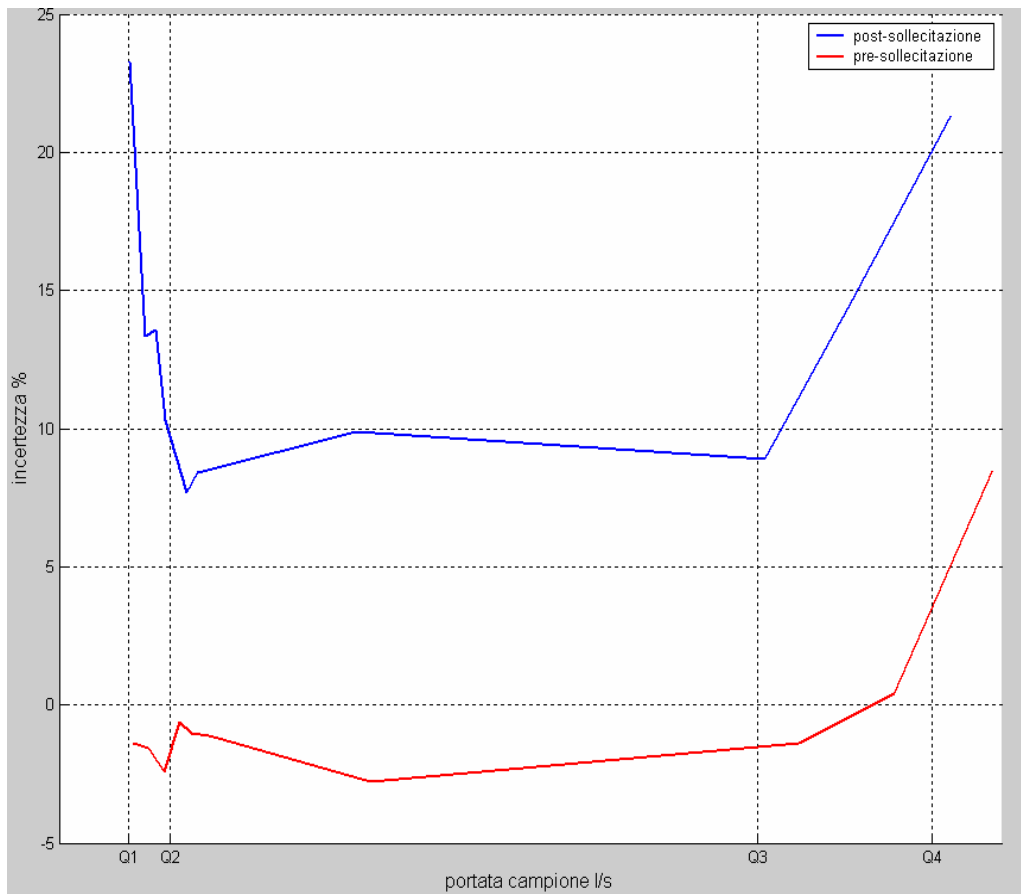
Fig. 5.8: curva dell'errore post-vibrazione.

#### 5.2.4 Considerazioni sull'effetto delle vibrazioni

Nonostante il livello di rigore 1, con il quale è stata effettuata la sollecitazione meccanica, la curva di taratura post vibrazione del contatore ha un errore maggiore (fig. 5.8) del 7% su tutto il campo di misura. Un'incertezza così elevata non è ammessa dalle normative, in particolare la MID prevede che l'errore sia minore del 5% nell'intervallo di portate fra  $Q_1$  e  $Q_2$  ed inferiore al 2% fra  $Q_2$  e  $Q_3$ .

Il contatore soddisfa tali requisiti, come dichiarato dal produttore, soltanto nella prova ante vibrazione (fig. 5.7); mentre nella prova post vibrazione l'incertezza risulta troppo elevata (maggiore del 10% su buona parte del campo di misura).

Questo misuratore risulta perciò inadatto a sopportare sollecitazioni meccaniche corrispondenti al livello di rigore 1.



**Fig. 5.9: confronto tra le curve di taratura.**

Si ricorda, inoltre, che l'inadeguatezza ad un livello di rigore 1 corrisponde all'impossibilità, di installare tale misuratore in ambienti meccanici di classe M2; la presente classe si applica a luoghi caratterizzati da livelli importanti o elevati di vibrazione ed urti (trasmessi, ad esempio, da macchine e dal passaggio di veicoli nelle vicinanze) come pure a luoghi adiacenti a macchine pesanti, nastri trasportatori ecc.

Si possono infine trarre le seguenti conclusioni:

1. Prima di essere sottoposto alle vibrazioni, il contatore testato, risponde perfettamente alla classe metrologica dichiarata dal costruttore per quanto riguarda gli errori massimi tollerati
2. Il contatore non ha sopportato il ciclo di vibrazioni indicate nella sezione Ambiente Meccanico della "Proposta di Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio" 2000/0233 (COD), relativa agli strumenti di misura; nonostante la struttura non abbia riportato alcun danno, così come la tenuta alla pressione dell'acqua è rimasta inalterata ed eventuali perdite scongiurate.

La turbina e l'orologeria con relativo accoppiamento magnetico hanno, invece riportato gravi danni.

Si reputa quindi opportuno indicare nei dati di targa del contatore, oltre alla classe metrologica (C), anche gli ambienti meccanici (M1) che consentono un corretto funzionamento dello strumento.

## 5.3 Analisi delle sollecitazioni agenti sul vincolo tra contatore e condotta mediante termoelasticità

### 5.3.1 La catena di misura

Il sistema è composto da uno shaker che sollecita l'oggetto in esame, controllato da un generatore di segnali che fornisce il segnale di riferimento al sistema termoelastico. La termocamera acquisisce nel tempo l'emissione IR dell'area del componente in esame. Un apposito software consente l'acquisizione e l'elaborazione dei dati forniti dalla termocamera.

I componenti della catena di misura (fig. 5.11) sono stati, ampiamente descritti nei capitoli precedenti, tranne il generatore di segnale.

- **Il generatore di segnale**

Il generatore di segnale utilizzato è un HM8030-6 della "HAMEG Instruments" (fig. 5.10).



Fig. 5.10: il generatore di segnale utilizzato per la prova.

Questo strumento è in grado di fornire in uscita vari tipi di segnali come sinusoidi, quadra, triangolare, impulsi, DC per varie applicazioni di produzione e assistenza tecnica, in un range che va da 0,05Hz a 10MHz. L'ampiezza del segnale è variabile con continuità fino ad un massimo di 20Vpp in uscita e la lettura della frequenza viene data da un display digitale a 5 digit con una risoluzione di 0.01mHz. Il valore di "Offset" è impostabile con continuità da +5V a -5V.

- **Specifiche tecniche dello strumento**

(Temperatura di riferimento: 23°C ± 2°C)

- **Modi di operazione:**

Forme d'onda: sinusoidi, quadra, triangolare, impulsi, continua.

Sweep interno: 1:100, da 20mS a 15S.

Modulazione FM esterna: 1:100, impedenza 6KOhm/25pF, ± 30V massimi.

- **Campo di Frequenza:**

Tutti i tipi di forme d'onda: da 0.05Hz a 10MHz in 8 passi.

Stabilità in frequenza: < 0.5%/ora o 0.8%/giorno in ambiente a temperatura costante.

• **Caratteristiche delle forme d'onda:**

Sinusoide: distorsione armonica max 0.5% (0.05Hz - 1MHz) / max 3% (1MHz - 10MHz).

Quadra: tempo di salita 15nS.

Overshoot: < 5% (quando l'uscita è terminata con 50 Ohm).

Triangolare: non linearità < 1% (fino a 100KHz).

• **Display Digitale:**

Frequenza: 5 digit, led a 7 segmenti ognuno da 8x5mm.

Risoluzione: 0.01mHz.

Precisione: fino a 5Hz  $\pm(1\% + 3 \text{ digit})$ , da 5Hz a 10MHz  $\pm(5 \times 10^{-5} + 1 \text{ digit})$

Indicazioni a led: per mHz, Hz, KHz e sec.

• **Segnali di uscita:**

Impedenza: 50 Ohm.

Tensione d'uscita: 10Vpp su 50 Ohm; 20Vpp a circuito aperto.

Tensione d'uscita impulsi: 5Vpp su 50 Ohm; 10Vpp a circuito aperto.

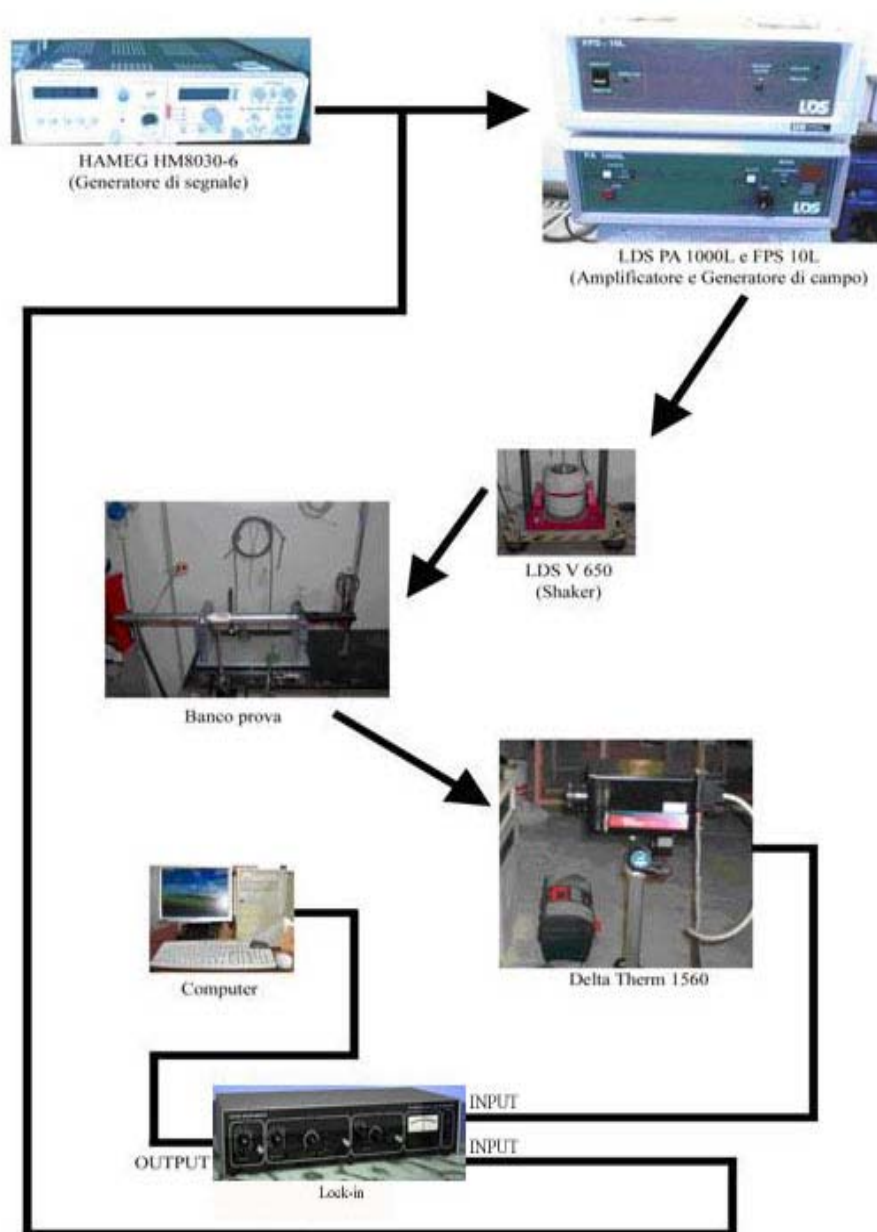
Attenuazione: max 60dB

Precisione d'ampiezza (sinusoide/triangolare): max 0.2dB (0.05Hz - 500KHz) / max 0.5dB (500KHz - 10MHz).

Offset DC: variabile con continuità.

Campo di Offset: max  $\pm 2.5V$  su 50Ohm, max  $\pm 5V$  a circuito aperto.

Uscita di trigger: + 5V/TTL compatibile, segnale ad onda quadra sincrono con il segnale di uscita.

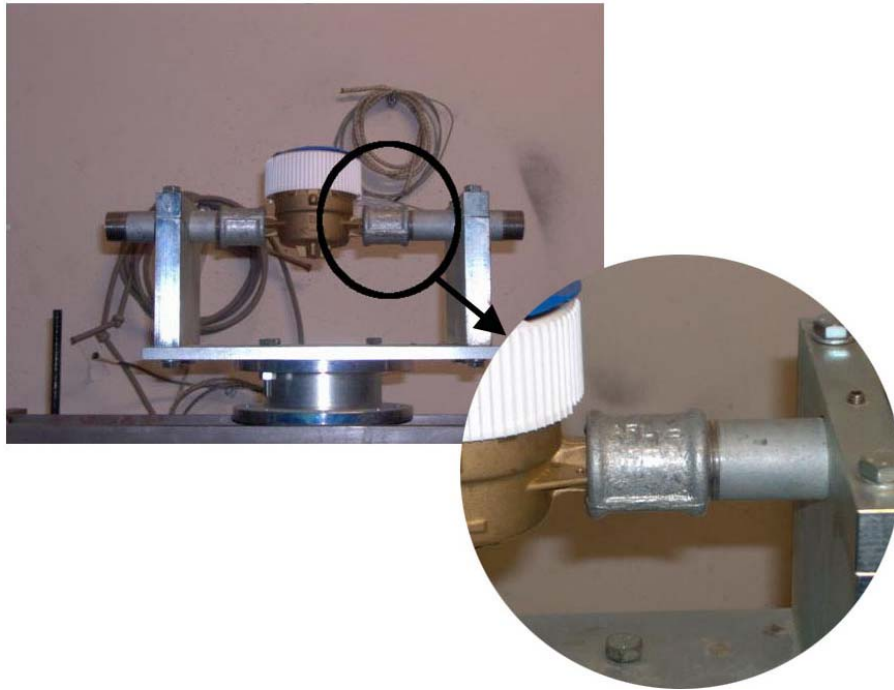


**Fig. 5.11: catena di misura.**

### 5.3.2 Sviluppo del banco prova e le mappe di stress

L'oggetto del nostro studio è il vincolo tra il contatore e la condotta (fig. 5.12); il banco è stato sviluppato con le seguenti finalità:

- vincolare opportunamente la tubazione con il contatore;
- consentire allo shaker di fornire un carico dinamico adeguato;
- garantire l'accesso ottico nella zona di interesse;



**Fig. 5.12: contatore di uso domestico e porzione di tubazione idraulica studiata.**

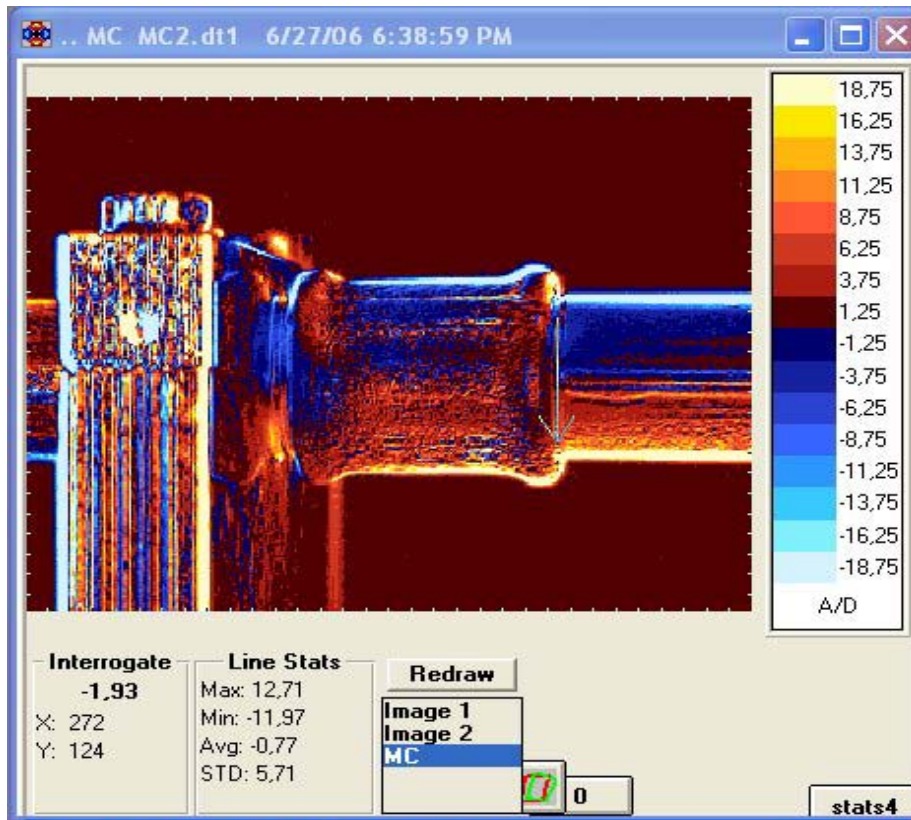
Poiché l'obiettivo del nostro lavoro è quello di analizzare le mappe di stress sulla superficie del vincolo, l'analisi è mirata soltanto su tale parte della condotta (fig. 5.12).

E' stata, perciò, sviluppata una prima configurazione del banco prova (fig. 5.13), in cui il tubo è stato vincolato rigidamente ad una struttura metallica e all'estremità opposta viene applicato il carico pulsante.

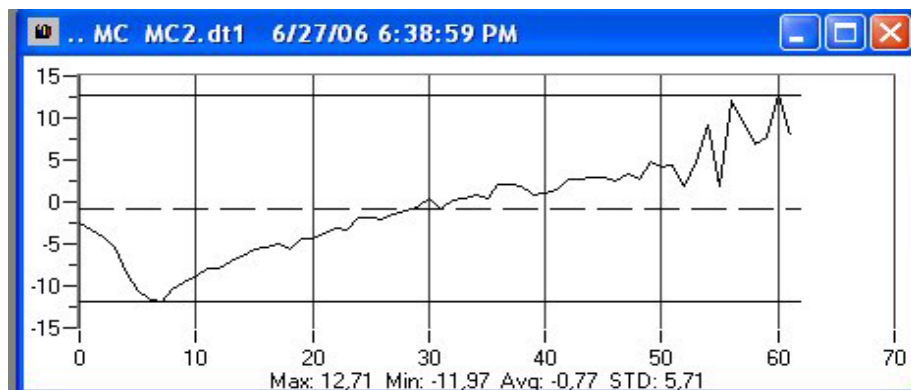


**Fig. 5.13: la prima configurazione del banco prova.**

La mappa termoelastica ottenuta con l'ausilio del Mo-Comp, risulta influenzata dal moto dovuto al carico applicato, come si nota dalla concentrazione fittizia di tensione sui bordi del tubo (fig. 5.14).



**Fig. 5.14a: campi di tensione agenti sul vincolo.**



**Fig. 5.14b: andamento della tensione lungo la linea tracciata sulla mappa.**

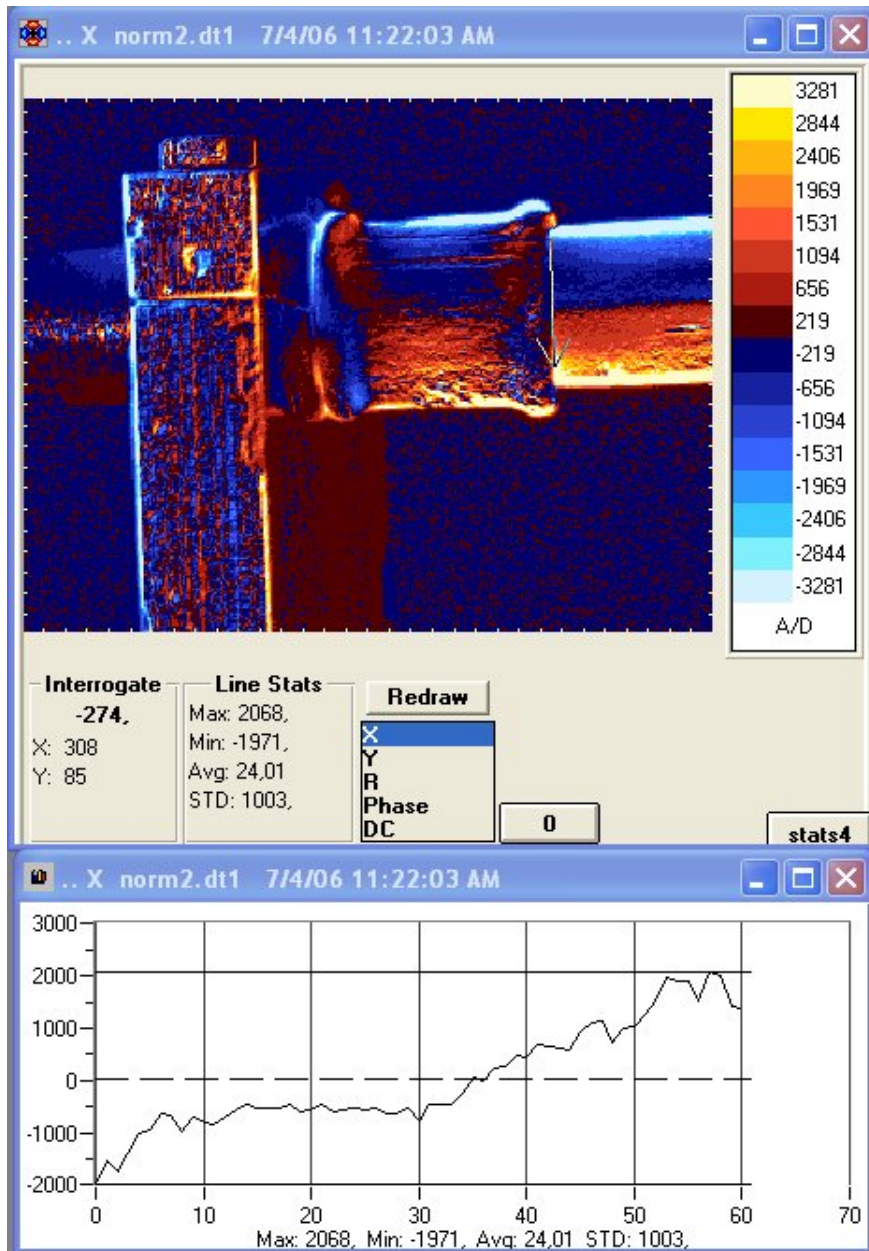
Nonostante l'ausilio del software, il problema del movimento è stato eliminato solo in parte, così si è deciso di utilizzare un'altra configurazione del banco prova per rendere più rigido il vincolo della tubazione.

Il vincolo è stato collegato a due porzioni della tubazione di cui una di lunghezza maggiore in modo da poterla fissare in due punti della supporto aumentando notevolmente la rigidezza di tutto il sistema. Nell'altra estremità, equivalentemente al primo banco prova, è stato riutilizzato il foro passante sulla filettatura della tubazione dove viene inserita una barra filettata collegata allo shaker per trasmettere carichi dinamici al nuovo sistema (fig. 5.15).



**Fig. 5.15: la nuova configurazione del banco prova.**

Sono state nuovamente acquisite le mappe termoelastiche: la prima (fig. 5.16) senza l'ausilio del tool del Mo-Comp, al contrario delle altre (fig. 5.17, 18), per confrontare il suo apporto nell'attenuazione dell'effetto spigolo.



**Fig. 5.16: mappa di stress acquisita senza Mo-Comp.**

Si può notare un movimento eccessivo del tubo evidenziato dalle zone "bianche" ai bordi della tubazione ("Effetto spigolo"), lo stress sulla tubazione ha segno opposto (area blu e rossa); lo stessa distribuzione è presente sul vincolo.

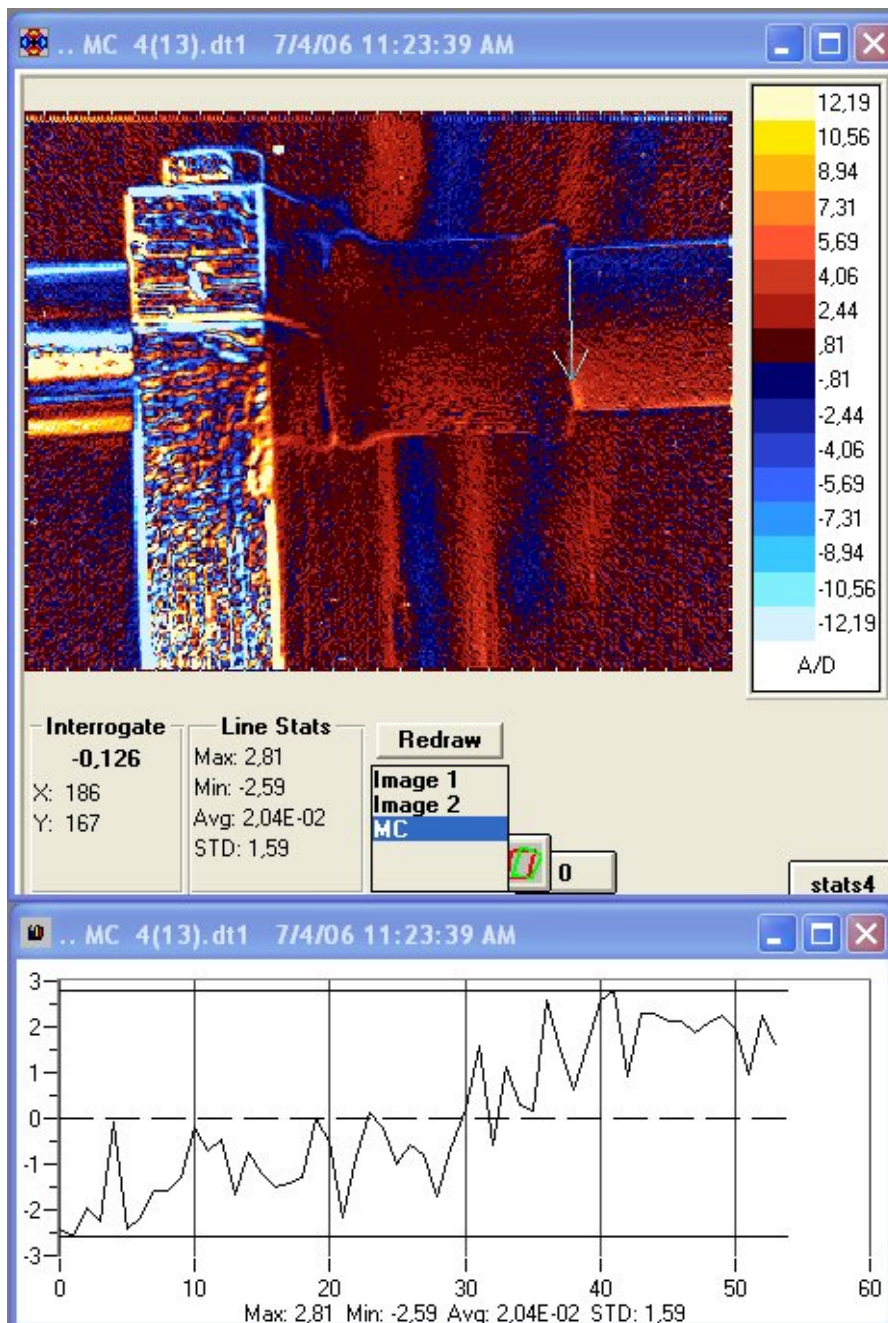


Fig. 5.17: mappa acquisita con il Mo-Comp.



**Fig. 5.18: la seconda mappa acquisita con il Mo-Comp.**

Tutte le mappe acquisite mostrano la medesima distribuzione della sollecitazione, le ultime due mostrano una notevole riduzione dell'effetto spigolo grazie al tool del Motion Compensation presente nel Software DeltaVision.

## CAPITOLO 6

### LE PROVE SPERIMENTALI: LO SVILUPPO DEL BANCO PROVA E LA CATENA DI MISURA

#### Introduzione

In questo capitolo, sarà illustrato il banco prova per la misura di stress, mediante termoelasticità su oggetti rotanti. Tale banco è stato progettato per poter essere montato sullo shaker elettrodinamico, in modo da sollecitare opportunamente il componente; deve porre, inoltre, in rotazione l'oggetto in esame. Questa fase consente di acquisire il filmato termico, che verrà elaborato successivamente. E', insomma, il primo passo nello sviluppo della metodologia di misura, su oggetti in moto sfruttando l'effetto termoelastico.

#### 6.1 Sviluppo del banco prova

L'oggetto del nostro studio è una ventola a calettamento variabile costituita da 5 pale in nylon PA66 adatte anche ad impieghi con esposizione ai raggi UV. Le pale sono bloccate tra due semigusci in lega leggera pressofusa serrati da cinque bulloni antisvitamento.



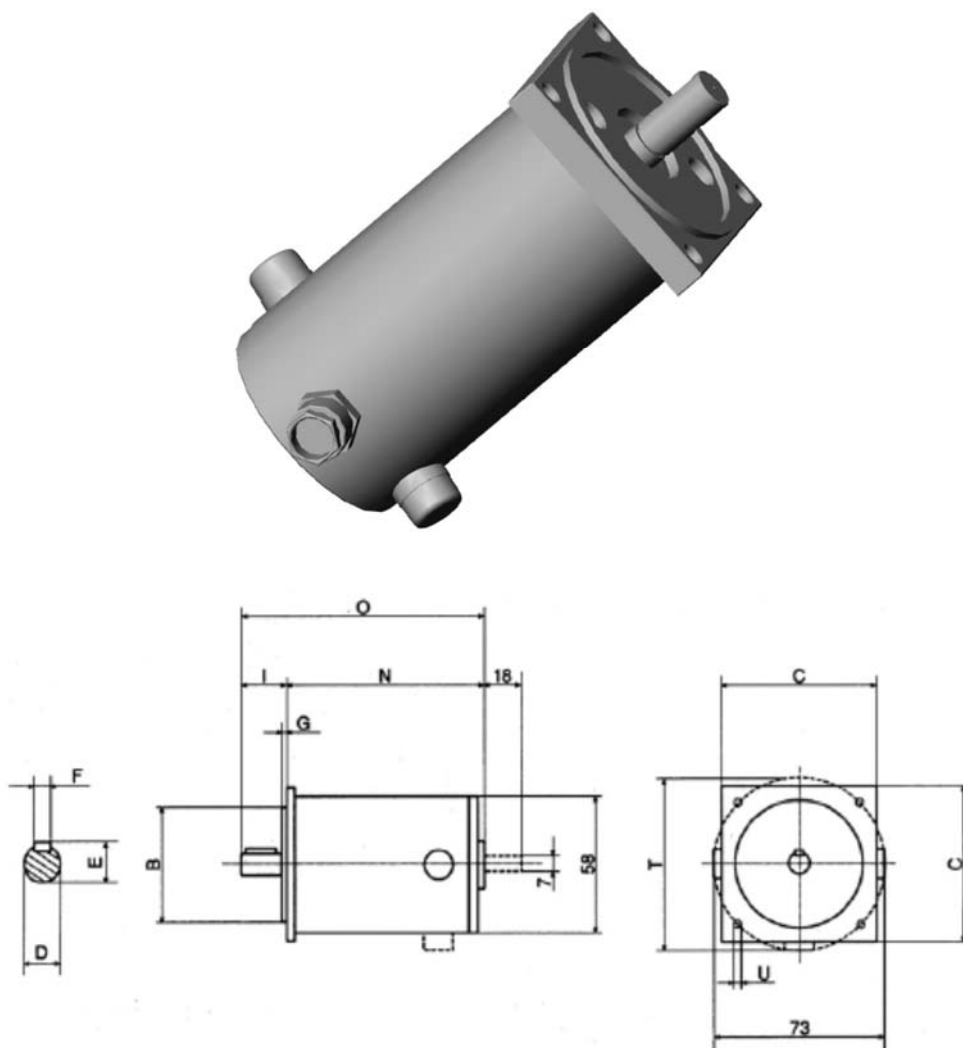
**Fig. 6.1: l'oggetto del nostro studio.**

Al fine di poter garantire la rotazione della ventola nelle condizioni prossime a quelle reali di funzionamento, si è deciso di movimentarla mediante un motore in corrente continua della Bonfiglioli, tipo BC130, avente le caratteristiche tecniche riportate in (Tab. 6.1).

BC130: Caratteristiche tecniche						
<i>V</i>	<i>RPM</i>	<i>W</i>	<i>Nm</i>	<i>A</i>	<i>J</i> [ $10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ]	<i>kg</i>
24	2000	30	0.16	1.8	4.87	1.72

**Tab. 6.1: caratteristiche tecniche motore utilizzato per la prova.**

Il motore rappresentato nella figura seguente ha le dimensioni geometriche riportate in tab. 6.2.



**Fig. 6.2: forma costruttiva del motore.**

BC130: Dimensioni ( <i>mm</i> )										
D	B	C	I	E	F	G	N	O	T	U
11	60	64	23	12.5	4	2.5	117	140	75	5.5

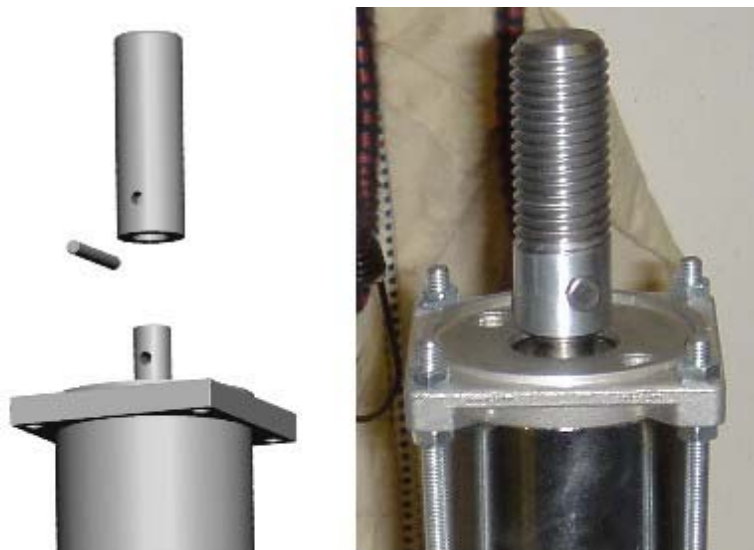
**Tab. 6.2: dimensioni motore.**

Il motore ha una flangia di attacco quadrata caratterizzata da quattro fori attraverso cui è stato possibile, mediante delle barre filettate di opportune dimensioni, fissarlo ad un supporto di alluminio, che è a sua volta vincolato allo shaker elettrodinamico tramite 8 viti.



**Fig. 6.3: collegamento motore-supporto-shaker.**

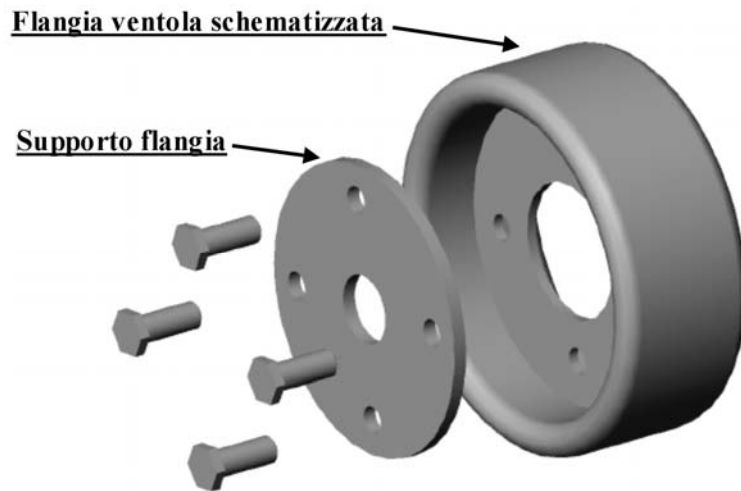
La ventola è stata collegata all'albero del motore grazie a degli opportuni accorgimenti. Poiché l'albero originale presentava caratteristiche, in termini di lunghezza e diametro, non idonee a vincolare la ventola, è stato necessario inserire un prolungamento con filettatura, fissato a tale albero con un spina (fig. 6.4).



**Fig. 6.4: l'albero del motore elettrico.**

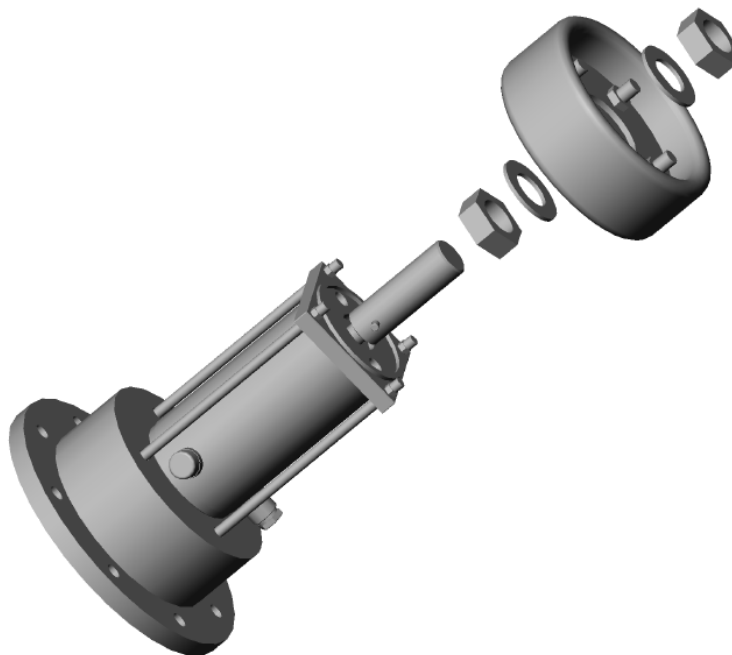
La flangia della ventola, oltre al foro centrale, possiede quattro fori, che sono stati utilizzati per vincolarla all'albero di trasmissione; ciò è stato effettuato per mezzo di un supporto (fig. 6.5), avente

altrettanti fori, più uno centrale dello stesso diametro dell'albero filettato.



**Fig. 6.5: schema di montaggio del supporto-flangia.**

L'ordine per il montaggio è il seguente: un primo dado viene avvitato sull'albero filettato, si inserisce una rosetta, e successivamente il supporto opportunamente collegato alla ventola; infine la flangia della ventola viene bloccata avvitando un secondo dado sull'albero (fig. 6.6).



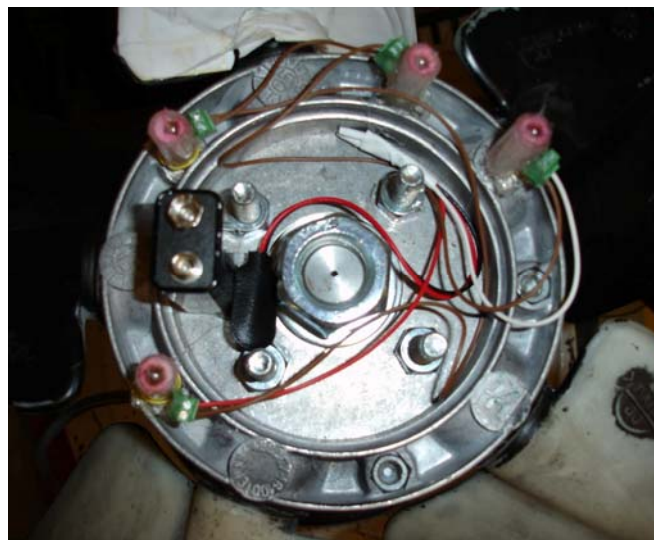
**Fig. 6.6: il montaggio del motore alla ventola.**

Così facendo la ventola contemporaneamente può ruotare rispetto al proprio asse, è saldamente collegata al motore, e proprio tramite quest'ultimo risulta essere connessa allo shaker elettrodinamico (fig. 6.7).



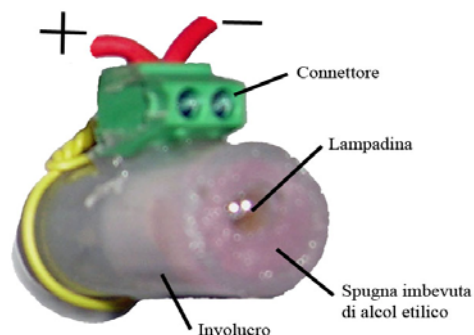
**Fig. 6.7: collegamento ventola-motore-supporto-shaker.**

Il banco prova è stato completato incollando sul bordo della flangia della ventola quattro marcatori termici, volutamente posizionati in modo tale da non dar luogo a quadrilateri regolari (fig. 6.8), che comprometterebbero il funzionamento ottimale del software utilizzato per la compensazione del movimento.



**Fig. 6.8: posizionamento dei marker sulla flangia.**

I marker (fig. 7.9) utilizzati sono piccole lampadine, in grado di emettere calore dal filamento; in questo modo solo pochi elementi del CCD dell'array termografico della termocamera sono in saturazione. Le lampadine vengono inserite in un involucro esterno costituito da un cilindro di plastica della lunghezza di 2 cm e del diametro di 0,5 cm.



**Fig. 6.9: il marcatore termico.**

La lampadina è collegata al connettore esterno con la tecnica del wrapping, poiché non è possibile effettuare saldature a stagno sui terminali della stessa. L'uso del connettore favorisce la modularità dei marcatori.

Tra la lampadina e l'involucro viene posta una spugna imbevuta di alcol etilico che serve a dissipare il calore generato intorno alla lampadina per ridurre l'area ad elevata emissione IR. Questa soluzione viene adottata per garantire il funzionamento ottimale del software di compensazione del movimento. Il tutto viene, infine sigillato con colla a caldo.

I quattro marker, utilizzati nel banco prova, sono stati collegati in serie, e vengono alimentati mediante una pila di 9V: ognuno di essi è quindi interessato da una tensione pari a 2.25V, inferiore a quella nominale (12V).

Grazie a questi accorgimenti, i marcatori termici hanno dimensioni fisiche contenute, sono resistenti alle vibrazioni dovute al carico applicato, e possono essere facilmente utilizzati per altri test e/o componenti meccanici.

E' stato sviluppato un altro banco prova (fig. 6.10) per vincolare rigidamente la ventola allo shaker; per tale scopo viene utilizzato il



**Fig. 6.10: la ventola vincolata rigidamente alla testa dello shaker.**

supporto del motore elettrico (fig. 7.11), in modo da vincolare la flangia della ventola alla testa vibrante dell'eccitatore.



**Fig. 6.11: il supporto utilizzato.**

Si è potuto procedere, quindi, all'acquisizione ed al confronto delle mappe termoelastiche con la ventola posta in rotazione e fissa rispetto alla termocamera.

## 6.2 La catena di misura

Gli strumenti utilizzati per realizzare la prova sperimentale sono:

- il sistema DeltaTherm 1560 e il computer dedicato per acquisizione dati
- il amplificatore di segnale;
- il generatore di campo elettromagnetico;
- l'eccitatore elettrodinamico LDS V650 (Shaker);
- il generatore di tensione.

Oltre a questi strumenti, al fine di valutare l'accelerazione impressa alla ventola, è stato utilizzato un accelerometro piezoelettrico 9340 con relativo amplificatore di segnale e un analizzatore di spettro ONO-SOKKI CF 360.

Nei capitoli precedenti sono stati descritti i componenti di questa catena di misura tranne il generatore di tensione HP E3631A, che ha le seguenti caratteristiche: fornisce in output corrente continua (DC) con valore massimo di 5A, in un range di tensione da 0 a 6V, e con valore massimo di 1A, in un range di tensione da 0 a  $\pm 25V$ .



Fig. 6.12: generatore di tensione.

### 6.2.1 Il funzionamento della catena di misura

Gli strumenti sono stati collegati come in fig. 6.12; il motore pone in rotazione la ventola, e viene alimentato dal generatore di tensione sopra descritto. La sollecitazione della ventola avviene per mezzo dello shaker elettrodinamico, ed il segnale pilota è impostato con il generatore HM 8030-6. Il segnale proveniente da tale dispositivo viene poi opportunamente amplificato tramite l'amplificatore PA 1000L.

Per misurare l'accelerazione impressa alla ventola è necessario utilizzare un accelerometro piezoelettrico. Quest'ultimo è posizionato sul supporto che vincola rigidamente la testa vibrante dello shaker al motore, il segnale da esso fornito è amplificato e filtrato dall'amplificatore di segnale BK 2635 e giunge all'analizzatore di spettro ONO-SOKKI CF 360 dove avviene la visualizzazione della forma d'onda relativa.

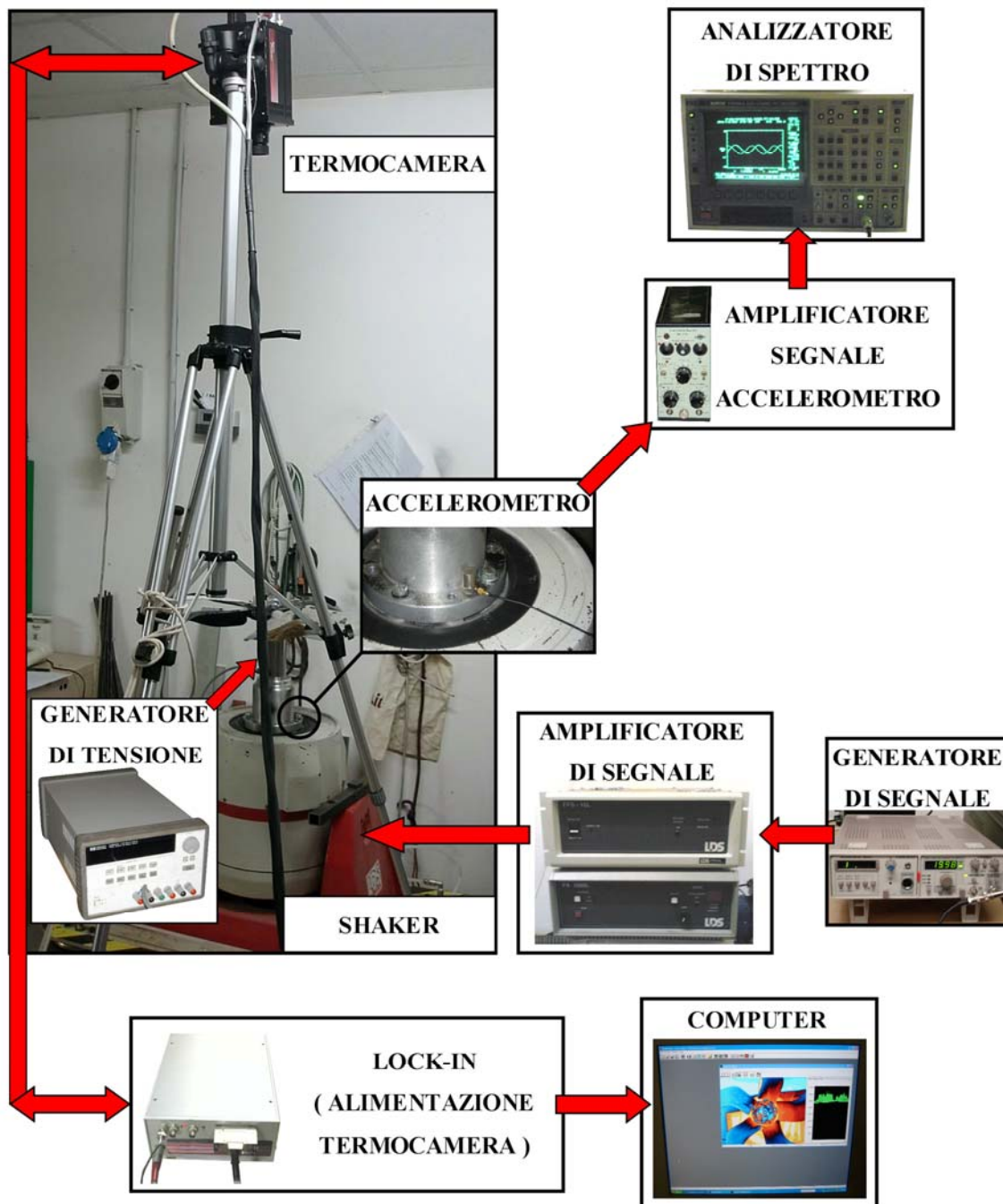


Fig. 6.13: schema di collegamento della catena di misura.

Il sistema di misura termoelastico vero e proprio è costituito dalla termocamera differenziale DeltaTherm 1560 e dal computer provvisto di un apposito software. L'unità di lock-in, che nell'acquisizione di mappe termoelastiche permette di rilevare le sole fluttuazioni di temperatura sincrone con il carico applicato, mentre nel caso dei filmati termografici svolge la sola funzione di alimentare la termocamera e trasferire il segnale di uscita proveniente da essa al computer.

## 6.3 Descrizione delle prove sperimentali

### 6.3.1 Acquisizione dei filmati termici

Questa prova sperimentale riguarda l'acquisizione di filmati termici relativi alla ventola in rotazione, e contemporaneamente posta in vibrazione dallo shaker (fig. 6.13), al fine di conoscere lo



Fig. 6.13: il banco prova in funzione.

stato di sollecitazione sulla pala in esame (fig. 6.14).

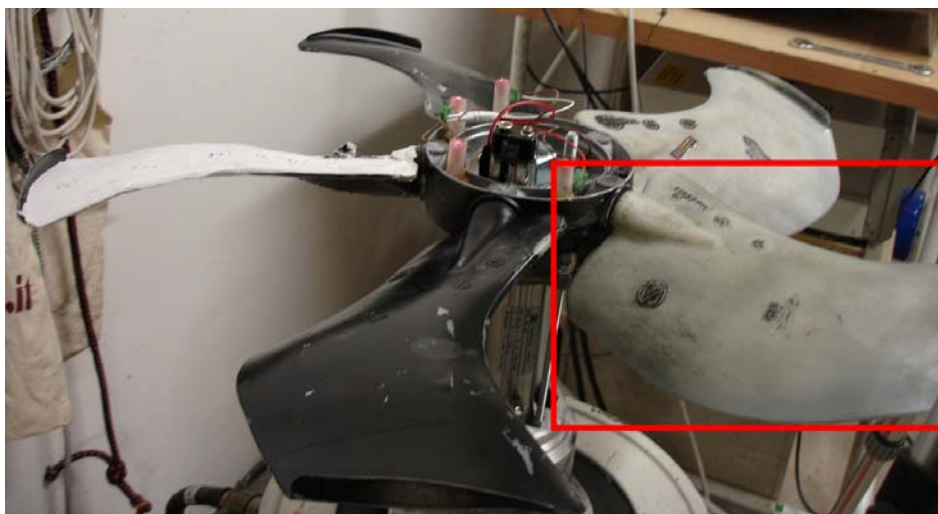


Fig. 6.14: nel riquadro a destra la pala in esame.

I filmati termografici acquisiti sono relativi a tre prove distinte: sollecitando la ventola a  $20\text{ Hz}$ , poi alle frequenze di risonanza di  $61\text{ Hz}$  e  $99\text{ Hz}$ . Per la prova a  $20\text{ Hz}$  è stata applicata una massa ( $200\text{ g}$ ) all'estremità libera della pala (fig. 6.15), al fine di incrementare lo stato tensionale del componente.



**Fig. 6.15: la massa applicata alla ventola.**

A differenza di quanto accade nell'acquisizione termoelastica, l'acquisizione termografica fornisce solamente la storia temporale dei campi di temperatura superficiali del provino.

Di seguito sono definite le caratteristiche delle acquisizioni a  $20\text{Hz}$ , a  $61\text{Hz}$ , e a  $99\text{Hz}$ .

- **Prova a 20 Hz**

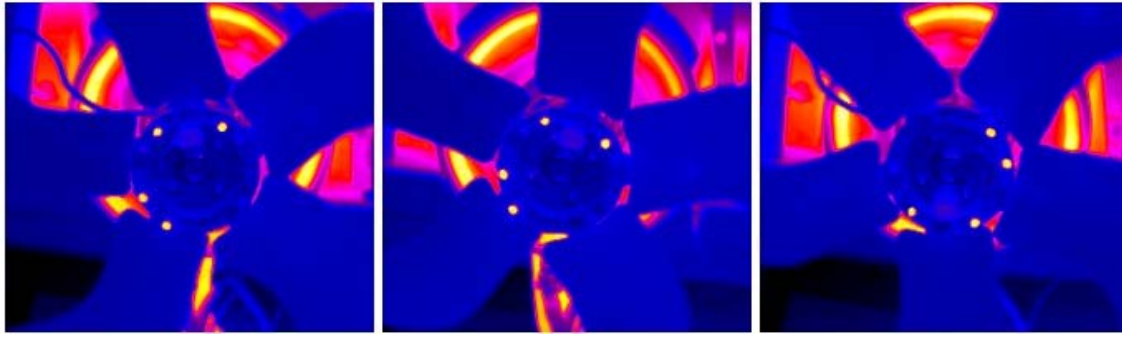
Tale prova è stata effettuata sollecitando la ventola con la forzante di  $1g$ , e ponendola in rotazione ad una velocità media di  $65\text{ giri/min}$  ( $f=1.11\text{Hz}$ ).

Prima di avviare l'acquisizione, la spugna dei marker è stata imbevuta di alcool e gli stessi sono stati alimentati con la pila da  $9V$  (fig. 6.16).



**Fig. 6.16: i marcatori termici alimentati.**

L'acquisizione, durata 20 secondi, è stata effettuata impostando il frame rate a  $100\text{ frame/s}$ ; in totale sono stati quindi acquisiti  $2000\text{ frame}$  (fig. 6.17), esportati in un secondo momento in formato `txt`, in modo da poter essere elaborati con il software per la compensazione del movimento.



**Fig. 6.17: alcuni frame del filmato termografico acquisito con la ventola in movimento.**

- **Prova a 61 Hz**

La prova alla frequenza di risonanza di  $61\text{Hz}$  è stata effettuata con una forzante di  $10\text{g}$ ; in questo caso la ventola è stata posta in rotazione ad una velocità media di  $15\text{ giri/min}$  ( $f = 0.25\text{Hz}$ ).

La frequenza di campionamento è stata impostata a  $200\text{ frame/s}$ , acquisendo  $2000\text{ frame}$  in totale (durata:  $10\text{ s}$ ).

- **Prova a 99 Hz**

Anche in questo test la ventola è stata sollecitata ad una frequenza di risonanza ossia la seconda individuata sul componente in esame.

La velocità media di rotazione è pari a  $49\text{ giri/min}$  ( $f = 0.82\text{Hz}$ ), e l'ampiezza della sollecitazione è pari a  $18\text{g}$ .

Le modalità di acquisizione del filmato sono le stesse della prova a  $20\text{ Hz}$ . Considerato il valore della frequenza di campionamento, i frames compensati, verranno elaborati in aliasing [14] alla frequenza di  $1\text{Hz}$  ( $F_s - f_c = (100 - 99)\text{ Hz} = 1\text{Hz}$ ).

## CAPITOLO 7

# ANALISI TERMOELASTICA DELLE TENSIONI MEDIANTE ELABORAZIONE DEI FILMATI TERMICI

### Introduzione

Il presente capitolo ha la funzione di illustrare il metodo sviluppato per elaborare i filmati termici, e per effettuare l'analisi termoelastica delle tensioni. I passi fondamentali sono la compensazione del movimento e la seconda fase consiste nell'elaborazione dei frame riallineati.

La prima operazione viene svolta dal Software Termoimage, che individua i punti di riferimento mediante i quali calcola lo spostamento o la rotazione dell'immagine in esame rispetto ad una di riferimento.

Di seguito verranno illustrate le operazioni principali, che l'utente deve effettuare.

La seconda ed ultima fase riguarda il filtraggio del segnale termico per ottenere quello termoelastico; in sostanza tali algoritmi calcolano l'ampiezza e la fase dell'effetto termoelastico, che ha una frequenza nota e determinata dal carico applicato al componente in esame.

In ultimo, le mappe di tensione verranno confrontate con quelle ottenute con la pala fissa rispetto alla termocamera, per validare la metodologia sviluppata; questo tipo di analisi sperimentale può essere usato per validare il modello FEM della pala.

### 7.1 Il software termoimage

I passi principali dell'elaborazione si possono riassumere nei seguenti:

- filtraggio dell'immagine
- individuazione delle aree di interesse
- selezione dei punti di controllo
- costruzione delle matrici di rototraslazione.

La sequenza dei parametri, che l'operatore deve impostare (modalità manuale), è elencata nella colonna a sinistra della schermata (fig. 7.1); tali valori sono rappresentati in verde (■) se sono corretti, altrimenti in rosso (■).

L'impostazione dei parametri può essere effettuata anche in modalità automatica; in sostanza la modalità manuale permette di agire su un'immagine per volta e consente all'utente di fissare i parametri che serviranno, in seguito, per far funzionare efficacemente la modalità automatica.

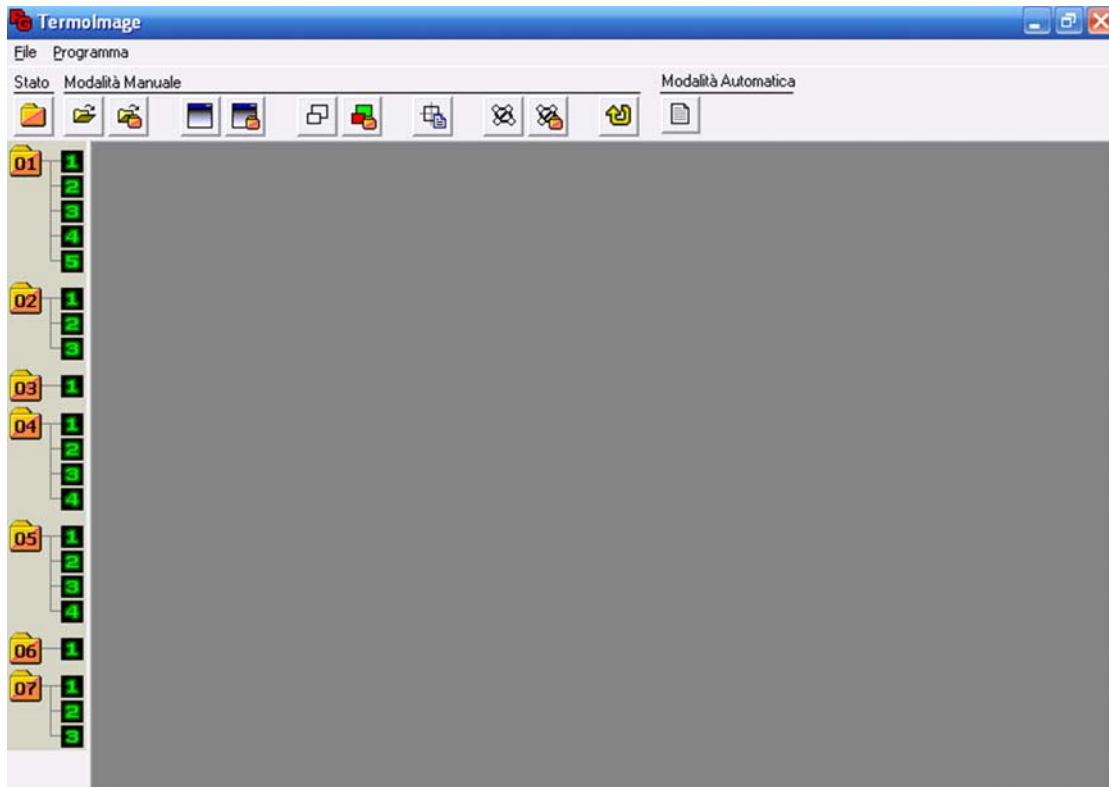


Fig. 7.1: schermata iniziale del software Termolmage.

- **Fase 1: selezione della cartella dei files** 

Permette di specificare i file necessari all'elaborazione; nella finestra (fig. 7.2) si può scegliere la "Cartella files sorgente", l'"Estensione dei files" da aprire, e quelli da "Ignorare".

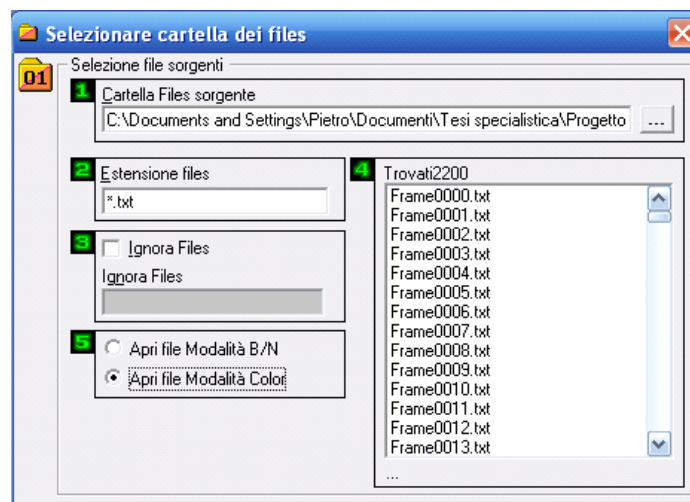



Fig. 7.2: finestra "Selezione cartella dei files".

Sulla colonna di destra (fig. 7.2) viene riportato l'elenco dei file trovati; è possibile, inoltre, scegliere in quale modalità si vogliono aprire i files trovati: in bianco e nero o a colori.

- **Fase 2: impostazione dei filtri per la rappresentazione delle immagini termiche** 


Se si seleziona il tasto relativo, si aprirà una finestra denominata "Impostazioni filtri su Immagini" (fig. 7.3), dalla quale è possibile impostare il valore massimo e minimo con cui il filtro modificherà l'immagine stessa. Si possono impostare e memorizzare tre range di valori.



Fig. 7.3: finestra "Impostazioni filtri su immagini".

Ognuno dei tre funziona come filtro "Passa Alto", ossia viene eliminato il contributo dei pixel, che hanno un valore di emissione nel range specificato in "Min" e "Max".

Nel caso riportato in fig. 7.3 si eliminano i pixel con valori di emissione compresi tra -16000 ed 8500.

- **Fase 3: selezione della tipologia di definizione del contorno** 

L'impostazione di questo parametro definisce la tipologia di definizione del contorno (fig. 7.4), che può essere di tre tipi: criterio dx/sx, gradiente, e per livello.

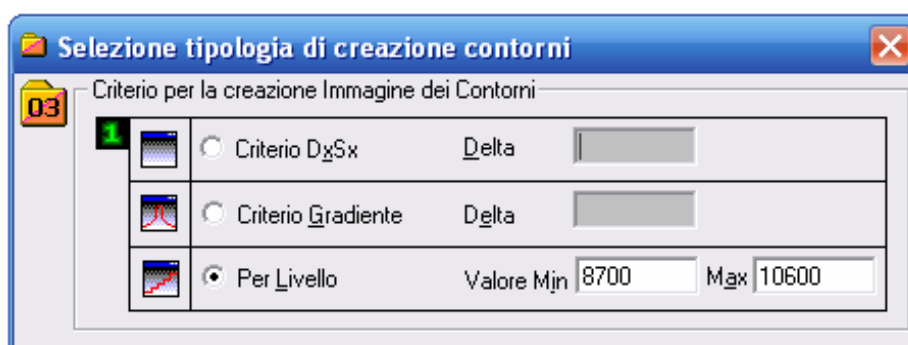

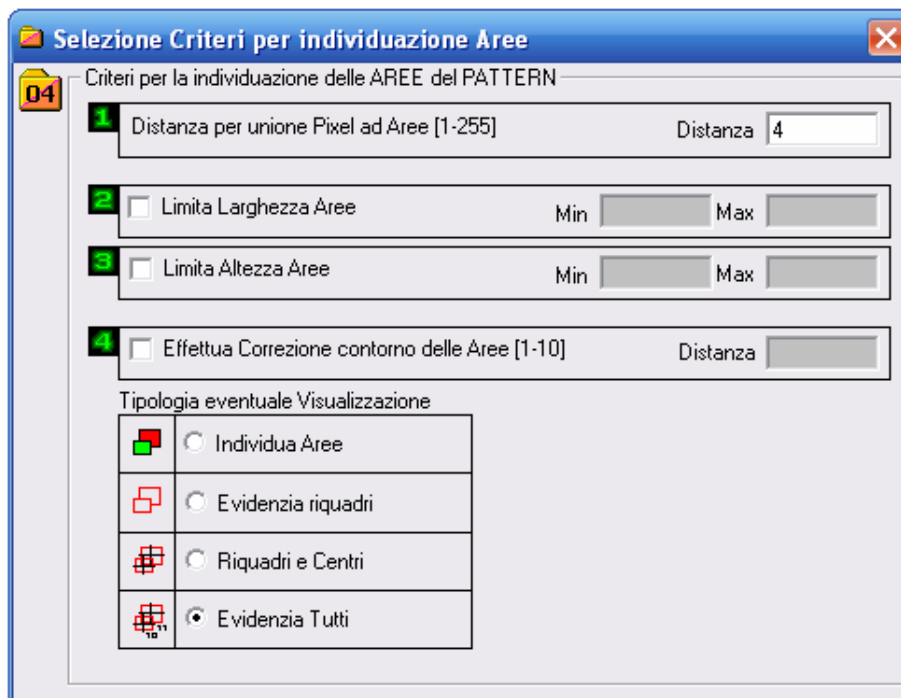


Fig. 7.4: finestra "Selezione tipologia di creazione contorni".

Il criterio per livello è quello più utilizzato, e consente di individuare i contorni delle figure geometriche in base ai valori d'emissione, impostando gli estremi dell'intervallo. Tali figure verranno poi utilizzate dal software come riferimento, per calcolare gli spostamenti relativi del componente.

- **Fase 4: individuazione delle coordinate delle aree di riferimento**

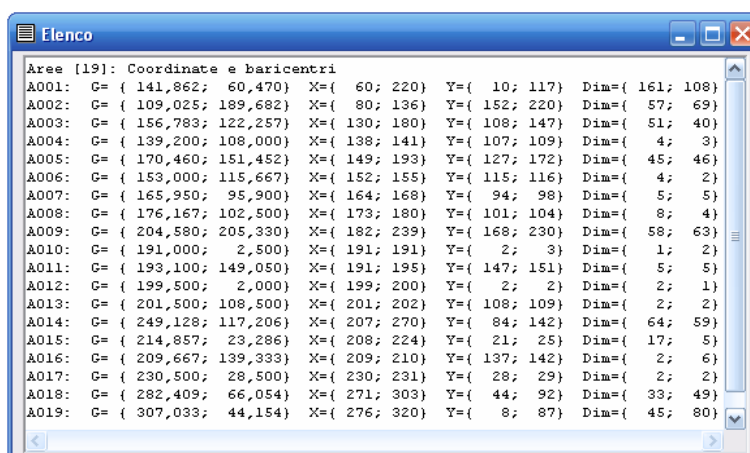
Cliccando il tasto  si aprirà una finestra denominata "Criteri per individuazione aree", in cui è possibile impostare le caratteristiche che le aree di interesse devono avere (Fig. 7.5).



**Fig. 7.5: finestra "Selezione criteri per individuazione aree".**

I criteri geometrici per la scelta delle aree di riferimento vengono definite in questa fase e sono riportate fig. 7.5. E' possibile, inoltre, scegliere le informazioni geometriche riguardanti le aree individuate, quali ad esempio le coordinate, le dimensioni, e il baricentro, che saranno poi rese note.

Selezionando, infatti, il tasto  verrà visualizzato l'elenco delle aree trovate, con le coordinate dei relativi baricentri e dei vertici, nonché la dimensione di ciascun area (Fig. 7.6).



**Fig. 7.6: elenco delle aree trovate.**

- **Fase 5: selezione delle aree di riferimento** 

In questa parte devono essere scelte le aree, tra quelle individuate nella fase precedente (fig. 7.6), che servono come riferimento per compensare il moto.

Nella finestra in fig. 7.7 vengono inserite le coordinate del baricentro di almeno tre aree; si possono impostare fino a sei aree, nel caso in cui il moto in analisi fosse particolarmente difficile da studiare o si volesse lavorare in "sicurezza".

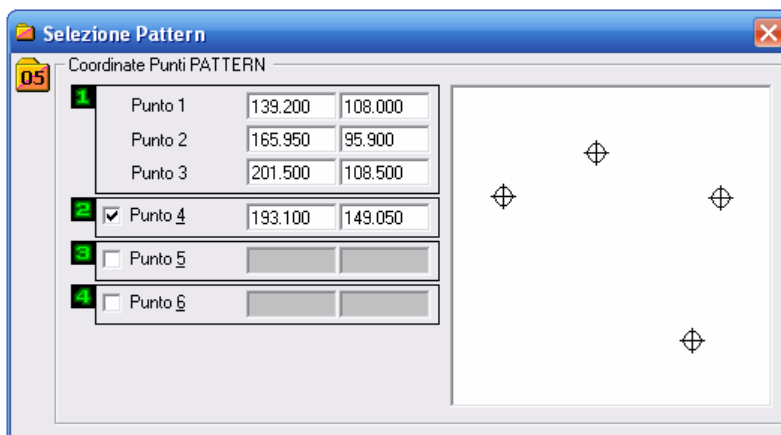


Fig. 7.7: finestra "Selezione Pattern": a sinistra vengono visualizzate le aree scelte.

- **Fase 6: scelta del criterio di individuazione delle aree** 

Prima di iniziare a "cercare" in modalità automatica le aree su ogni frame, è necessario specificare il criterio di individuazione nella finestra "Selezione Accuratezza" (fig. 7.8).

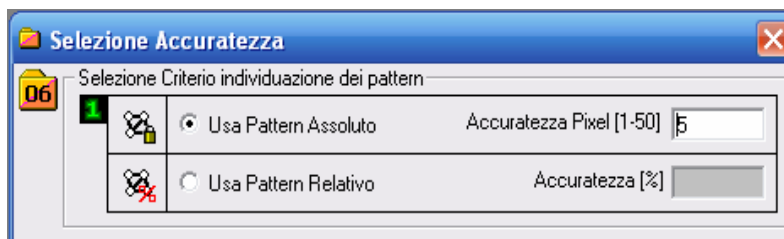

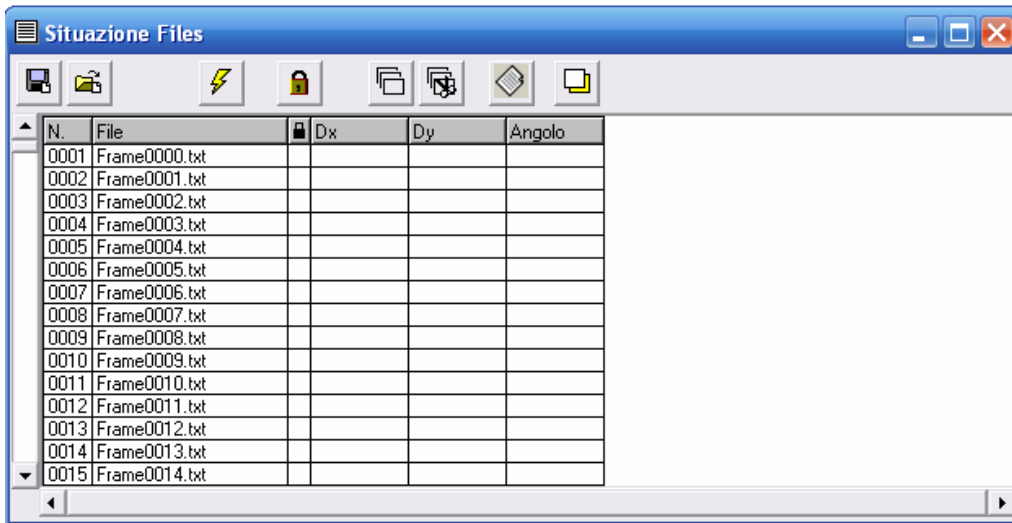


Fig. 7.8: selezione del tipo di pattern.


- **Fase 7: elaborazione e scrittura dei risultati**

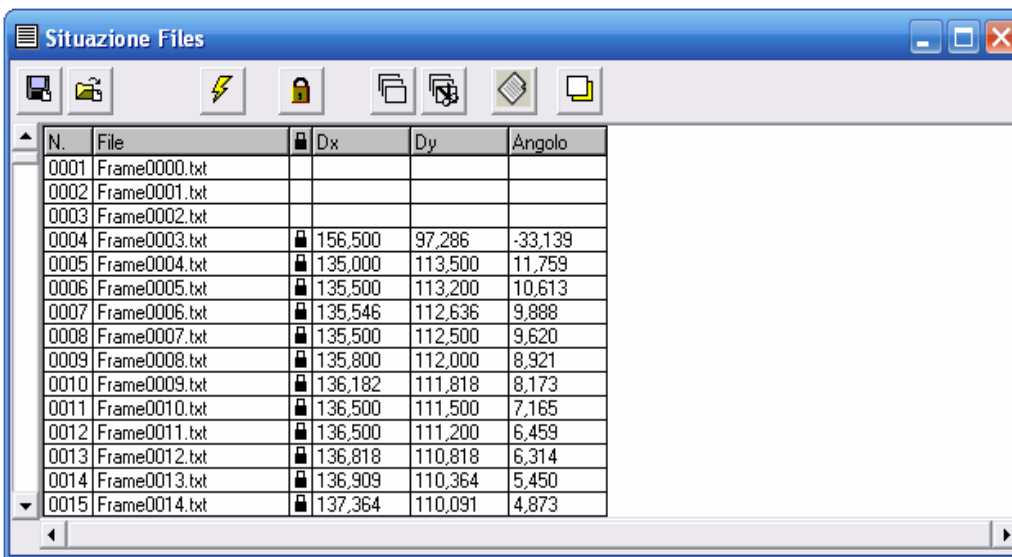
Nella barra in alto delle schermata iniziale, selezionando il tasto , si visualizzano i file riconosciuti ed elaborabili (fig. 7.9).



N.	File	Dx	Dy	Angolo
0001	Frame0000.txt			
0002	Frame0001.txt			
0003	Frame0002.txt			
0004	Frame0003.txt			
0005	Frame0004.txt			
0006	Frame0005.txt			
0007	Frame0006.txt			
0008	Frame0007.txt			
0009	Frame0008.txt			
0010	Frame0009.txt			
0011	Frame0010.txt			
0012	Frame0011.txt			
0013	Frame0012.txt			
0014	Frame0013.txt			
0015	Frame0014.txt			


**Fig. 7.9: elenco dei file da riallineare.**

Con il tasto , si inizia il calcolo dello spostamento (angolare e lineare) dei frame rispetto ad uno scelto dall'utente; una volta completate le operazioni, lo spostamento e la rotazione vengono scritti nelle colonne a sinistra (fig. 7.10).

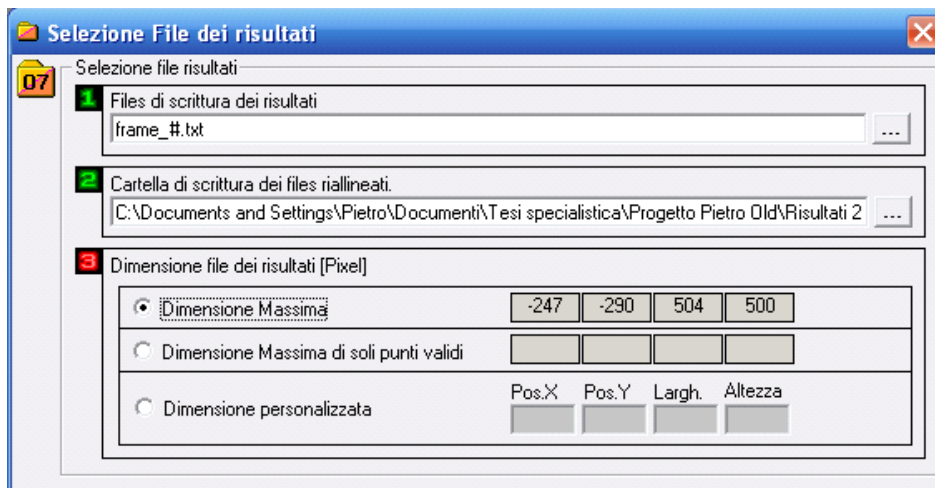


N.	File	Dx	Dy	Angolo
0001	Frame0000.txt			
0002	Frame0001.txt			
0003	Frame0002.txt			
0004	Frame0003.txt	156,500	97,286	-33,139
0005	Frame0004.txt	135,000	113,500	11,759
0006	Frame0005.txt	135,500	113,200	10,613
0007	Frame0006.txt	135,546	112,636	9,888
0008	Frame0007.txt	135,500	112,500	9,620
0009	Frame0008.txt	135,800	112,000	8,921
0010	Frame0009.txt	136,182	111,818	8,173
0011	Frame0010.txt	136,500	111,500	7,165
0012	Frame0011.txt	136,500	111,200	6,459
0013	Frame0012.txt	136,818	110,818	6,314
0014	Frame0013.txt	136,909	110,364	5,450
0015	Frame0014.txt	137,364	110,091	4,873


**Fig. 7.10: elenco dei file riallineati.**

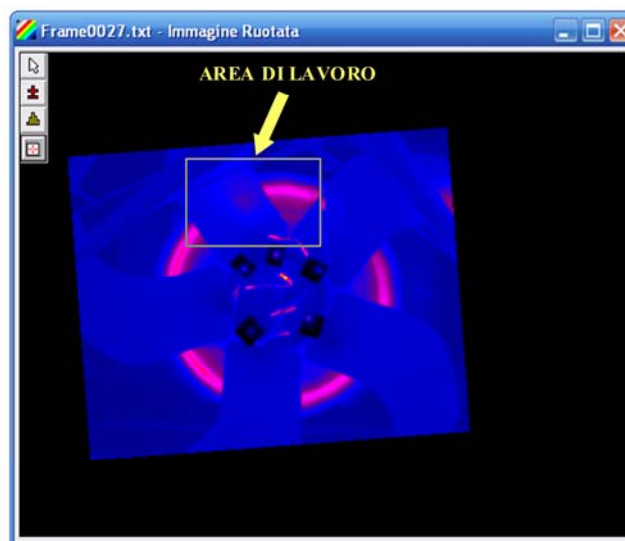
Con il tasto  (fig. 7.11) si specifica con quale nome, estensione salvare ogni singolo file e in quale cartella devono essere inseriti quelli riallineati. Nella stessa finestra, è necessario scegliere qual è l'area di interesse, con cui i file riallineati verranno salvati.

Il programma prevede tre differenti possibilità di scelta: "Dimensione Massima", "Dimensione Massima di soli punti validi" e "Dimensione personalizzata".




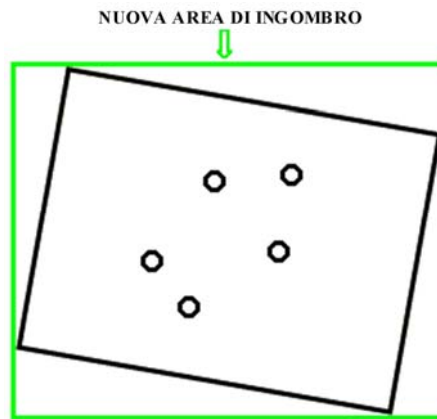
**Fig. 7.11: finestra "Selezione file dei risultati".**

Per ciò che concerne la "Dimensione personalizzata" la scelta di tale area avviene nel seguente modo: si visualizza un file casuale dalla finestra "Situazione files" con il tasto destro del mouse; in tale immagine si evidenzia l'area di lavoro da salvare, inglobandola in un rettangolo di selezione che viene visualizzato cliccando il tasto "Selezione area di lavoro"  (fig. 7.12).



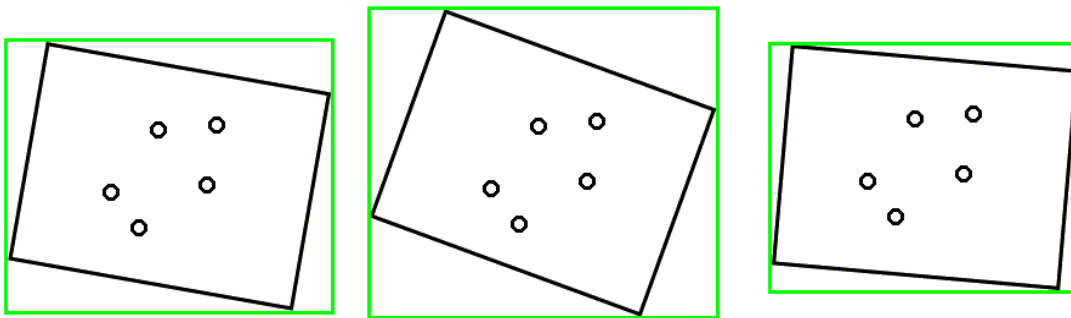
**Fig. 7.12: selezione area di lavoro da salvare.**

Infine, per salvare i file riallineati, basta cliccare il tasto "Esporta file ruotati"  nella finestra "Situazione files". Riassumendo, quindi, una volta scelte le aree di riferimento su un generico frame, dovranno coincidere per ciascuna immagine mentre sarà essa stessa a ruotare. Tutto questo è possibile, poiché il software è anche in grado di determinare l'area di ingombro di ciascuna immagine ruotata e quindi l'area totale dell'insieme dei frame ruotati. Consideriamo inizialmente un'immagine singola: quest'ultima viene ruotata dall'algoritmo presente nel software. Nella nuova posizione, l'immagine occuperà un'area di ingombro diversa da quella occupata inizialmente (Fig. 7.13).



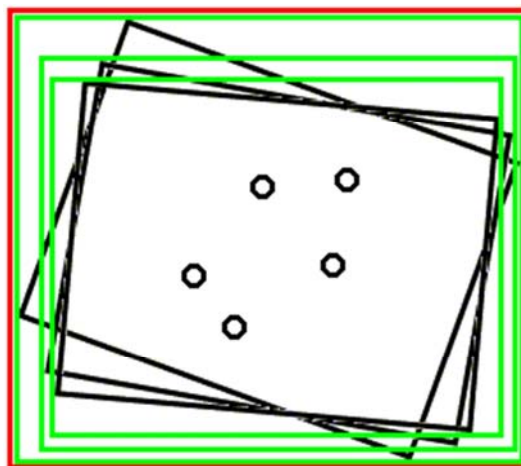
**Fig. 7.13: figura ruotata e rispettiva area di ingombro.**

Il software determina la nuova area di ingombro, la memorizza e passa al frame successivo, ripetendo il procedimento appena descritto. Viene a determinarsi una successione di aree di ingombro (fig. 7.14).



**Fig. 7.14: successione di aree di ingombro.**

Sovrapponendo tutte le immagini in modo tale che le aree di ciascuna coincidano, si determina l'ingombro risultante (Fig. 7.15).



**Fig. 7.15: area di ingombro risultante (in rosso).**

## 7.2 Filtraggio del segnale termico: le mappe di tensione termoelastiche

Mediante le operazioni del Termoimage, si ottiene la compensazione del movimento nei frame del filmato termografico di partenza.

Il passo successivo è l'elaborazione dei frame (.txt) in uscita dal termoimage, utilizzando algoritmi appositamente sviluppati in ambiente MatLab [12]; il primo è basato sulla trasformata discreta di Fourier (DFT) (v. appendice 3), il secondo filtra il segnale mediante relazioni trigonometriche tipiche dell'amplificatore lock-in [7 - 8].

Con entrambi è possibile visualizzare i campi di stress agenti sulla superficie del componente ed individuare le zone critiche ove c'è maggiore possibilità di rottura. Vi è inoltre l'opportunità di conoscere la fase della mappa termoelastica: tale informazione è necessaria per valutare la qualità dell'acquisizione termografica.

### 7.2.1 I risultati delle prove

La sollecitazione e la velocità di rotazione a cui è stata sottoposta la ventola sono riportate in tab. 7.1.

	Frequenza	Forzanti	Velocità di rotazione media
Test 1	20 Hz	1 g	65 giri/min
Test 2	61 Hz	10 g	15 giri/min
Test 3	99 Hz	18 g	49 giri/min

Tab. 7.1: caratteristiche dei test.

Di seguito sono riportate le mappe di tensione termoelastiche utilizzando i due algoritmi sviluppati.

- **Mappe ottenute con algoritmo DFT**

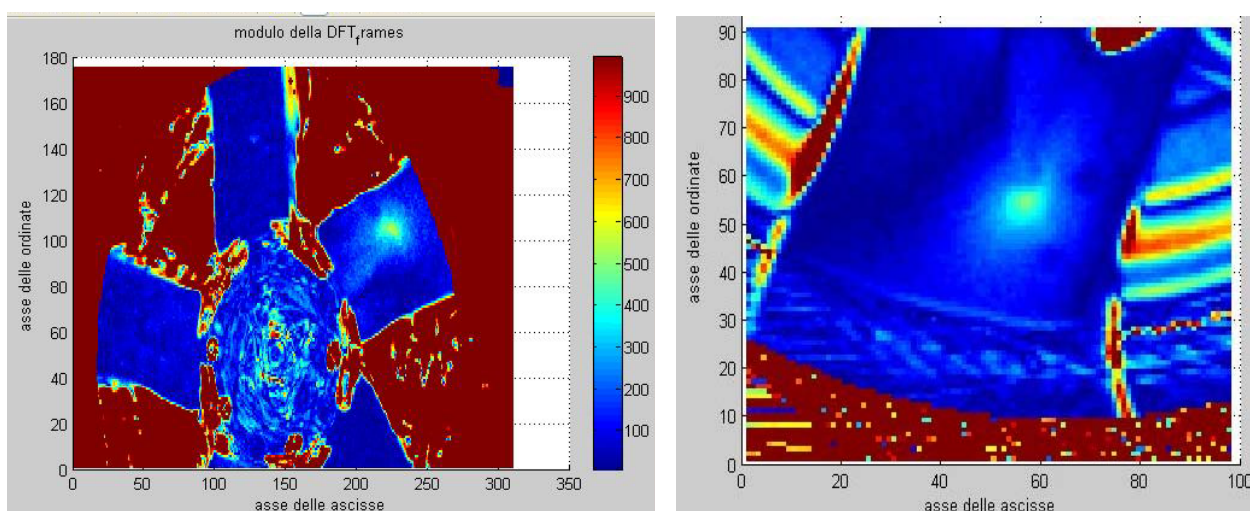


Fig. 7.16: mappe di tensione della ventola (a sinistra) e della pala (a destra) ottenute con il test 1.

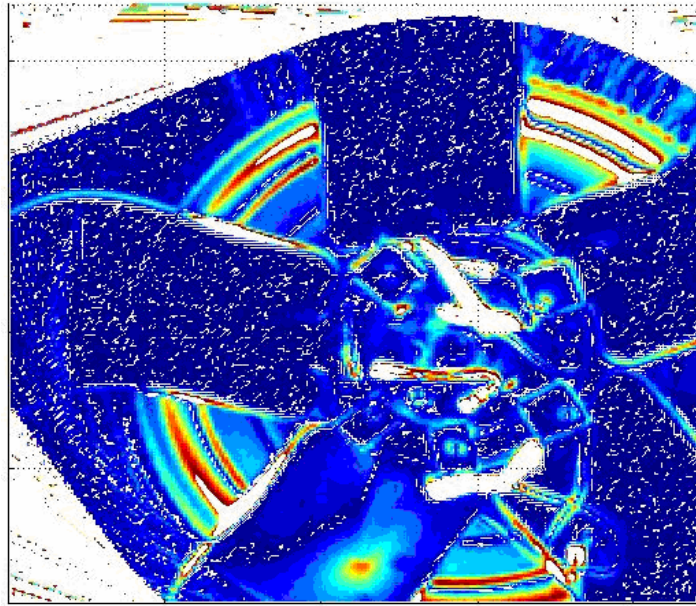


Fig. 7.17: un'altra mappa di tensione ottenuta con il test 1.

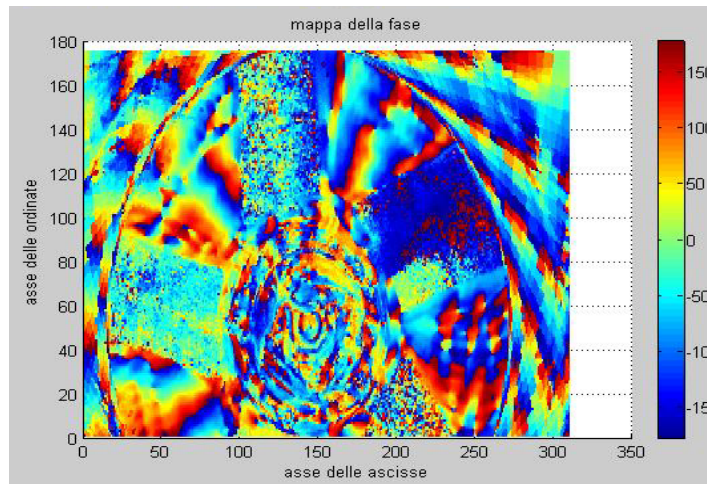


Fig. 7.18: mappe della fase della ventola ottenute con il test 1.

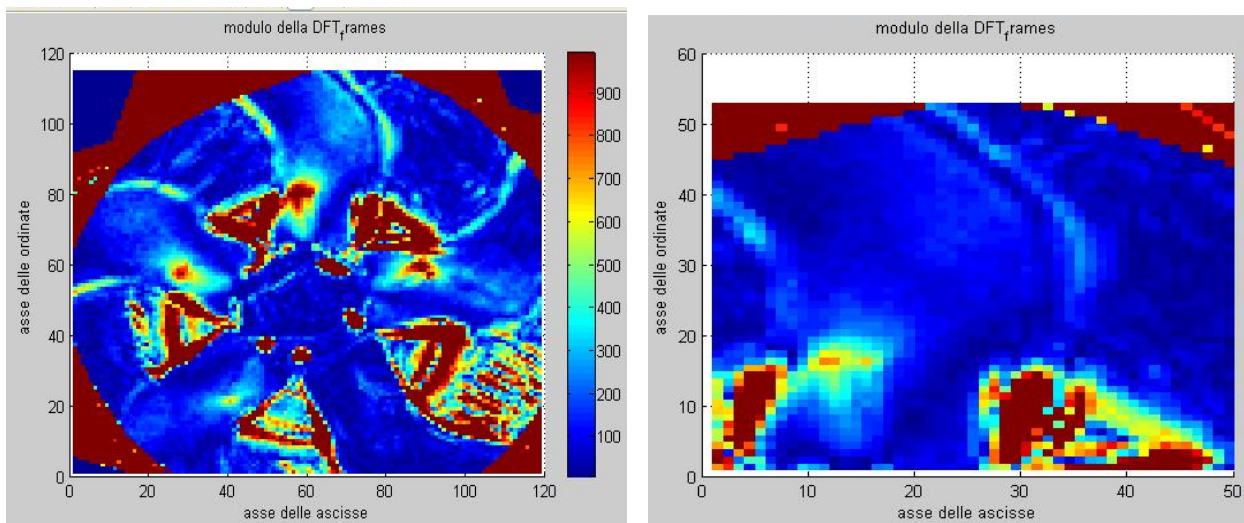
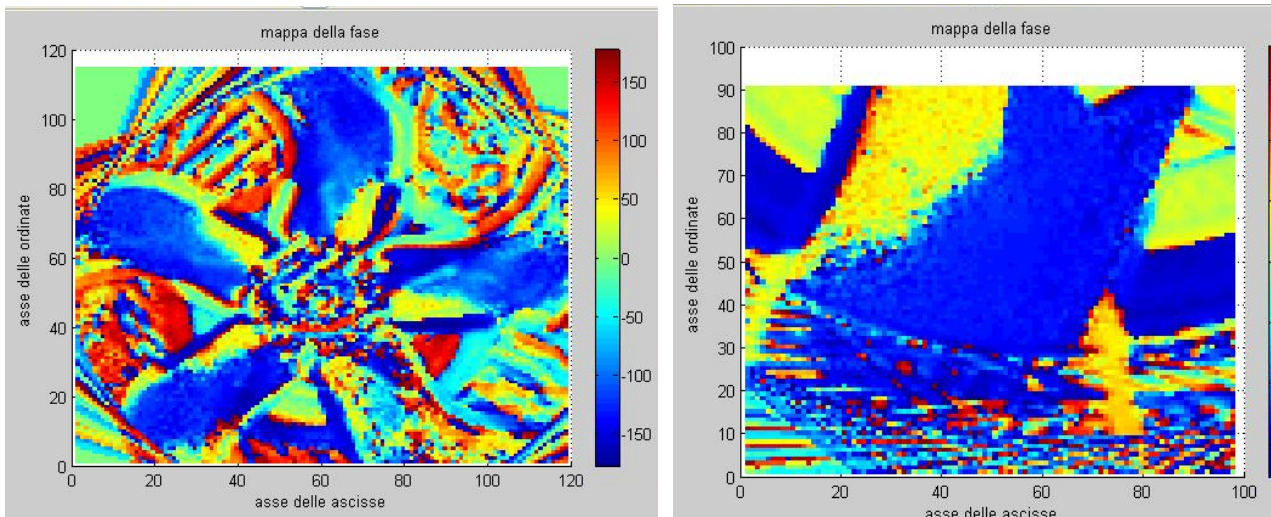
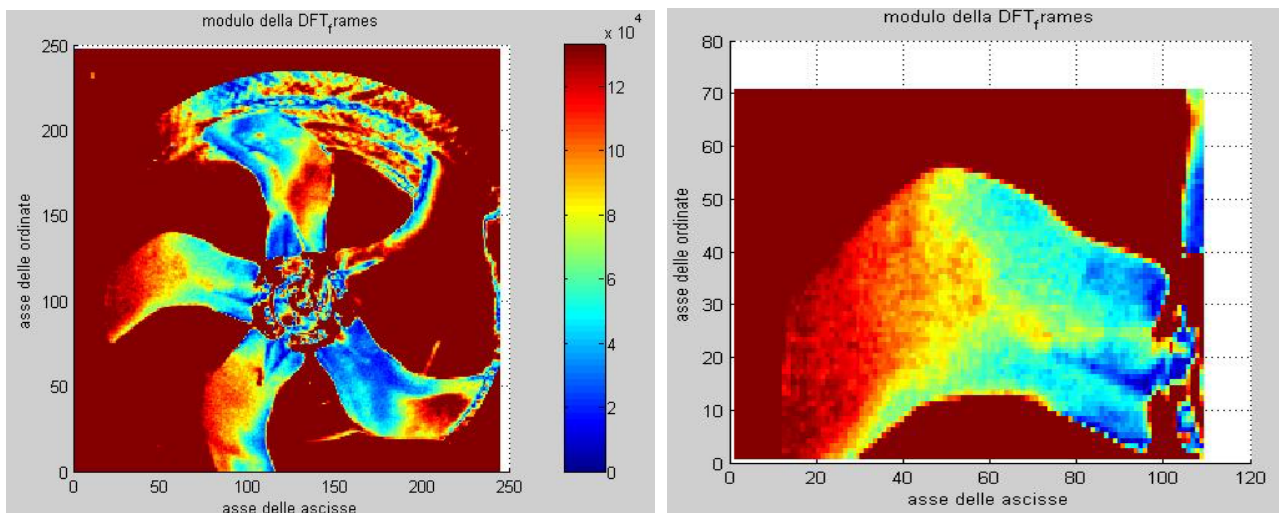


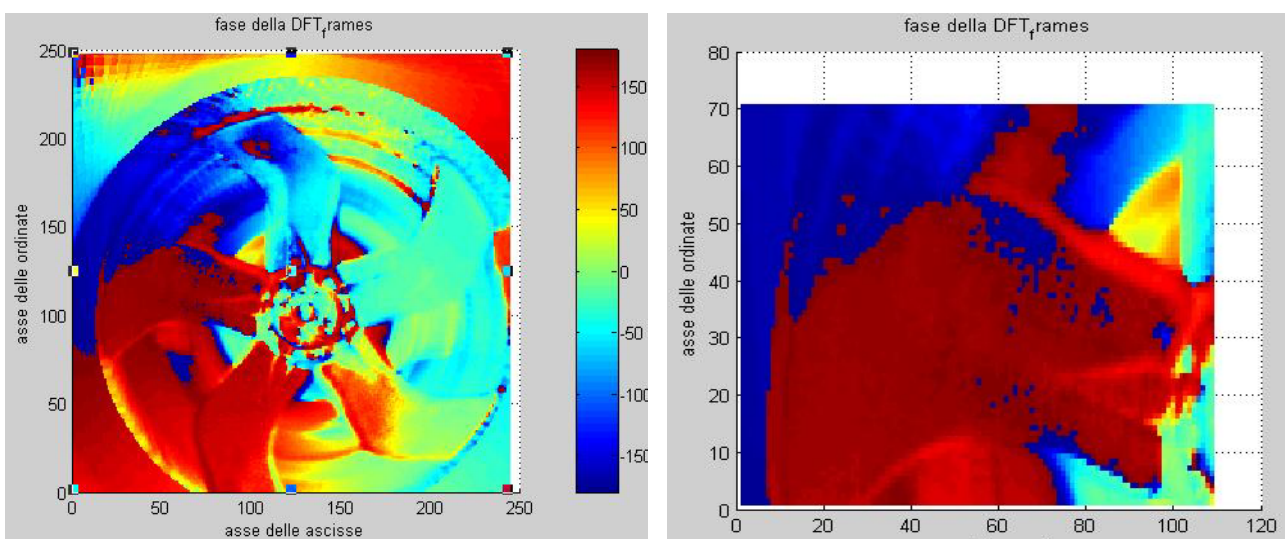
Fig. 7.19: mappe di tensione della ventola (a sinistra) e della pala (a destra) ottenute con il test 2.



**Fig. 7.20:** mappe di fase della ventola (a sinistra) e della pala (a destra) ottenute con il test 2.

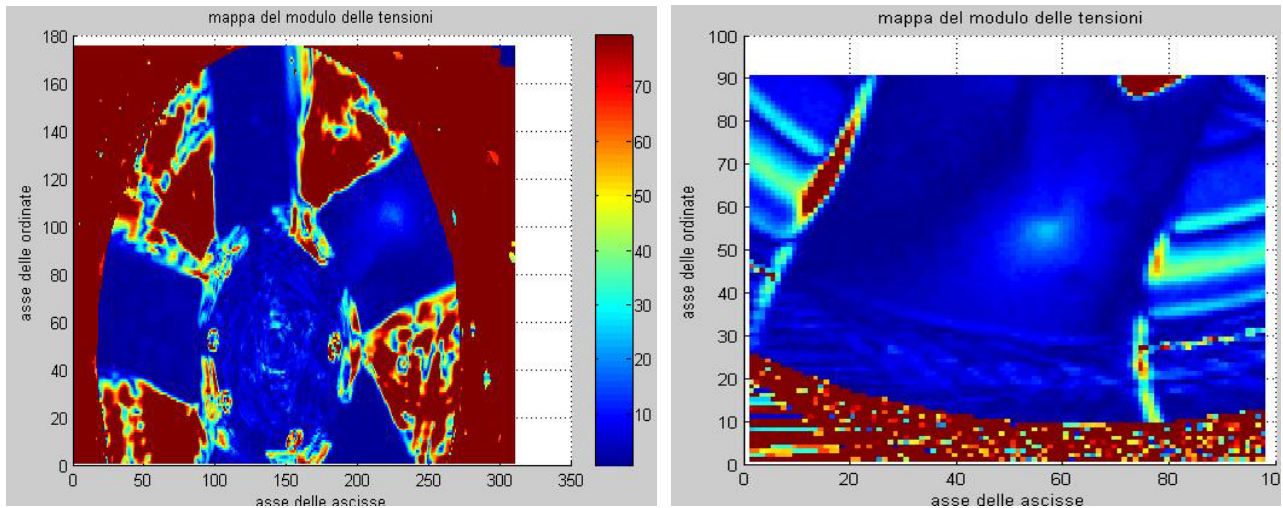


**Fig. 7.21:** mappe di tensione della ventola (a sinistra) e della pala (a destra) ottenute con il test 3.

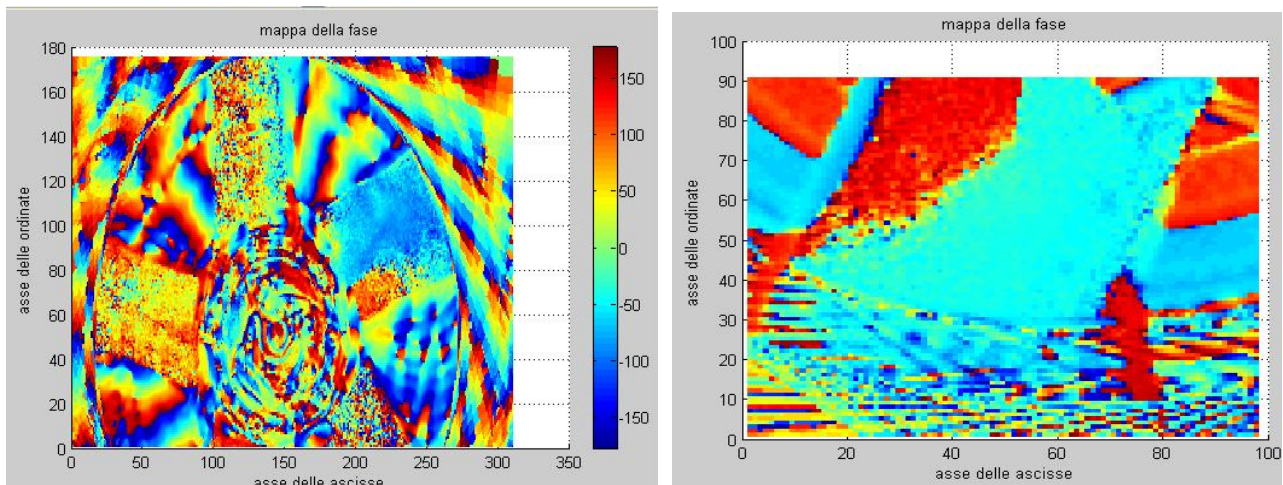


**Fig. 7.22:** mappe di fase della ventola (a sinistra) e della pala (a destra) ottenute con il test 3.

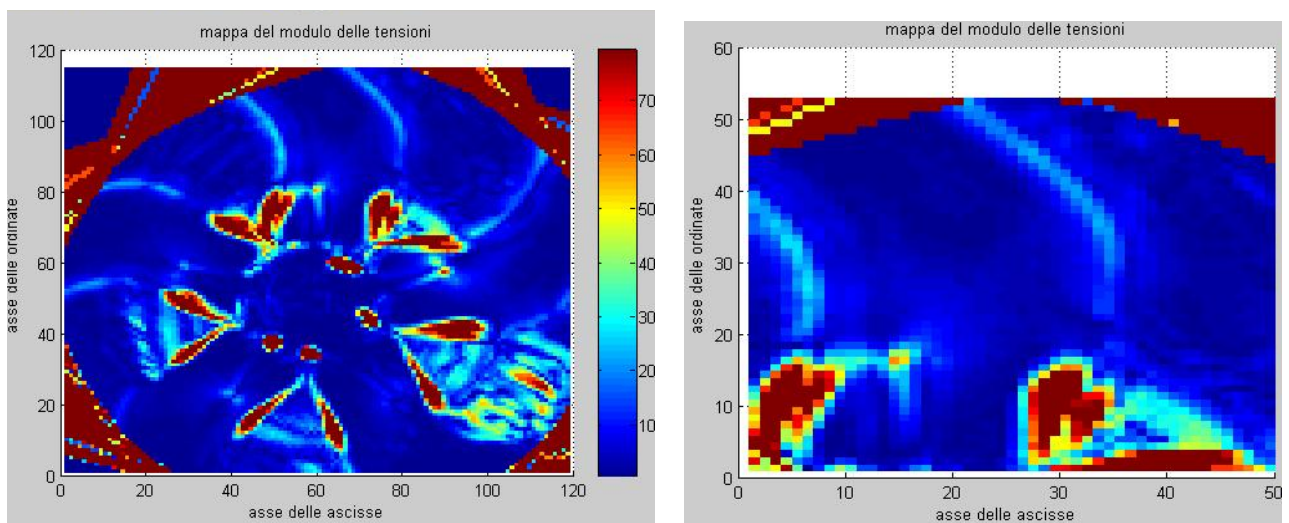
- *Mappe ottenute con algoritmi tipo "Lock-in"*



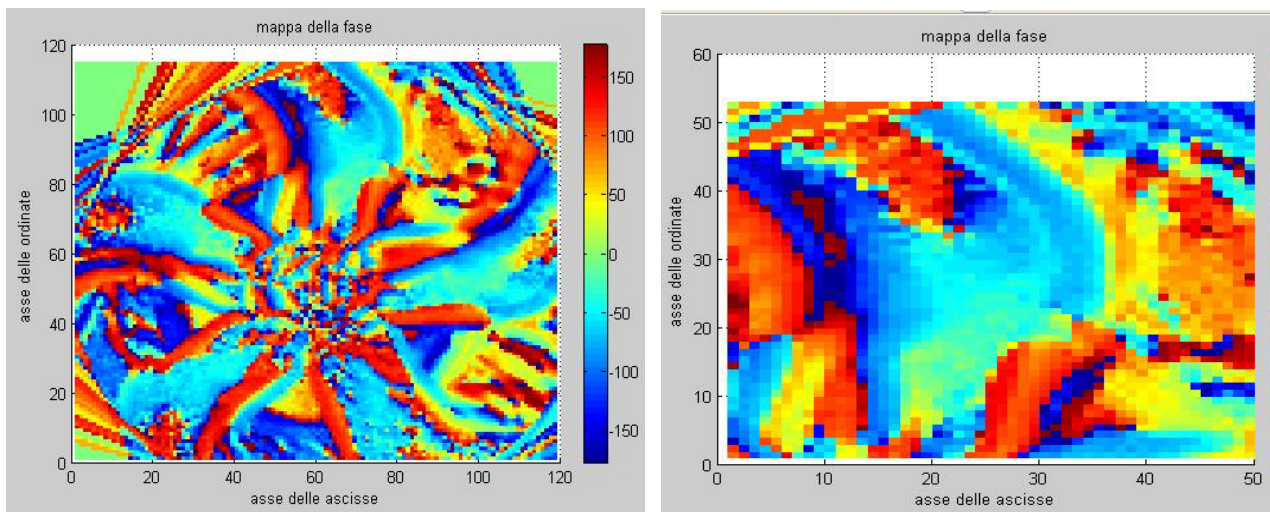
**Fig. 7.23:** mappe di tensione della ventola (a sinistra) e della pala (a destra) ottenute con il test 1.



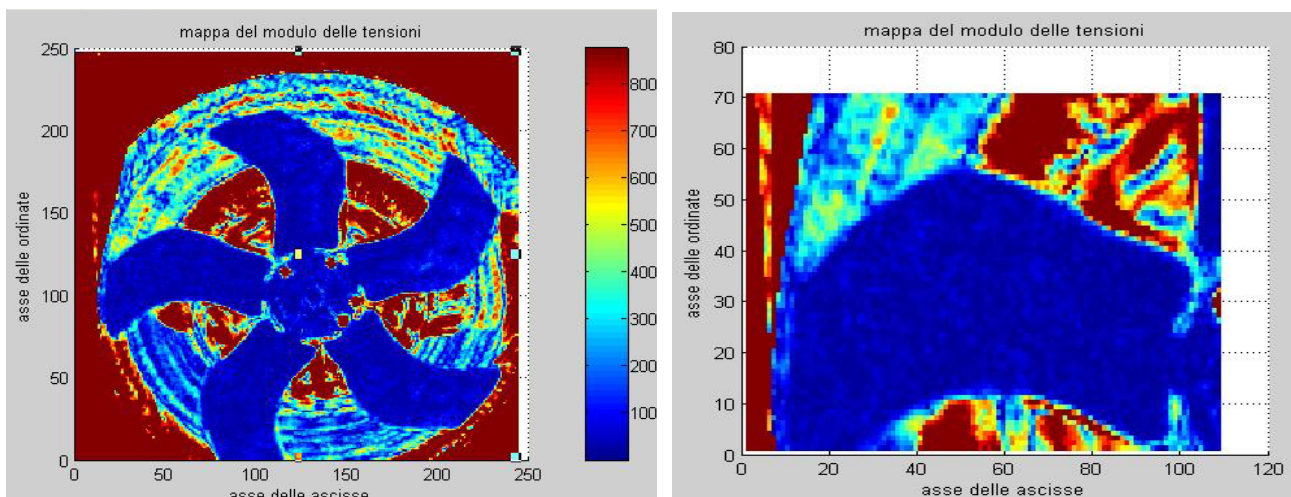
**Fig. 7.24:** mappe di fase della ventola (a sinistra) e della pala (a destra) ottenute con il test 1.



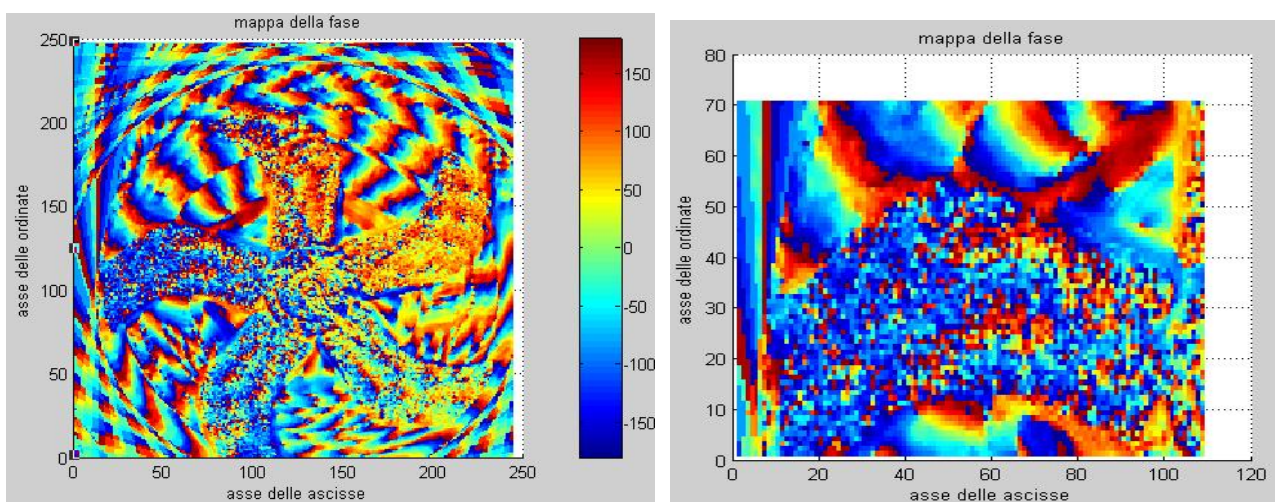
**Fig. 7.25:** mappe di tensione della ventola (a sinistra) e della pala (a destra) ottenute con il test 2.



**Fig. 7.26:** mappe di fase della ventola (a sinistra) e della pala (a destra) ottenute con il test 2.



**Fig. 7.27:** mappe di tensione della ventola (a sinistra) e della pala (a destra) ottenute con il test 3.



**Fig. 7.28:** mappe di fase della ventola (a sinistra) e della pala (a destra) ottenute con il test 3.

### 7.2.2 Analisi delle mappe termoelastiche

Confrontando le mappe termoelastiche della pala a 20 Hz e a 61 Hz è possibile notare che, in ognuna, la zona di maggior concentrazione delle tensioni, è situata sulla punta del codolo.

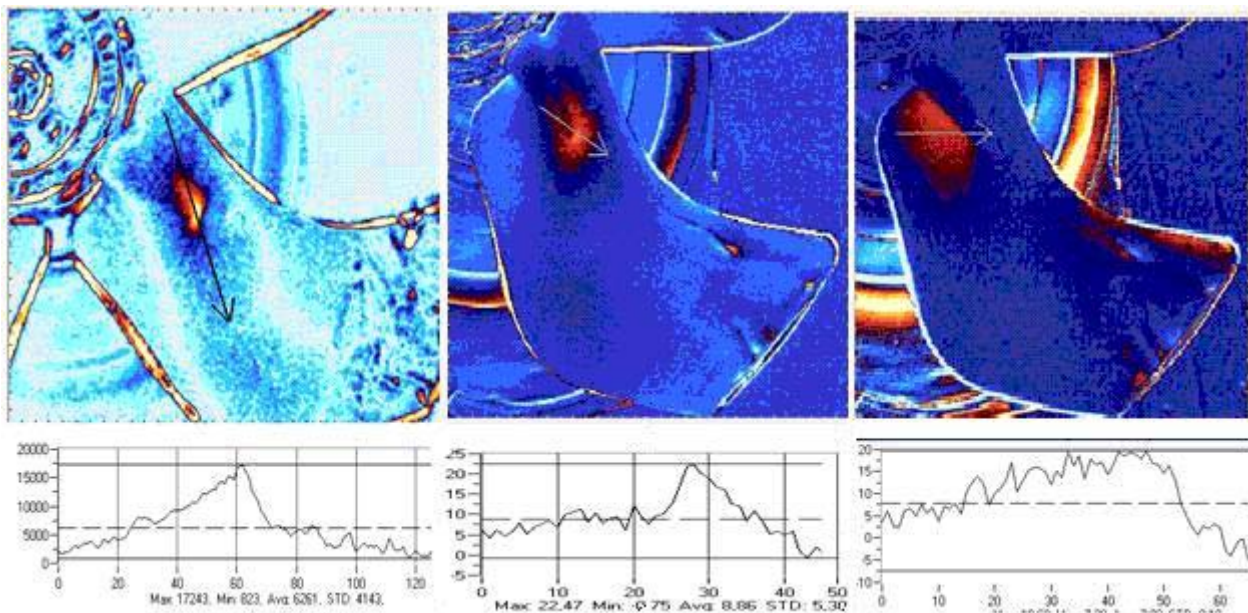
Al contrario, analizzando la mappa a 99 Hz, la zona di massima sollecitazione è sull'estremità libera della pala; si nota, inoltre, un gradiente di tensione sul lato del codolo in prossimità della punta, e dalla parte opposta rispetto alle precedenti.

Le mappe relative alla fase denotano inoltre una buona qualità dell'acquisizione termografica; ciò è evidenziato dal fatto che la fase è uniforme nella zona di massima sollecitazione e più in generale sulla pala in esame.

Analizzando complessivamente le mappe termoelastiche ottenute con elaborazione DFT e quelle tramite elaborazione lock-in, è possibile notare che nelle prime è più evidente il gradiente di tensione rispetto alle altre; ciò è confermato dal fatto che le mappe ottenute dal test 3 non hanno evidenziato nessun campo di sollecitazione (fig. 7.27).

### 7.2.3 Il confronto con le mappe ottenute con la ventola ferma

La ventola in esame, vincolata rigidamente alla testa dello shaker, è stata sollecitata alle frequenze di 20 Hz, 61 Hz e 99 Hz con la forzante di 1g. Di seguito sono riportate le mappe di stress della pala del componente in esame (fig. 7.29); su ciascuna mappa è stata tracciata una linea di interrogazione, per conoscere l'andamento delle tensioni sulla zona più sollecitata.



**Fig. 7.29: le mappe termoelastiche della pala (20 Hz a sinistra, 61 Hz al centro e 99 Hz a destra).**

Le mappe termoelastiche (v. paragrafo 7.2.1) ottenute con gli algoritmi descritti in precedenza sono state confrontate con quelle relative alla stessa ventola in posizione fissa (fig. 7.29), per vedere se effettivamente le zone di concentrazione della tensione risultavano localizzate nella medesima posizione. Dall'esame qualitativo di tali mappe, si nota che per le frequenze di 20 e 61 Hz la zona di massima sollecitazione è praticamente la stessa, così come i campi agenti sulla

pala; nella prova effettuata a 99 Hz, la zona di massimo stress in fig. 7.21 è situata sull'estremità libera della pala, si nota, inoltre, un minor gradiente di tensione su un lato del codolo, mentre in fig. 7.29 (a destra) il massimo valore è distribuito su tutto il lato. Dai test si può concludere che l'aderenza delle mappe di tensione per le forzanti con frequenze di 20 e 61 è praticamente perfetta dimostrando, quindi, la bontà del metodologia di misura sviluppata. Per sollecitazioni aventi frequenza più elevata, la metodologia può essere ancora perfezionata.

### 7.3 La scalatura delle mappe termoelastiche

Per determinare la distribuzione di tensione in MPa di una mappa termoelastica è necessario calcolare il fattore di calibrazione  $K$  definito:

$$K = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{S_{avg}} \quad (7.1)$$

dove:

$\sigma_y + \sigma_x$  = somma delle tensioni in due direzioni perpendicolari, rilevate ad esempio, da una rosetta estensimetrica;

$S_{avg}$  = valore medio dell'emissione, rilevato dal sistema termografico nella zona in cui è stato posizionato l'estensimetro.

Utilizzando le relazioni tra stress e deformazione otteniamo (7.2):

$$K = \frac{E(\varepsilon_x + \varepsilon_y)}{S_{avg}(1-\nu)} \quad (7.2)$$

dove  $E$  è il modulo di Young,  $\nu$  è il modulo di Poisson,  $\varepsilon$  è la deformazione relativa (strain).

Al fine di ottenere la mappa di tensioni scalata in MPa, è stata posizionata una rosetta estensimetrica su una zona della pala dove la tensione è uniforme. Questa mappa (fig. 7.30) è stata acquisita con la ventola fissata rigidamente alla testa vibrante dello shaker, la forzante ha frequenza pari a 20 Hz ed ampiezza di 1g; le condizioni sono le stesse del test 1.

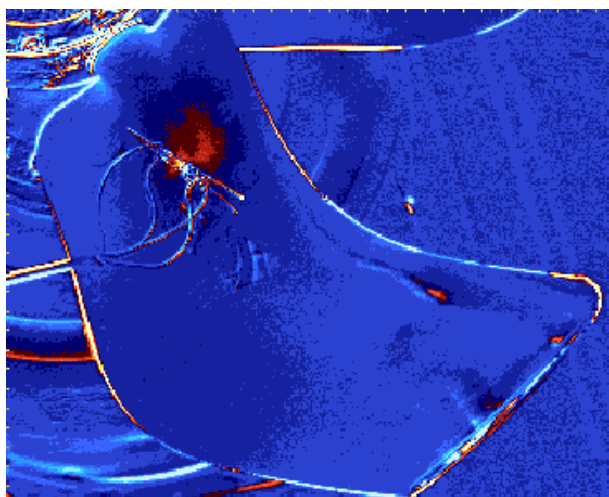


Fig. 7.30: la mappa termoelastica della pala con la rosetta estensimetrica.

Noti i valori della deformazione  $\varepsilon_x + \varepsilon_y$ , si calcola  $S_{avg}$  corrispondente alla zona dove è stata posizionata la rosetta estensimetrica e relativa alla mappa acquisita con il test 1.

Ciò è permesso dal software DeltaTherm, con cui si ricavano le coordinate dov'è la rosetta, quindi si riportano tali valori sulla mappa della pala rappresentata in fig. 7.16.

Si ottiene così la distribuzione dello stress (fig. 7.31) in MPa.

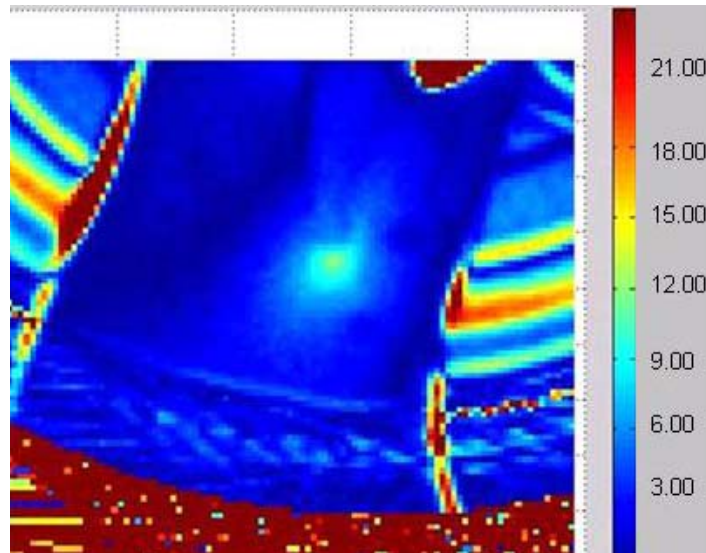
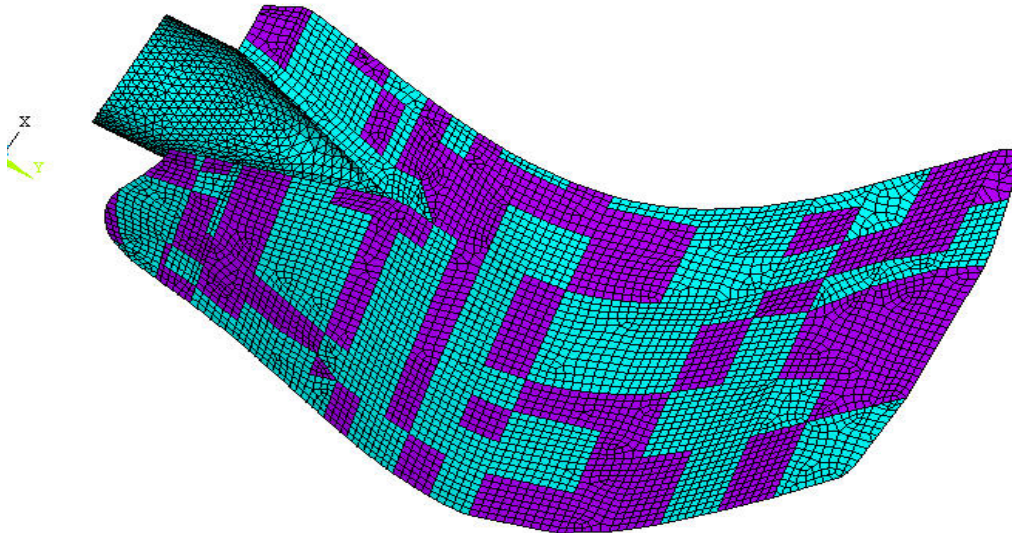


Fig. 7.31: la mappa della tensione in MPa, ottenuta nelle condizioni del test 1.

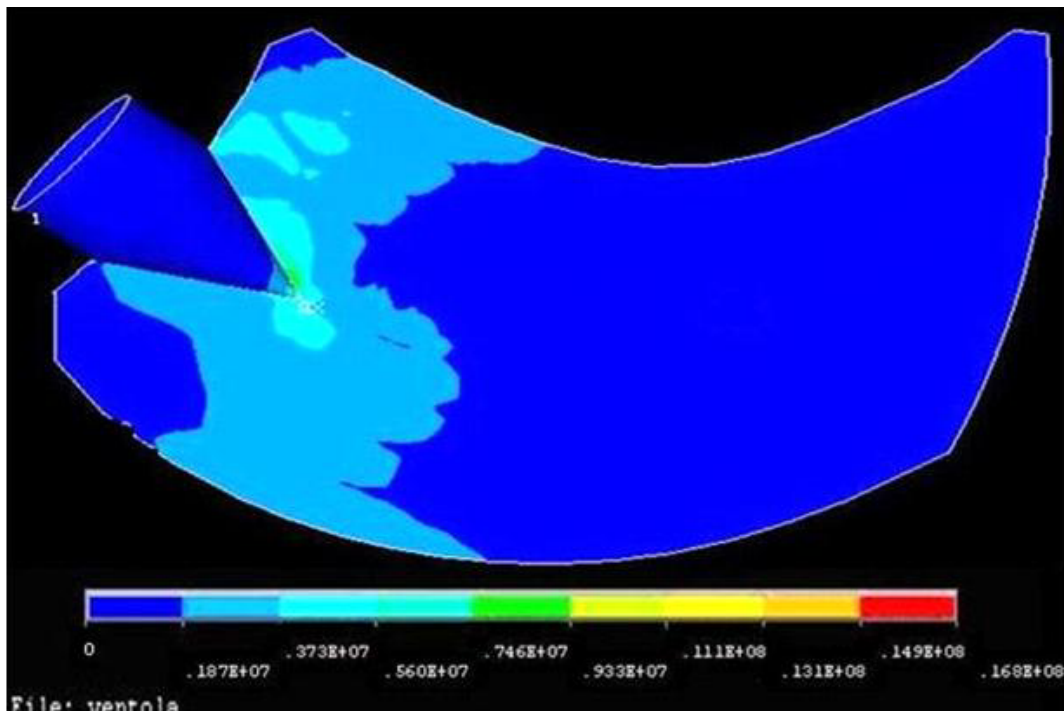
#### 7.4 Analisi della distribuzione di stress con il modello agli elementi finiti

La pala in esame è stata modellata agli elementi finiti (fig. 7.32), mediante il software Ansys. Il codolo è stato discretizzato con l'elemento SOLID 74, mentre la parte restante della pala con lo SHELL 43.

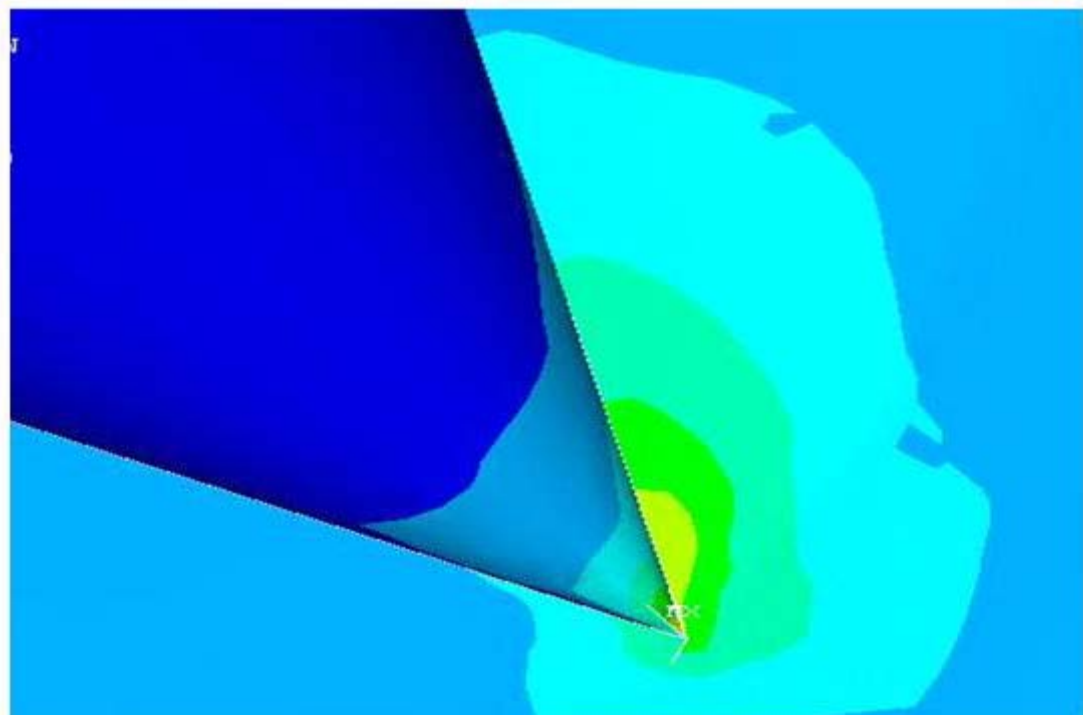


**Fig. 7.32: il modello FEM della pala.**

Per simulare le condizioni della forzante nel test 1, la pala è stata vincolata rigidamente sulla parte cilindrica del codolo, ed all'estremità opposta viene applicato un carico distribuito con risultante pari a 1.96 N (dato da:  $m = 0,2 \text{ kg}$  e  $a = 1g \text{ m/s}^2$ ) nella zona in cui è stata posizionata la massa aggiuntiva. La mappa ottenuta viene rappresentata in fig. 7.33:



**Fig. 7.33: la mappa dello stress ottenuta con il modello FEM.**



**Fig. 7.34: il particolare della zona di massima tensione: la punta del codolo.**

La zona di massimo stress (fig. 7.33 e 7.34), risulta essere la stessa di quella individuata dalla mappa termoelastica in fig. 7.16 e 7.29.

Si può, inoltre, notare che il valore massimo della tensione nel modello FEM è pari a 16,8 MPa, mentre quello fornito dall'analisi termoelastica è intorno a 15 MPa.

Si può, quindi, concludere, che la mappe di tensione sperimentale e numerica coincidono qualitativamente, mentre il modello FEM sovrastima la tensione massima rispetto all'analisi termoelastica; ciò è probabilmente dovuto alla schematizzazione geometrica della pala.

Si ritiene, perciò, necessaria una verifica sperimentale con la termoelasticità, quando è disponibile il prototipo del componente meccanico, per una validazione approfondita dei modelli numerici sviluppati.

## Conclusioni

Nel presente lavoro di tesi è stata sviluppata e verificata l'applicabilità e l'efficacia di un metodo post-processing per la compensazione del moto rigido, al fine di consentire l'analisi termoelastica degli stress su componenti meccanici.

A tale scopo è stato realizzato un banco prova che permette contemporaneamente di sollecitare e mettere in rotazione una ventola di raffreddamento per macchine movimento terra.

In questo lavoro viene messo in evidenza come l'inseguimento di marcatori termici all'interno delle immagini permetta un'opportuna compensazione dei movimenti, creando un riferimento relativo di coordinate solidale all'oggetto.

E' così possibile ricostruire la traiettoria dei punti dell'oggetto, calcolando lo spostamento del modello (riferimento relativo) rispetto ad una posizione di riferimento (assoluto).

E' stato, quindi, utilizzato un software che, basandosi sulle immagini acquisite dalla termocamera, provveda a ricostruire il movimento dell'oggetto. In uscita si ottengono nuove immagini termografiche traslate e ruotate rispetto all'originale, in modo che l'intera successione dei frame risulti allineata secondo un unico sistema di riferimento.

Riassumendo, il software in questione, denominato "Termoimage", attua le seguenti operazioni:

- a) Apertura di tutte le immagini (.txt) del filmato termico
- b) Individuazione dei marker su ognuna di esse
- c) Calcolo, per ognuna delle immagini, della rotazione e della traslazione rispetto ad una posizione nota
- d) Calcolo dell'ingombro massimo dell'intera successione delle immagini
- e) Calcolo dell'ingombro massimo dei punti completi dell'intera successione delle immagini
- f) Scrittura delle immagini compensate nel movimento su file di testo (.txt).

L'elenco di immagini termiche prodotte costituisce il punto di partenza per una successiva indagine sullo stato delle tensioni mediante i metodi basati sull'analisi dei segnali.

Dall'elaborazione successiva delle immagini riallineate è stato possibile verificare l'efficacia del metodo, confrontando le tensioni rilevate sulla pala ferma con quelle ricavate via software relative alla pala in movimento.

In conclusione, quindi, mediante il software di inseguimento delle immagini ed i programmi in ambiente Matlab, appositamente sviluppati per l'analisi dei segnali, si possono individuare le zone di massima sollecitazione dell'oggetto in moto casuale.

Il passo successivo riguarda lo sviluppo di algoritmi per l'elaborazione dei filmati termici compensati, con l'obiettivo di ridurre sostanzialmente i tempi di calcolo e mantenere lo stesso livello di accuratezza.

Un altro aspetto, che vale la pena di affrontare, tratta l'integrazione di sistemi meccanici (v. appendice 4) per la compensazione del movimento con quello software.

L'obiettivo di tale lavoro è ampliare il campo di indagine sperimentale mediante termoelasticità, a componenti meccanici, che in condizioni di lavoro ruotano a velocità elevate.

Quanto detto è di notevole interesse, e apre nuovi scenari nell'ambito dell'ingegneria sperimentale.

## **Appendice 1**

### **NORMATIVE EUROPEE SUI MISURATORI**

#### **Introduzione**

In base alla "Proposta di Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio" 2000/0233 (COD), uno strumento di misura deve garantire un elevato livello di tutela metrologica affinché le parti possano reputare affidabile il risultato della misurazione; la progettazione e la fabbricazione dello strumento di misura debbono essere perciò di elevata qualità.

In questo capitolo sono definiti i requisiti che uno strumento di misura deve possedere per rispettare tali norme. Al termine del capitolo viene inoltre descritta, in maniera minuziosa, la procedura di prova adottata per caratterizzare il contatore di acqua oggetto della tesi.

#### **1.1 Requisiti**

##### **1.1.1 Errori tollerati**

- 1) In condizioni di funzionamento nominali e di assenza di disturbi, l'errore di misurazione non deve superare il valore massimo tollerato, riportato nei requisiti specifici relativi allo strumento in questione. Salvo indicazione contraria, l'errore massimo tollerato è espresso come valore bilaterale dello scarto rispetto al valore di misurazione effettiva.
- 2) In condizioni di funzionamento nominali e in presenza di disturbo, i requisiti di prestazione di uno strumento devono corrispondere a quanto riportato nei requisiti specifici relativi allo strumento in questione.
- 3) Il fabbricante deve specificare gli ambienti climatici, meccanici ed elettromagnetici in cui lo strumento è destinato ad essere impiegato, tenendo conto dei requisiti in materia di condizioni di funzionamento riportati nei requisiti specifici relativi allo strumento in questione.

Gli ambienti climatici e meccanici sono suddivisi in classi da A ad I conformemente a quanto descritto qui di seguito.

##### **C: ambienti climatici**

Gli ambienti climatici previsti dalla Normativa sono i seguenti:

C1-La presente classe si applica a luoghi chiusi in cui la temperatura è costantemente controllata. L'umidità non è controllata. Per mantenere le condizioni richieste si ricorre, se del caso, al riscaldamento, al raffreddamento o all'umidificazione. Gli strumenti di misura possono essere esposti alla radiazione solare, a radiazioni termiche e alla circolazione dell'aria ambiente provocata dal sistema di condizionamento dell'aria o da finestre aperte; essi generalmente non si considerano esposti ad acqua di condensazione, a precipitazioni o a depositi di ghiaccio.

## Appendice 2

### GENERALITA' SULLA MISURA DI PORTATA

#### Introduzione

In quest'appendice si intende fornire una panoramica sui misuratori di portata di fluidi, utilizzati nel presente lavoro, evidenziandone le attuali prestazioni in termini di applicabilità, precisione e campi di lavoro.

Negli ultimi anni nel campo delle misure di portata si stanno migliorando le metodologie di misura già note, ed inoltre si stanno sperimentando nuove tecniche.

Infatti nei tradizionali misuratori a strozzamento si sta sempre più affermando la tecnica digitale a microprocessore per il trattamento ed il condizionamento dei segnali forniti dagli elementi primari di misura, al fine di correggerli dal variare dei fattori che ne influenzano l'esercizio: pressione, temperatura, viscosità, ecc.

Nelle altre tipologie di misuratori il microprocessore è ancor più presente perché consente, da un lato, l'applicazione di principi di misura, che richiedono particolari elaborazioni sui segnali provenienti dai sensori e, dall'altro, permette di adottare un display l'acquisizione dei dati per la visualizzazione del valore misurato sempre più flessibile. Accanto ai misuratori tradizionali verrà trattato quello magnetico di nuova generazione.

#### 2.1 Descrizione generale

Spesso nelle applicazioni si deve misurare la quantità di flusso totale che passa attraverso una conduttura o una tubazione, a questo scopo sono stati sviluppati un gran numero di strumenti, detti appunto misuratori di portata.

Alcuni di essi risalgono alla misura dell'efflusso totale misurando la velocità del fluido in modo puntuale e facendo delle opportune ipotesi sulla conformazione del profilo di velocità.

La conformazione del profilo di velocità del fluido è fondamentale nella misura di portata, infatti fornisce la relazione matematica tra la velocità puntuale misurata dal sensore e la velocità media del flusso nel condotto, sia perché influenza la precisione della misura in funzione delle condizioni di esercizio come: cambiamento di regime del moto (laminare o turbolento), profilo influenzato da organi perturbanti (valvole, restrizioni, deviazioni, ecc.), variazione dei parametri fisici del fluido (viscosità, massa volumica, ecc.). Noto il reale profilo della

velocità e quindi la velocità media del flusso, la portata volumica [  $m^3$  /tempo] è direttamente proporzionale all'area di efflusso, generalmente nota con notevole precisione, mentre la portata massica [Kg /tempo], derivabile dalla portata volumica, è direttamente proporzionale alla massa volumica del fluido che solitamente è nota con minore precisione perché dipende da diversi parametri chimici e fisici (composizione molecolare, pressione, temperatura, ecc.). Queste ultime considerazioni hanno portato i ricercatori a studiare dispositivi di misura basati su

leggi diverse, sia cinematiche di velocità, sia dinamiche di forza e quindi di massa, oppure a utilizzare le stesse leggi cinematiche in congiuntura con quelle dinamiche di massa.

Alcune volte può essere richiesta la misura del flusso transitato in un determinato intervallo di tempo  $[m]$  o  $[Kg]$ , ciò richiede l'integrazione rispetto al tempo della portata istantanea. Tale integrazione è realizzata in diversi modi, alcune volte può essere una parte integrante del misuratore stesso, altre volte può essere realizzata da un integratore multifunzione più o meno distante dal misuratore di portata.

### **2.1.1 Misuratori di portata volumetrici**

Questi misuratori sono, in realtà, dei motori volumetrici per fluidi in cui l'attrito e l'inerzia sono stati ridotti al minimo e fatti funzionare come macchine operatrici.

Il principio di funzionamento si basa sul costringere il flusso di fluido ad attraversare camere di volumi e dimensioni predefinite che si riempiono e si svuotano ciclicamente, producendo come effetto la rotazione di un albero.

Tale rotazione viene rilevata da una testata totalizzatrice che addiziona il numero di giri e indica il volume totalizzato.

Tali strumenti, rimasti invariati come costruzione (a palette, ruote ovali, a pistoncini, ecc.), hanno migliorato ultimamente il metodo di rilievo del numero dei giri dell'albero, passando da meccanico ad ingranaggi ad elettronico a dinamo tachimetrica, ad effetto Hall, ecc. La precisione tipica raggiunta da tali dispositivi è di circa: 0,1 - 0,2 % per i liquidi 0,2 - 0,3 % per i gas in un range di misura tipici di: 10 - 20 : 1 per i misuratori a palette e ruote ovali 50 - 100 : 1 per i misuratori a pistoncini essendo abbastanza insensibili al regime del fluido, alla sua viscosità e alla distorsione dei profili di velocità in entrata ed in uscita.

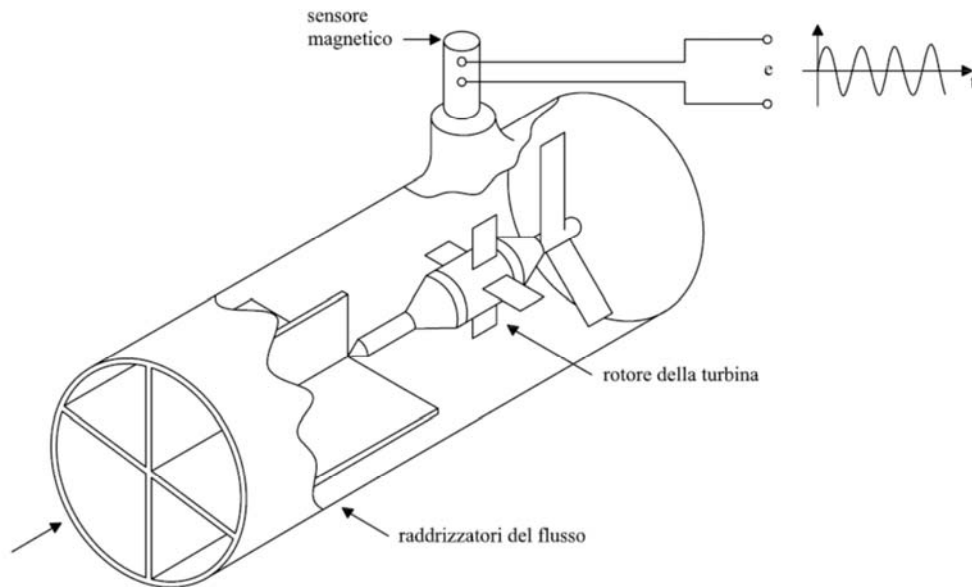
### **2.1.2 Misuratori a turbina**

La denominazione misuratori a turbina deriva dal loro stesso principio di funzionamento che è di tipo cinetico.

La bibliografia fa risalire l'utilizzo dei primi misuratori a turbina per liquidi e gas a partire dai primi anni '50. All'inizio sembra non abbiano trovato un grande consenso tra gli esperti del settore di quei tempi perchè considerati strumenti dall'avvenire incerto e di breve durata.

In realtà l'affidabilità, gli ampi campi di misura, la precisione ed il favorevole rapporto costo/prestazioni offerto dai misuratori a turbina hanno fatto sì che anche questi misuratori trovassero presto una loro importante nicchia di mercato.

A comprova del crescente interesse dimostrato dagli utilizzatori verso questi misuratori, proprio i comitati ASME, ISA e API, riuniti i maggiori esperti mondiali sulle misure di portata, per primi hanno elaborato delle Normative ben precise sul loro impiego, riconoscendo così anche a questi misuratori un ruolo importante e fondamentale nelle diverse applicazioni industriali. Si ricorda, tra le altre, il largo utilizzo che trovano nell'industria petrolifera. Di semplice costruzione, si presentano come un tronchetto di tubo flangiato o filettato entro il quale si trovano: il rotore o turbina propriamente detta sul cui anello esterno sono montati dei magnetini permanenti, l'albero del rotore che poggia su cuscinetti e i diffusori per condizionare il fluido a monte e a valle del rotore (fig. 2.1).



**Fig. 2.1: schema del misuratore a turbina.**

Il fluido da misurare interagisce con le palette della turbina impartendo loro una forza tale da farla girare attorno ad un asse parallelo alla direzione del fluido.

Le palette sono del tipo ad elica per ridurre il problema della separazione del fluido dalla loro superficie, evitando il fenomeno della cavitazione su applicazione per liquidi, mentre i diffusori a monte e a valle del rotore provvedono al condizionamento del fluido.

Il modello analitico di questo misuratore più semplice ipotizza un flusso monodimensionale e un rotore che non dia coppie, il cui effetto è quello di produrre ritardi.

In questo caso, poiché la sezione di passaggio è fissa, la velocità di rotazione della turbina  $\omega$  è direttamente proporzionale alla velocità del fluido  $V$  (2.1) che passa:

$$\omega = \frac{(V \tan \beta)}{r} \quad (2.1)$$

dove:

$\beta$  = angolo formato tra la pala e la direzione del vettore di velocità di flusso;

$r$  = raggio delle palette del rotore;

Per un flusso monodimensionale, la velocità del fluido ( $V$ ) e la portata volumetrica ( $Q$ ) sono proporzionali, così è possibile prevedere che la velocità del rotore sarà proporzionale alla portata.

Modelli più dettagliati, comprendenti gli effetti trascurati, portano a conclusioni più complicate ma che non ne modificano sostanzialmente i risultati.

La velocità di rotazione della turbina viene rilevata conteggiando il passaggio di ciascuna paletta davanti al pick-up magnetico che opera sul principio della riluttanza variabile, ed altro non è che una bobina avvolta attorno ad un magnete permanente il tutto opportunamente sigillato e montato esternamente al corpo della turbina.

Quando le palette e quindi i magnetini passano davanti al pick-up, generano una variazione del campo magnetico inducendo una tensione impulsiva ai capi della bobina, la cui frequenza (impulsi per unità di tempo) è direttamente proporzionale alla velocità di rotazione della turbina.

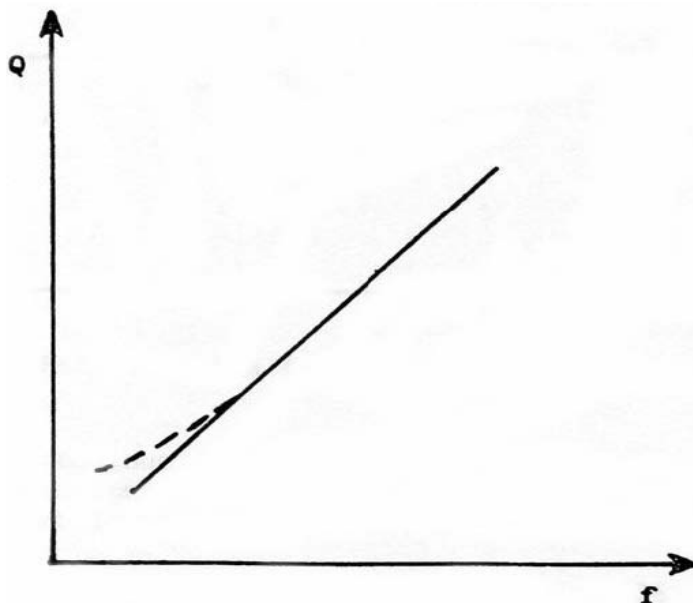
La frequenza degli impulsi generati è legata, come spiegato in

precedenza, alla portata istantanea, mentre, il numero totale degli impulsi conteggiati rappresenta il volume totalizzato.

$$f = \frac{\text{impulsi}}{\text{tempo}} \quad (2.2)$$

Mentre la portata istantanea ( $Q$ ) è data dalla seguente relazione (2.3):

$$Q = \frac{\text{Volume}}{\text{tempo}} \quad (2.3)$$



**Fig. 2.2: relazione tra la portata istantanea ( $Q$ ) e frequenza degli impulsi ( $f$ ).**

Dalla fig. 2.2, rappresentante la relazione funzionale tra la portata ( $Q$ ) e la frequenza degli impulsi ( $f$ ) che si determina da taratura, è facilmente ricavabile il fattore  $K$  della turbina (2.4):

$$K = \frac{60 \cdot f}{Q} \quad (2.4)$$

dove:

$K$  = impulsi/unità di volume;

$f$  = impulsi/secondo;

$Q$  = litri/minuto;

60 = coefficiente per portata in 1/minuto;

Il fattore ( $K$ ) della turbina è il parametro caratterizzante le prestazioni della turbina stessa: il suo valore ne condiziona la capacità di misura mentre la sua costanza ne caratterizza l'applicazione in un certo campo d'impiego. La fig. 2.3 evidenzia come varia il fattore della turbina ( $K$ ) con la frequenza degli impulsi ( $f$ ), cioè nel campo di misura della turbina.

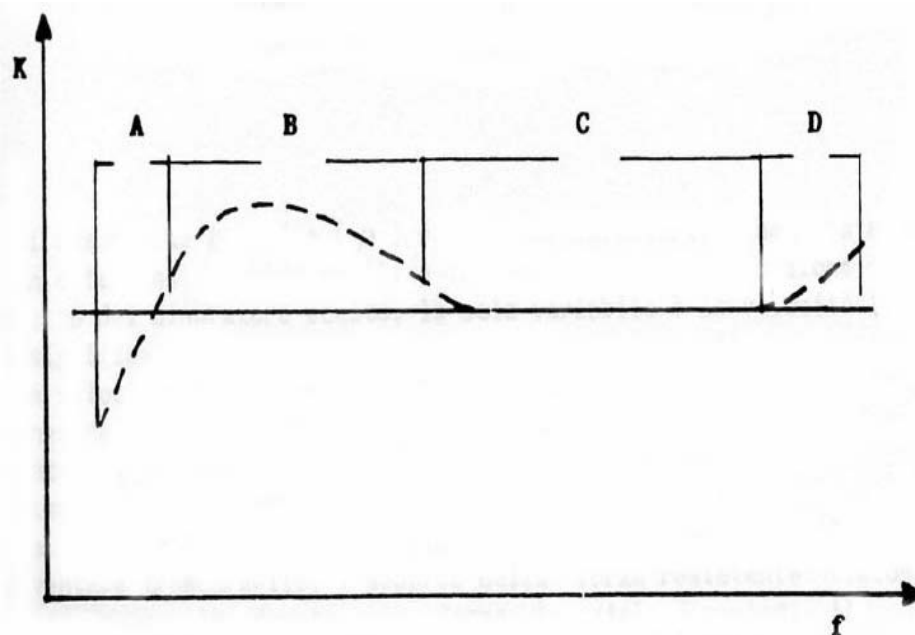


Fig. 2.3: legame tra il fattore di taratura della turbina K e la frequenza (f).

La linea continua nelle fig. 2.2 e fig. 2.3 rappresenta la caratteristica ideale del misuratore, condizione raggiungibile solo con fluido in regime turbolento e con attriti meccanici della turbina praticamente nulli.

La curva tratteggiata rappresenta invece le reali condizioni di funzionamento, in particolare la fig. 2.3 evidenzia i segmenti A, B e C che si riferiscono ai tre tipici moti di efflusso (laminare A, transizione B e turbolento C) rappresentati in fig. 2.4.

Le due principali forze che agiscono e che condizionano il funzionamento della turbina sono le seguenti:

- la forza dinamica dovuta alla massa del fluido fluente espressa dalla formula:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left( \frac{V^2}{l} \right)$$

- la forza dovuta alla viscosità del fluido espressa dalla formula:

$$\mu \cdot \frac{V}{l}$$

dove:

$\rho$  = massa volumica del fluido;

$V$  = velocità del fluido;

$\mu$  = viscosità (dinamica) del fluido;

$l$  = lunghezza della paletta;

Se si assume che ( $\rho$ ) e ( $\mu$ ) sono delle caratteristiche costanti di un determinato fluido e ( $l$ ) è un valore fisso in funzione del diametro del misuratore scelto, la sola variabile è la velocità ( $V$ ).

Ciò significa che un aumento della portata, e quindi un aumento della velocità, determina come risultante un aumento alla seconda potenza della forza dinamica e alla prima potenza della forza resistente.

Il risultato finale che si ricava dal rapporto tra le due forze, è che aumentando la velocità del fluido diminuisce sempre più, fino a diventare trascurabile, l'apporto della forza resistente viscosa rispetto a quello dovuto alla forza dinamica-inerziale, ciò evidenzia una migliore applicabilità dei misuratori a turbina ad elevata velocità, ovvero in regime turbolento.

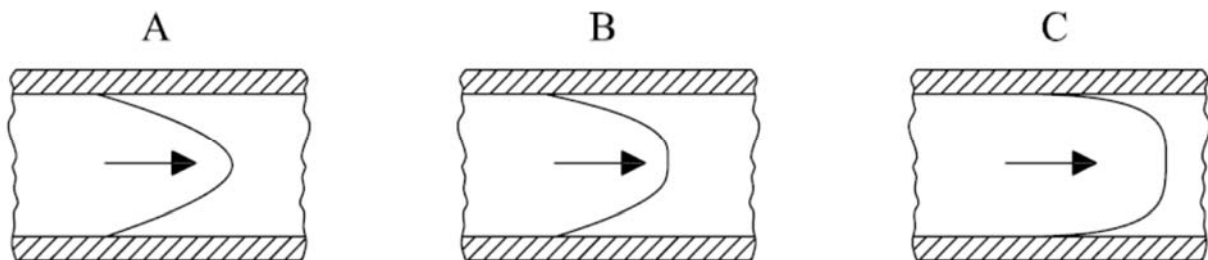
Il parametro che caratterizza il regime di efflusso dei liquidi è il Numero di Reynolds:

- sotto 2000: il regime è laminare;
- da 2000 a 10000: il regime è di transizione;
- oltre 10000: il regime è turbolento;

Per ottenere una misura entro i limiti di incertezza, è essenziale che la velocità di rotazione della turbina sia proporzionale alla velocità del fluido (condizione che si verifica quando l'energia assorbita dalle forze resistenti, quali l'attrito meccanico e l'attrito fluido, ovvero la viscosità, sono trascurabili): per questo i misuratori a turbina operano in regime di moto turbolento, condizione che si verifica tipicamente per Numero di Reynolds superiore a 10000.

Bisogna però tener presente che, oltre un certo elevato Numero di Reynolds (condizioni però difficilmente raggiungibili nelle applicazioni pratiche), esiste il segmento di funzionamento D, rappresentato in fig. 2.6, che delimita il campo di funzionamento ottimale della turbina nel campo del segmento C, nel quale si evidenzia la migliore costanza e linearità del fattore ( $K$ ).

Nella fig. 2.7 è rappresentato il profilo di velocità del fluido in regime laminare (fig. 2.4-A), nella zona di passaggio da regime laminare a turbolento (fig. 2.4-B) e in regime turbolento (fig. 2.4-C); quest'ultima condizione è generalmente associata a bassa viscosità o a elevata velocità.



**Fig. 2.4: profilo di efflusso di fluidi in regime.**

dove:

- (A) - *laminare*
- (B) - *transizione*
- (C) - *turbolento*

In regime laminare l'effetto della viscosità e degli attriti degradano considerevolmente le caratteristiche di linearità (fig. 2.3) dei misuratori a turbina.

### **2.1.3 Misuratori a turbina a getto unico e a getto multiplo**

Come abbiamo visto nel paragrafo precedente tutti i contatori a turbina sfruttano il teorema di Bernoulli, secondo il quale il prodotto della velocità per la sezione è costante per un fluido incompressibile. Il tipico problema che si presenta nei contatori d'acqua per uso domestico è dovuto alla deposizione di sedimenti all'interno dei condotti, che riducono la sezione utile del flusso con conseguente aumento della velocità dell'acqua.

Sono state sviluppate diverse tecnologie per ovviare a tale inconveniente. Le componenti principali di cui è composto un misuratore di portata sono l'orologeria, l'interfaccia di trasmissione e l'elemento di misura. L'orologeria può essere di tipo:

#### **Extra dry**

Vantaggi:

- Nessun deposito nei ruotismi
- Orientabilità
- Consente la telelettura di tipo avanzato (senza magneti)

Svantaggi:

- Condensazione sul display
- Accoppiamento magnetico

#### **Rulli protetti**

Vantaggi:

- Relativa semplicità
- Rulli protetti da depositi
- Trasmissione meccanica

Svantaggi:

- Ruotismi in acqua
- Non orientabile
- Telelettura con magneti

#### **Bagnato**

Vantaggi:

- Semplicità
- Trasmissione meccanica

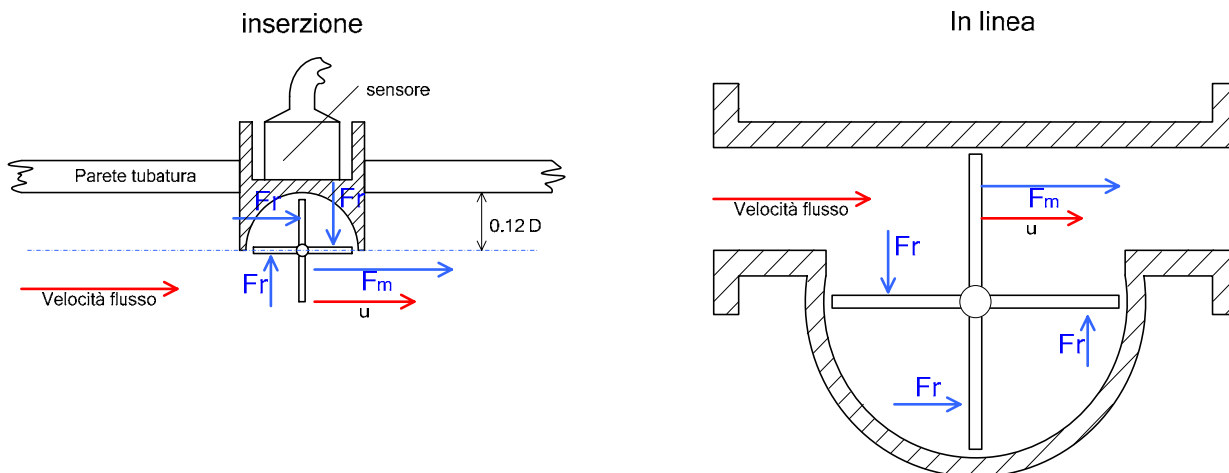
Svantaggi:

- Rotismi in acqua
- Non orientabile
- Telelettura con magneti

I contatori possono essere a getto unico o a getto multiplo. I contatori

a getto unico presentano queste caratteristiche:

- Minime zone di accumulo depositi
- Basso numero di componenti utilizzati
- Ridotte dimensioni
- Velocità di rotazione più elevata
- E' richiesta un'elevata accuratezza per il montaggio dei componenti



**Fig. 2.5: contatore a getto unico.**

I contatori a getto unico sono sollecitati in maniera asimmetrica, che provoca un usura del perno.

Un contatore a getto multiplo presenta queste caratteristiche:

- Bassa velocità di rotazione
- Componenti robusti
- Usura ridotta
- Poca influenza delle condizioni di montaggio

In questa tipologia di contatore le palette della turbina sono colpite da getti di acqua in maniera simmetrica; anche in questo caso si verifica l'usura del perno.

#### **2.1.4 Criteri di installazione e normative di riferimento**

Prima di installare in linea un misuratore a turbina, è consigliabile inserire al suo posto un pezzo di tubo ed effettuare un adeguato flussaggio nella tubazione così da rimuovere eventuali materiali estranei.

In generale è buona pratica installare a monte della turbina un filtro di protezione, che assicuri un grado di filtraggio tale da evitare che le particelle solide, materiali fibrosi ed altro possano danneggiare il rotore o ridurre l'area di passaggio aumentando quindi la velocità del fluido.

Il tipo di filtro, generalmente da 20 a 80 mesh (200-800  $\mu\text{m}$ ), e la sua capacità di filtraggio vanno scelti principalmente in funzione delle caratteristiche del fluido da misurare.

Altrettanto importante è eliminare la presenza d'aria che passa attraverso il misuratore per essere sicuri che la turbina misuri soltanto la portata d'acqua e non l'aria intrappolata.

Tutto questo può essere evitato installando a monte della turbina un degasatore; lo stesso filtro può essere dotato di tale dispositivo.

Le prestazioni dei misuratori a turbina sono sensibili ai vortici e al non uniforme profilo della velocità del fluido causato, a monte e a valle del misuratore, da: valvole, filtri, gomiti ed ostruzioni varie.

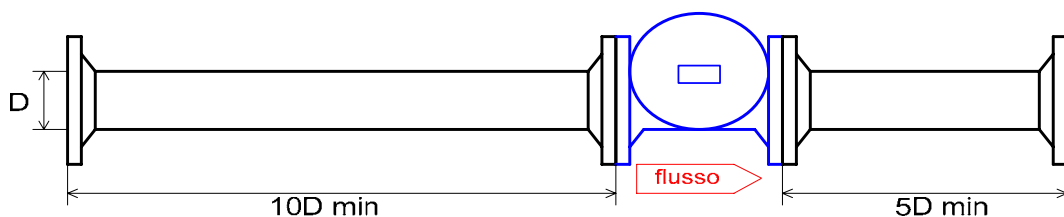
Per ovviare a questi inconvenienti e quindi assicurare l'esatto profilo della velocità la Norma API 2534 consiglia l'installazione della turbina a valle di un tratto di tubo rettilineo di lunghezza almeno 10 volte il

diametro e di un tratto di tubo rettilineo della lunghezza di 5 volte il diametro della turbina a valle della stessa, oppure l'installazione di un raddrizzatore di filetti fluidi immediatamente a monte della turbina e di un tratto rettilineo a valle della lunghezza pari a 5 volte il diametro della tubazione.

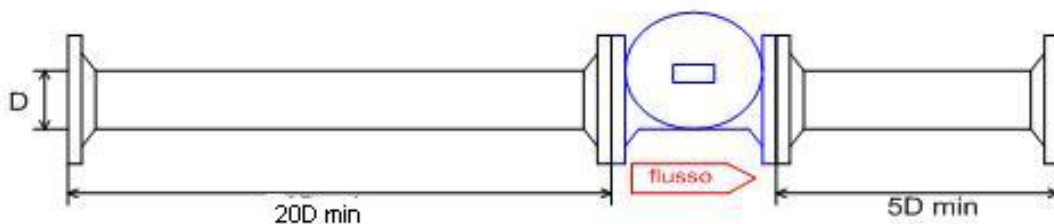
La norma raccomanda che il raddrizzatore sia realizzato con un insieme di tubi convogliatori di lunghezza pari a 2 o 3 volte il diametro della tubazione.

Il fascio di tubi convogliatori va dimensionato utilizzando degli spezzoni di tubo di diametro nominale tale che il rapporto  $B/d$  sia almeno di 10/1.

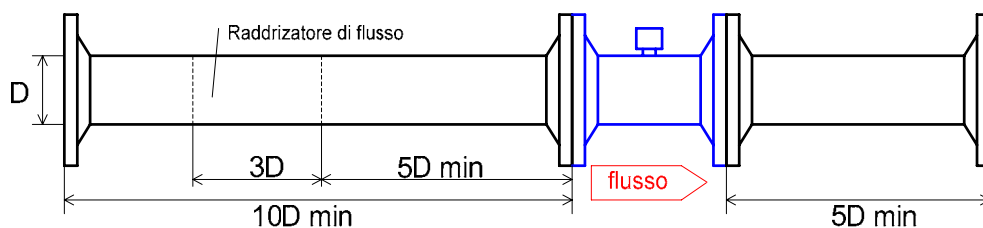
Nelle figure 2.6, 7, 8 è rappresentato lo schema tipico di installazione di un misuratore a turbina con soli tratti di tubo rettilinei a monte e a valle oppure con raddrizzatore di filetti. Inoltre in figura 2.9 è rappresentato come viene realizzato costruttivamente il raddrizzatore di filetti.



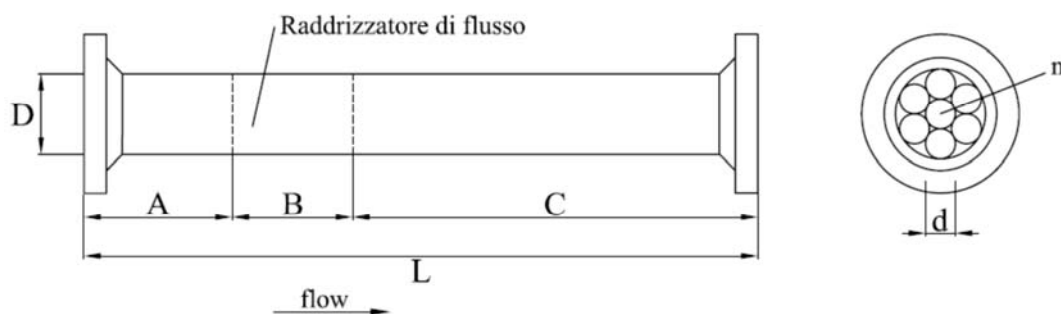
**Fig. 2.6: minimo tratto rettilineo richiesto a monte della turbina espresso in diametri nominali della tubazione in presenza di valvole completamente aperte e/o coni di riduzione.**



**Fig. 2.7: Tratto rettilineo richiesto a monte della turbina per tubazioni con curva a largo raggio.**



**Fig. 2.8: Schema tipico di installazione del raddrizzatore.**



**Fig. 2.9: realizzazione del raddrizzatore di filetti fluidi.**

### **Legenda**

- L = lunghezza del raddrizzatore (= 10 D minimo)
- A = lunghezza a monte (= 2-3 D)
- B = lunghezza tubi convogliatori (= 2-3 D)
- C = lunghezza a valle (=5D)
- D = diametro nominale tubazione
- N = numero tubi convogliatori (almeno 4)
- d = diametro nominale tubi convogliatori ( B/d almeno 10/1)

Una volta rispettate le Norme per una corretta installazione ed un adeguato filtraggio, i misuratori di portata a turbina garantiscono, se correttamente selezionati per la loro massima e minima portata di esercizio e massima pressione nominale, una elevata accuratezza di misura  $\pm 0,25\%$  e di ripetibilità  $\pm 0,05\%$ , caratteristiche essenziali sia per misure fiscali e di bilancio di impianti.

Oltre all'accuratezza della misura e all'ottima ripetibilità ed affidabilità, questi misuratori sono adatti per le alte pressioni di esercizio, infatti avendo lo stesso diametro della tubazione, producono basse perdite di carico.

### **2.1.5 Misuratori di portata elettromagnetici**

#### **• Introduzione**

La tecnologia della misura di portata ad induzione elettromagnetica (fig. 2.10) a quattro decenni dalla sua nascita, si presenta completamente rinnovata pur basandosi sul medesimo principio fisico.

In questi anni a fasi successive sono state introdotte una serie di innovazioni che hanno reso lo strumento preciso, affidabile, facile da installare, in grado di soddisfare condizioni di processo diversificate.

In ordine cronologico sono state le seguenti:

- ⇒ Bobine realizzate per produrre un campo magnetico disomogeneo in grado di determinare la media reale della velocità del fluido.
- ⇒ Alimentazione delle bobine con corrente continua pulsante per eliminare disturbi elettrici e l'autotaratura del valore di zero.
- ⇒ Esecuzione compatta per montaggio wafer.
- ⇒ Nuovi rivestimenti del tubo di misura.
- ⇒ Convertitore a microprocessore con collegamento seriale.

⇒ Misuratori con risposta veloce.

⇒ Misuratori senza elettrodi con pick-up capacitivo.

I misuratori elettromagnetici sono divenuti gli standard di misure industriali quando il processo ha esigenza di precisione, resistenza chimica e soprattutto affidabilità.

Di questa tipologia di misuratori saranno illustrati i limiti di applicabilità, una guida alla selezione, la precisione, la procedura di taratura, e le modalità d'installazione.

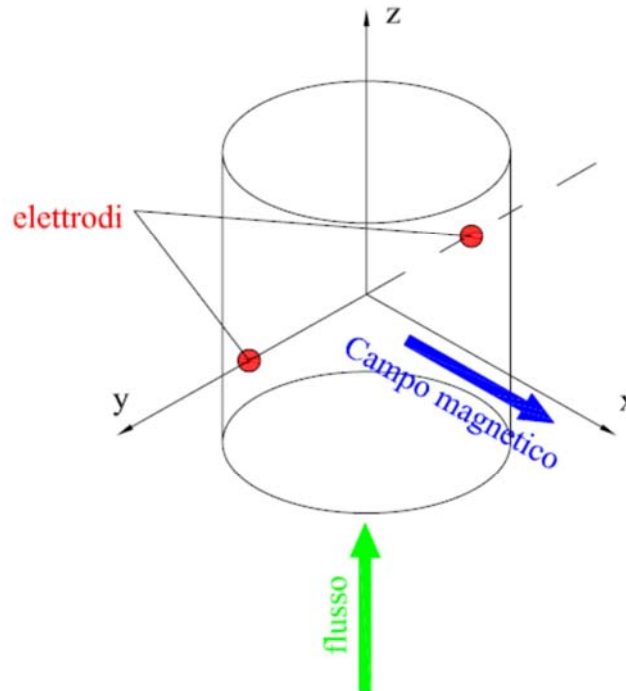


Fig. 2.10: schema del misuratore di portata elettromagnetico.

#### • Principio di funzionamento

I misuratori di portata elettromagnetici (EMF) nel decennio passato hanno progressivamente sostituito, in parecchie applicazioni, i tradizionali sistemi di misura della portata di liquidi, basati su strozzamenti e misura della pressione differenziale. Le ragioni del successo ottenuto sono da ricercarsi sia nelle loro caratteristiche, sia nella progressiva riduzione del loro costo.

Il principio di funzionamento si basa sulla legge dell'induzione di Faraday: se un conduttore di lunghezza ( $l$ ) si muove con una velocità trasversale ( $v$ ) attraverso un campo magnetico ( $B$ ), verranno prodotte delle forze sulle particelle cariche del conduttore. Quindi vengono indotti un gradiente di potenziale attraverso il conduttore e una differenza di potenziale ( $e$ ) tra le due estremità che è espressa tramite relazione (2.5):

$$e = B l v \quad (2.5)$$

dove:

$B$  = intensità del flusso di campo [ $\text{Wb/m}^2$ ]

$l$  = lunghezza del conduttore [m]

$v$  = velocità del conduttore [m/s]

Se le estremità del conduttore vengono collegate a un circuito esterno stazionario rispetto al campo magnetico, la tensione indotta produrrà un flusso di corrente ( $i$ ); tale flusso di corrente attraverso il conduttore mobile, di resistenza ( $R$ ), causa una caduta di potenziale  $iR$ , così la tensione ai capi del conduttore è pari a  $e - iR$ .

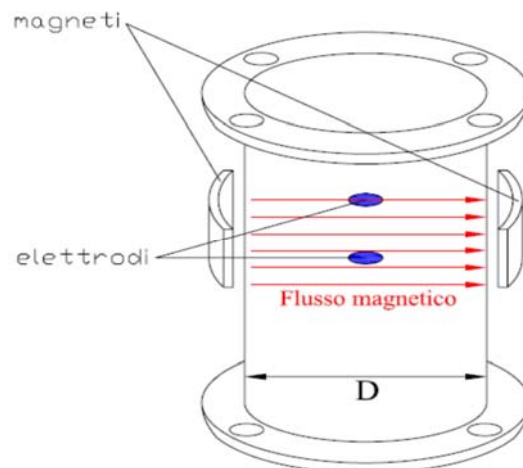
La stessa cosa accade considerando un flusso cilindrico con profilo di velocità uniforme che attraversa un campo magnetico, se il liquido è un conduttore elettrico. Gli ioni positivi e negativi vengono spostati agli estremi del getto originando una differenza di potenziale pari a (2.6):

$$e = B D_p v \quad (2.6)$$

dove ( $D_p$ ) è il diametro del getto.

Una volta nota la resistenza ( $R$ ) dell'apparato è possibile calcolare la velocità del flusso, e quindi la portata, stimando la caduta di potenziale che avviene agli estremi del getto.

Il campo magnetico, protetto da apposita schermatura, viene generato da bobine poste all'esterno del tubo di misura, che è rivestito da materiale isolante. Il segnale viene rilevato in gran parte dei sistemi per mezzo di elettrodi metallici inseriti nel rivestimento oppure con rilevazione di tipo capacitivo, che non presenta pertanto elettrodi a diretto contatto con il fluido. Poiché il tubo di misura ha dimensione nota, la misura della velocità media all'interno di esso è direttamente correlabile con la misura della portata (fig. 2.11). Dato che le velocità nei singoli punti possono essere differenti ed il profilo del flusso disomogeneo ed asimmetrico, è ovvio che è cosa della massima importanza determinare la media delle velocità reali.



**Fig. 2.11: elementi fondamentali e principio di misura.**

Per questo scopo la prima evoluzione, che si è avuta indicativamente negli anni '60, è stata la realizzazione di strumenti con bobine particolari, cioè in grado di generare un campo magnetico disomogeneo e l'introduzione nella misura della velocità media del fattore di peso.

Occorre infatti considerare che generando un campo magnetico omogeneo, a parità di velocità, il segnale rilevato sarebbe di minore entità nei punti più distanti dagli elettrodi. Il fattore di peso, introdotto nel campo magnetico generato dalle bobine particolari, va inteso come un valore tridimensionale che accoppia ciascun punto della sezione di misura agli elettrodi. Ciò consente di compensare le perdite di segnale dovute alla distanza e determinare la velocità reale nel punto.

In tal modo la velocità rilevata dagli elettrodi è una media di velocità reale e quindi non influenzata da profili di flusso non omogenei e simmetrici.

Grazie a questa tecnologia, la misura di portata con strumento ad induzione elettromagnetica non richiede tratti a monte di tubazione lineare.

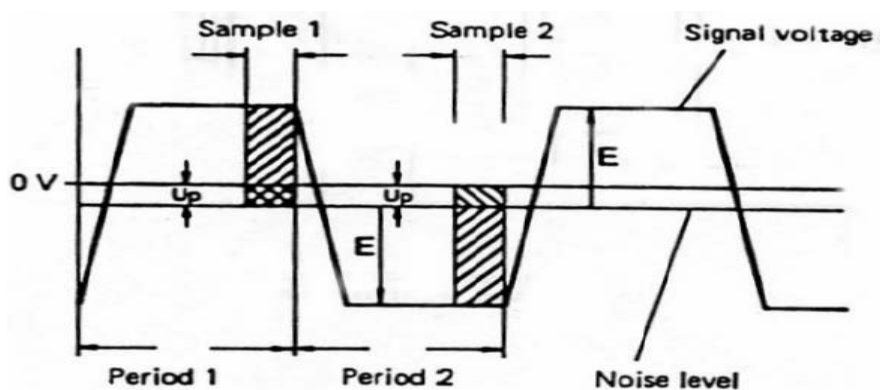
La seconda evoluzione (sistema MAG-X), che si è avuta negli anni '70, ha avuto come obiettivo il miglioramento del sistema di acquisizione del

segnale e la riduzione degli errori causati da disturbi elettrici. Nei misuratori elettromagnetici della prima generazione le bobine venivano eccitate con corrente alternata a 50 Hz. Questa tecnologia presentava alcuni svantaggi dovuti ad una serie di disturbi elettrici, tra cui il più significativo era un segnale in tensione che si generava tra liquido ed elettrodo a seguito di un fenomeno capacitivo, che rendeva indispensabile l'azzeramento della misura dopo l'installazione.

Inoltre i misuratori elettromagnetici presentavano una minore stabilità alle variazioni di temperatura e della tensione di alimentazione, oltre a un elevato consumo elettrico.

I sistemi MAG-X hanno introdotto la tecnologia dell'eccitazione delle bobine con tensione continua. La frequenza di eccitazione si è ridotta, tipicamente a  $6\frac{1}{4}$  Hz oppure  $12\frac{1}{2}$  Hz, che sono sottomultipli di 50 Hz.

In fig. 2.12 è rappresentata l'onda di corrente che eccita le bobine, si nota che la forma è quadra, sale rapidamente con una rampa, e una volta raggiunto il massimo di tensione, si mantiene costante per 80 ms.



**Fig. 2.12: forma d'onda della corrente d'eccitazione delle bobine.**

Il segnale di misura viene rilevato nell'ultimo quarto della semionda per 20 ms in ogni mezzo periodo di eccitazione. Quindi il segnale rilevato nel secondo periodo d'eccitazione viene sottratto al primo ed in tal modo viene determinato il segnale significativo della misura in base alla seguente equazione (2.7):

$$E = (E_f + U_p) - (-E_f + U_p) \quad (2.7)$$

Tale ciclo di misura perdura per 160 ms e viene ripetuto ciclicamente. Grazie a questo sistema d'eccitazione i disturbi indotti sul segnale della frequenza di rete vengono eliminati, infatti va considerato che il segnale di misura viene rilevato in sincronia con un'intera onda 50 Hz (fig. 2.13).

Con questa tecnica di eccitazione si ottiene una misura che non richiede taratura in campo dello zero con tubazione piena, si eliminano i disturbi causati dall'alimentazione a 50Hz ed in definitiva una migliore precisione di misura (0,5 % della portata misurata).

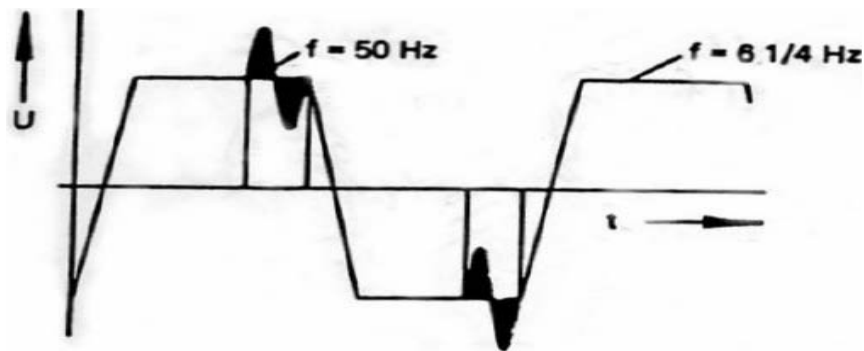


Fig. 2.13: eliminazione dei disturbi della frequenza di rete.

La terza evoluzione, che si è avuta indicativamente negli anni '80, ha avuto come obiettivo la diversificazione delle tipologie degli strumenti, col fine di ridurre i costi ed affrontare specifiche applicazioni. Sono stati quindi introdotti strumenti in versione compatta con convertitore incorporato; a tale scopo sono stati realizzati strumenti per montaggio tipo wafer, senza flange, che possono essere installati fra controflange, sia di tipo DIN, ANSI oppure BS.

Sono stati proposti nuovi materiali di rivestimento dei tubi di misura, quali il ceramico ed il PFA. L'evoluzione in atto, che si può indicativamente definire dagli anni '90, pur essendo già una realtà, è quella finalizzata alla realizzazione di strumenti con convertitore a microprocessore che si possono definire "intelligenti". Essi consentono innanzitutto un reale controllo della rilevazione del segnale ed una sua elaborazione per renderlo più significativo. Inoltre permettono di pianificare una reale standardizzazione di sistemi, in cui tutti i tubi primari e tutti i convertitori diventano tra loro compatibili, indipendentemente dalla frequenza di eccitazione e dal tipo di pick-up del segnale (con elettrodi o capacitivo). Essi, infine, tendono verso la nuova strategia globale dei sistemi di controllo di processo, in cui gli strumenti di misura in campo comunicano su linea seriale con regolatori a microprocessore, permettendo l'accesso ai "data base" dei parametri configurati; pertanto l'accesso alle informazioni è ora molto più esteso.

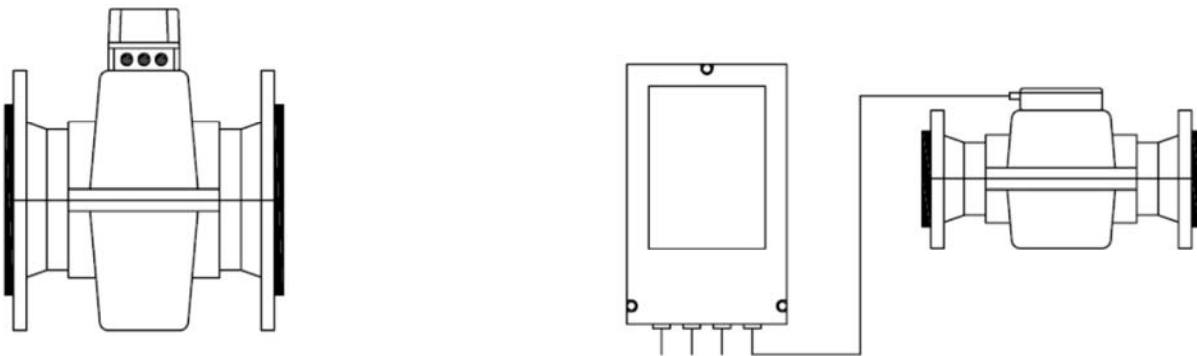
- **Caratterizzazione delle tipologie di misuratori elettromagnetici presenti sul mercato**

Le tipologie di misuratori elettromagnetici presenti sul mercato si possono classificare in base alle caratteristiche di seguito riportate.

1. Struttura e caratteristiche dei sistemi di misura:

a) I sistemi di misura con convertitore digitale (fig. 2.22 A) hanno bassi costi dell'hardware, bassi costi d'installazione, precisione tipica della portata misurata pari a 1%, e temperature massime di processo di 80 °C.

b) La tipologia con convertitore remoto (fig. 3.22 B) può avere a disposizione tubi di dimensione variabile (da 3mm fino a 2m), campi di misura commutabili automaticamente, misura e totalizzazione bidirezionale, precisione tipica della portata misurata pari a 0,5%, e temperature massime di processo di 180 °C.



**Fig. 2.14: misuratore elettromagnetico con convertitore integrale (a sinistra) e remoto (a destra).**

- **Collegamento alle condotte**

Il misuratore di portata può essere installato sulla condotta nelle seguenti modalità:

A) Flangiato DIN, oppure ANSI, oppure BS20. Assicura un'installazione corretta e quindi il rispetto dell'incertezza di misura da specifica dello strumento.

B) Per montaggio tipo wafer (fig. 2.15), cioè lo strumento può essere installato fra controflange di vario tipo. Viene rispettata l'incertezza di misura specificata sullo strumento solo se lo strumento viene installato in modo corretto.

- **Istallazione**

L'installazione di un misuratore di portata elettromagnetico non presenta particolari esigenze se non quelle che occorre osservare per le apparecchiature elettriche. Gli strumenti richiedono una buona messa a terra. Quando il tubo di misura deve essere montato in tubazioni di materiale isolante, per esempio PVC, è indispensabile installare anelli di messa a terra.

Per un corretto funzionamento occorre verificare che nel punto di misura la tubazione rimanga in qualsiasi fase del processo completamente piena. Pertanto sono da evitare installazioni in tratti di tubazione con flusso discendente, oppure in tratti orizzontali con scarico libero; in tal caso, se non esiste altra alternativa, occorre creare un "collo d'oca".

Quando durante il processo si verifica la condizione di tubazione vuota, è fornito come opzione un dispositivo in grado di rilevare questa condizione, di azzerare automaticamente il segnale in uscita e di generare un contatto di allarme. Un'altra condizione che si verifica a volte durante il processo è la diminuzione della portata a valori vicini a zero. Poiché, in base a quanto detto in precedenza, la precisione in queste condizioni decade, per evitare errori di totalizzazione i convertitori sono dotati di circuiti di "cut-off" sul segnale in uscita.

Quando gli strumenti sono montati in impianti con lunghi tratti di tubazione all'esterno, oppure in zone aperte, in prossimità di linee elettriche d'alta tensione, per evitare danni in caso di caduta di fulmini è opportuno installare appositi scaricatori.

Per facilitare la manutenzione del tubo di misura si consiglia l'inserimento nella tubazione di una flangia di ispezione.

Ovviamente occorre evitare l'installazione di un misuratore di portata elettromagnetico in zone di impianto soggette a vibrazioni per evitare danni di tipo meccanico.

Se si deve effettuare misure di portata a regime pulsante, dovuta ad esempio all'impiego di pompa a pistone, il segnale del misuratore elettromagnetico tende ad essere disturbato e diventare incompatibile con

le esigenze degli strumenti collegati. In alcuni casi è possibile ovviare a questo inconveniente utilizzando circuiti di smorzamento compresi nel trasmettitore. In altri casi, in dipendenza della frequenza del disturbo, è possibile linearizzare la portata con l'installazione di un serbatoio polmone.

- **Sistemi di misura di portata elettromagnetici con convertitore a microprocessore**

Negli anni più recenti sono stati introdotti sistemi in cui l'elaborazione del segnale è realizzato con microprocessori sul misuratore stesso.

Questi strumenti, che hanno già concretamente conquistato un'importante sezione di mercato, stanno velocemente sostituendo gli strumenti di tipo analogico.

I misuratori elettromagnetici a microprocessore hanno estesa capacità di visualizzare dati, permettono di assegnare in forma digitale i valori di taratura direttamente in unità ingegneristiche, e la capacità di elaborare algoritmi di controllo, programmi di autodiagnosi e soprattutto capacità di comunicare con il mondo esterno attraverso una linea seriale digitale.

La visualizzazione del risultato della misura avviene attraverso display alfanumerico. Sono da preferire display a cristalli liquidi del tipo a matrice di punti rispetto a quelli a segmenti luminosi, poiché la perdita di lettura di un segmento spesso comporta un grave errore, mentre la perdita di un punto è irrilevante. L'illuminazione del display rende la lettura chiara in ogni condizione.

L'introduzione dei dati di taratura e l'impostazione delle unità di misura richieste per l'applicazione risulta semplice e, soprattutto, è possibile anche con lo strumento funzionante in linea. Tutti i parametri di configurazione del misuratore sono mantenuti in memoria non volatile, che mette al riparo da eventuali cadute di tensione.

La taratura dello strumento richiede solo l'introduzione del valore di fondo scala come portata, la definizione delle unità ingegneristiche ed il valore dell'unità di totalizzazione. Viene indicato sia il valore della portata istantanea sia il valore totalizzato con le relative unità di misura. Una routine diagnostica interna rileva eventuali malfunzionamenti del sistema, dovuto anche a cause esterne, per es. tubo di misura vuoto, e genera dei codici per l'individuazione della causa del malfunzionamento.

Sono disponibili sistemi per il controllo automatico del confezionamento ed il dosaggio di prodotti alimentari quali latte, yogurt, ecc. oppure per l'industria chimica e farmaceutica. Il convertitore memorizza vari valori di caricamento, corrispondenti alle quantità da dosare, mentre un segnale in uscita comanda l'apertura del dispositivo di dosaggio, pompa o valvola.

Attraverso una linea seriale, con un unico terminale remoto, si possono leggere e modificare dati, tarare gli strumenti ed effettuare la diagnosi rimanendo in sala di controllo. E' possibile, inoltre, effettuare la registrazione storica dei dati su PC per una successiva elaborazione.

In futuro sarà possibile la comunicazione diretta tra strumenti di controllo a microprocessore e misuratori in campo su linea seriale, senza richiedere il collegamento 4 - 20 mA, che consentirà strategie di controllo completamente nuove.

## Appendice 3

### ANALISI DEI SEGNALI NEL DOMINIO DELLA FREQUENZA

#### 3.1 Serie di Fourier

È noto che una generica funzione  $x(t)$  periodica di periodo  $T$  può essere rappresentata, mediante la serie di Fourier, nella seguente maniera:

$$x(t) = X_0 + X_1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t + \varphi_1) + \dots + X_n \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot nt + \varphi_n) \quad (3.1)$$

$$x(t) = X_0 + \sum_{n=1}^{\infty} X_n \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot nt + \varphi_n) \quad (3.2)$$

dove:

- $f_1$  è la frequenza dell'armonica fondamentale, che ha ampiezza  $X_1$
- $X_0$  è il valore medio di  $x(t)$
- $X_n$  è l'ampiezza della n-esima armonica, caratterizzata da un valore della frequenza di  $nf_1$
- $\varphi_n$  è la fase della n-esima armonica

Perciò, se si ha una funzione periodica, effettuare l'analisi di Fourier significa ricavarne le ampiezze  $X_n$  e le fasi  $\varphi_n$ . Si può pensare di effettuare l'analisi di Fourier con un filtro (Fig. 2.4), che fa passare esclusivamente le componenti di frequenza comprese in un certo intervallo, poiché, in realtà è presente una certa dispersione.

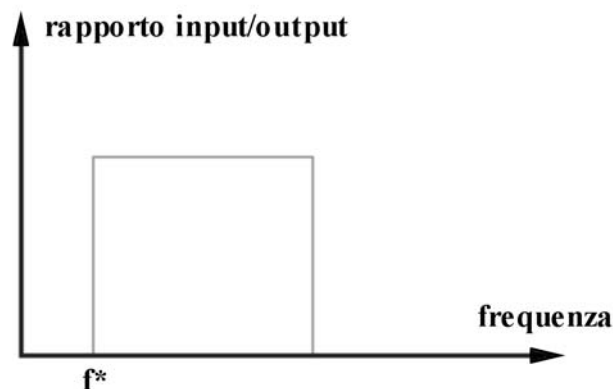


Fig. 3.1: il filtro ideale.

##### 3.1.1 Trasformata di Fourier

Per una funzione  $x(t)$  non periodica, che soddisfa la condizione di avere l'integrale tra  $\pm\infty$  del valore assoluto di  $x(t)$  pari ad una quantità finita, al posto della serie si definisce la trasformata di Fourier:

$$X(f) = F\{x(t)\} = \int_0^{\infty} x(t) \cdot e^{-i2\pi \cdot f \cdot t} dt \quad (3.3)$$

Essendo una funzione complessa, la trasformata di Fourier la si può rappresentare mettendo in evidenza la parte reale e quella immaginaria:

$$X(f) = \Re[X(f)] + i \cdot \Im[X(f)] \quad (3.4)$$

oppure mediante modulo e fase:

$$X(f) = |X(f)| \cdot e^{i\Phi(f)} \quad (3.5)$$

in cui:

$$|X(f)| = \sqrt{\Re[X(f)]^2 + \Im[X(f)]^2} \quad \text{e} \quad \text{tg}[\Phi(f)] = \frac{\Im[X(f)]}{\Re[X(f)]} \quad (3.6)$$

Per caratterizzare un particolare sistema è di solito fornita la rappresentazione grafica di  $X(f)$  mediante gli andamenti della parte reale e di quella immaginaria, o di ampiezza e fase, in funzione della frequenza.

In realtà, però, il segnale che si ha a disposizione non permette, a rigore, di calcolare la trasformata di Fourier. Infatti ciò che si possiede è un segnale rilevato da un certo istante iniziale fino ad un tempo  $T^*$  finito.

Le conseguenze sono che la relazione

$$X(f) = F\{x(t)\} = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T x(t) \cdot e^{-i2\pi \cdot f \cdot t} dt \quad (3.7)$$

può non esistere ed inoltre se si elabora questo segnale, calcolandone la trasformata di Fourier, è come se si considerasse il segnale "prolungato" da  $-\infty$  a  $+\infty$  prima e dopo l'intervallo di acquisizione  $T^*$ . Cioè, è come se il segnale si ripetesse periodicamente, con periodo  $T^*$ , per  $t$  da  $-\infty$  a  $+\infty$ . In realtà, è più corretto, quindi, calcolare:

$$X(f, T^*) = F\{x(t)\} = \int_0^{T^*} x(t) \cdot e^{-i2\pi \cdot f \cdot t} dt \quad (3.8)$$

chiamata Trasformata Finita di Fourier.

In questo modo la funzione che si considera non è più non periodica, ma "periodica" di periodo  $T^*$ , definita da  $-\infty$  a  $+\infty$ . Se si riportano le ampiezze in funzione delle frequenze, si ottiene uno spettro discontinuo, appunto per il fatto che la funzione viene trattata come periodica di periodo  $T^*$ .

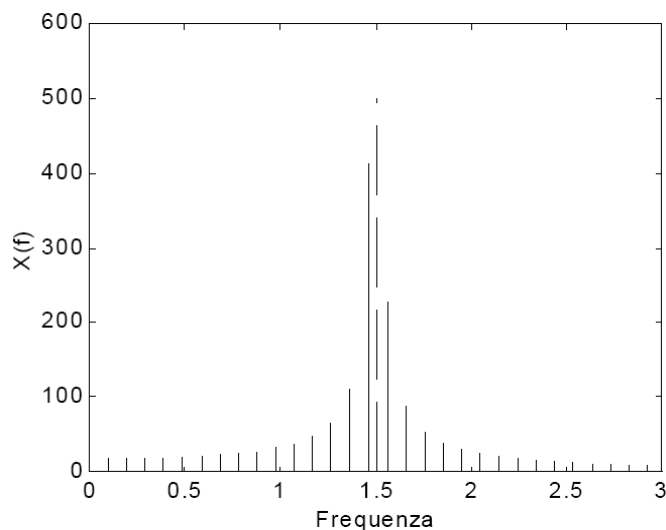
La risoluzione dello spettro (distanza tra due linee contigue) si definisce mediante la relazione:

$$\Delta f = \frac{1}{T^*} \quad (3.9)$$

È importante sottolineare che la frequenza  $\Delta f$  non è una frequenza del segnale, ma dipende solo dal tempo di acquisizione  $T^*$ . Non è detto che tale frequenza, o qualcuno dei suoi multipli, siano effettivamente presenti nel segnale. Supponiamo, ad esempio, di avere una struttura che

vibra: essa avrà una certa frequenza  $f^I$  del primo modo,  $f^{II}$  del secondo modo e così via. Se si rileva il segnale mettendo il trasduttore sulla struttura, tali frequenze saranno presenti nel segnale. Se si rileva il segnale per un tempo  $T^*$ , nello spettro compaiono componenti alle frequenze pari ad un multiplo intero della frequenza fondamentale  $\Delta f=1/T^*$ . Di regola succederà che  $f^I$  e  $f^{II}$  non siano dei multipli di  $\Delta f$ : nello spettro si trova allora solo un "addensamento" attorno a tali valori.

In corrispondenza delle componenti  $f^I$  e  $f^{II}$ , che non si riscontrano perché hanno una frequenza che non esiste sullo spettro discreto, compaiono allora delle componenti a frequenze vicine (Fig. 2.5), la cui energia totale coincide con quella delle componenti  $f^I$  e  $f^{II}$ .



**Fig. 3.2: il fenomeno della dispersione.**

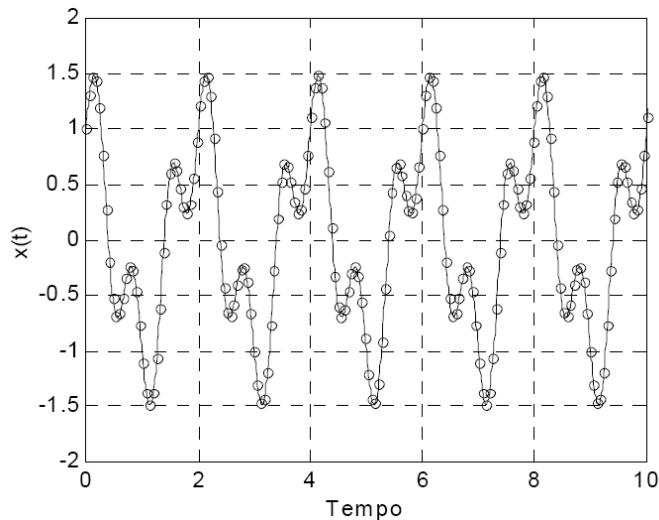
Questo fenomeno è detto leakage (dispersione): poiché si rileva la funzione in un tempo  $T^*$  finito, cioè guardando il segnale attraverso una finestra rettangolare, le frequenze effettivamente presenti si "disperdono" nelle frequenze prossime ad esse, ma sempre multiple di  $\Delta f=1/T^*$ .

Per diminuire la dispersione si utilizzano finestre di forma diversa; uno dei tipi più usati è la finestra Hanning, che ha la proprietà di annullare il segnale all'inizio e alla fine dell'acquisizione, per cui si elimina la discontinuità che altrimenti si avrebbe all'inizio del periodo. Utilizzando tali finestre si ottengono degli spettri più vicini alla realtà rispetto alla finestra rettangolare, che dà spettri più dispersi.

### 3.1.2 Campionamento

È possibile analizzare il segnale con un computer se è presente nella catena di misura un convertitore A/D che lo trasformi in una serie di numeri. Tale operazione prende il nome di campionamento.

Il convertitore A/D legge il valore istantaneo del segnale ad intervalli regolari di tempo e all'uscita dal medesimo non si ha più un segnale continuo ma discreto.

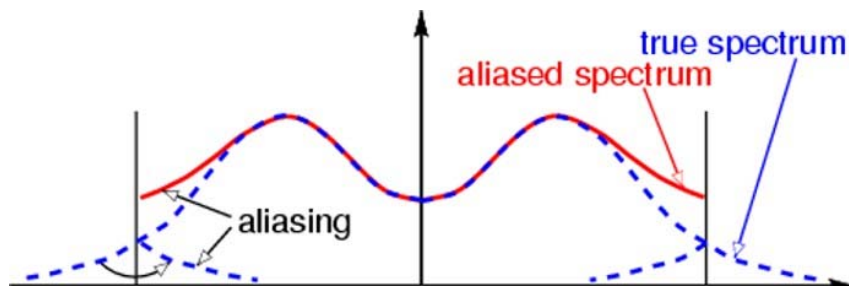


**Fig. 3.3: esempio di campionamento di un segnale.**

L'intervallo di tempo  $\Delta t_c$  tra due acquisizioni successive è detto intervallo di campionamento; il suo inverso  $f_c=1/\Delta t_c$  è detto frequenza di campionamento. Il campionamento permette un'analisi del segnale veloce e sofisticata, a patto di una scelta adeguata per il valore della  $f_c$ , tale cioè da non alterare il segnale, e del tempo di acquisizione, la cui lunghezza è un compromesso tra oneri di analisi e buona rappresentatività dell'universo di studio.

### 3.1.3 Aliasing

Supponiamo che il segnale sia sinusoidale: effettuandone il campionamento con una  $f_c$  troppo bassa, il segnale acquisito non è più univocamente riconoscibile e sembra avere una frequenza più bassa del segnale analogico originario. Allora qualsiasi analisi successiva porta a risultati errati, perché è fatta su un segnale diverso da quello effettivo. Questo fenomeno è detto aliasing (alterazione).



**Fig. 3.4: il fenomeno dell'aliasing.**

Per evitare l'aliasing deve essere soddisfatto il Teorema di Shannon o del campionamento, secondo il quale deve essere:

$$f_c \geq 2 \cdot f_{max} \quad (3.10)$$

dove  $f_{max}$  è la più alta frequenza contenuta nel segnale.

Dato che non si conosce a priori il contenuto in frequenza del segnale da analizzare, affinché sia soddisfatta tale condizione, bisogna usare un filtro antialiasing (AA), che è un filtro passa-basso con la funzione di lasciar passare solo le componenti con frequenza inferiore a quella massima di interesse  $f_{max}$ . La frequenza di campionamento dovrà essere non inferiore a  $2 f_{max}$ . Valgono le seguenti relazioni:

$$T^* = N \cdot \Delta t_c = N \cdot \frac{1}{\Delta f} \quad (3.11)$$

in cui:

- $\Delta f$  è la risoluzione dello spettro
- $f_c$  è la frequenza di campionamento
- $T^*$  è il tempo di acquisizione
- $\Delta t_c$  è l'intervallo di campionamento
- $N$  è il numero di campioni

Di seguito verrà illustrato brevemente come si effettua la scelta dei parametri di acquisizione. Individuata la frequenza di interesse ( $f_{utile}$ ) si fissa quella di campionamento, che per evitare il fenomeno dell'aliasing deve rispettare il teorema di Shannon. Nella pratica, per tener conto dell'imperfezione del filtro anti-aliasing, si prende una frequenza di campionamento tale che  $f_{camp} \geq 2.5 f_{utile}$ . La risoluzione dello spettro è pari alla (2.9) dove  $T^*$  è il periodo di acquisizione e la  $\Delta f$  è la distanza tra due linee spettrali (se  $\Delta f$  risulta "piccolo" si parla di elevata risoluzione dello spettro).

Scelte la frequenza di campionamento e la risoluzione, il numero di campioni risulta:

$$N = \frac{T^*}{\Delta t} = T^* \cdot f_{camp} \quad (3.12)$$

Generalmente il numero  $N$  di campioni deve essere potenza di 2, in questo modo si può utilizzare, senza problemi, l'algoritmo veloce FFT per determinare la trasformata di Fourier.

### 3.1.4 Trasformata discreta di Fourier

Ritornando all'analisi di Fourier, nel caso di un segnale campionato si parla di trasformata discreta di Fourier (DFT), perché l'analisi viene effettuata su una funzione discreta (segnale campionato):

$$X(k, \Delta f) = \Delta t_c \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-i2\pi k \frac{n}{N}} \quad (3.13)$$

dove:

- $x_n$  è il generico valore n-esimo di  $x(t)$ , cioè  $x(t) = x(n, \Delta t_c)$
- $X(k, \Delta f)$  rappresenta il termine k-esimo dello spettro di  $x(t)$
- $N$  è il numero di campioni, cioè il numero di valori di  $x(t)$  rilevati a intervalli regolari  $\Delta t_c$
- $k$  è l'ordine dell'armonica, che va da 0 a  $(N-1)/2$

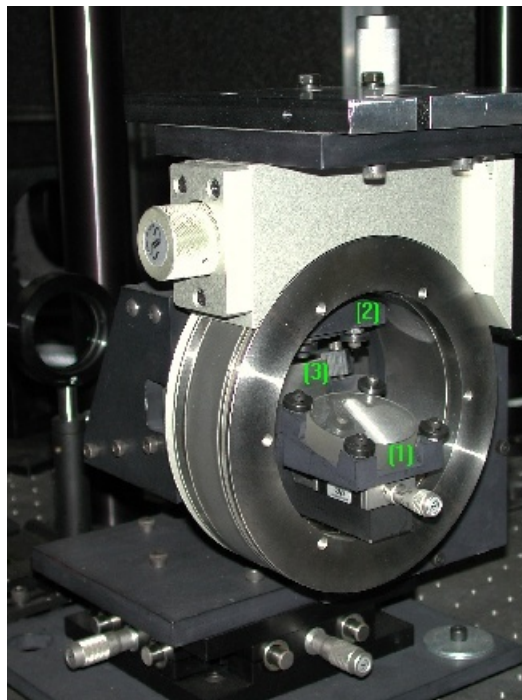
Se il numero di campioni elaborati è una potenza di 2, il calcolo viene effettuato con algoritmi chiamati FFT (Fast Fourier Transform), che velocizzano l'operazione e consentono di avere la trasformata di Fourier in tempo reale [14].

## Appendice 4

### IL PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL DE-ROTATOR OTTICO

#### 4.1 Descrizione del principio di funzionamento

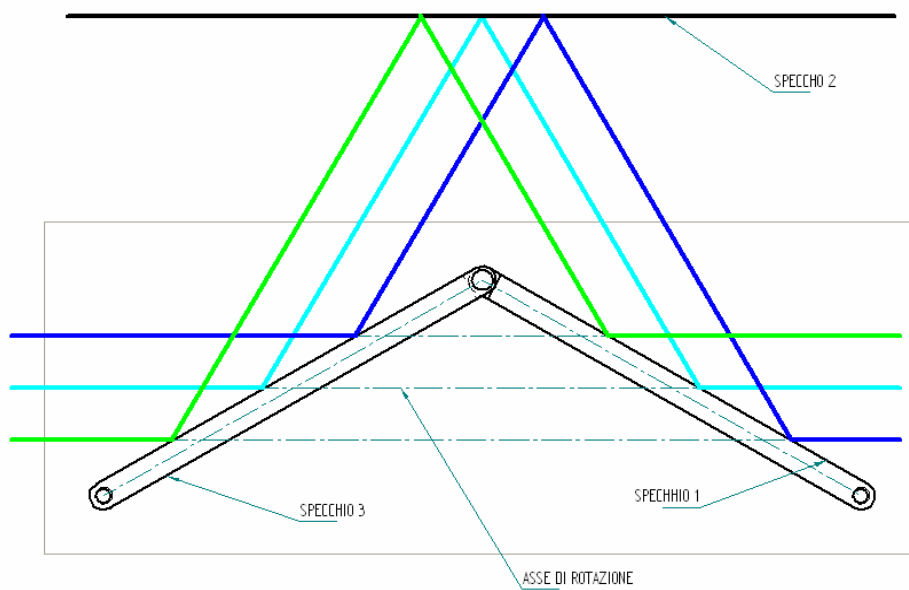
Il principio di funzionamento che sta alla base dell'Optical De-rotator è quello di un dispositivo utilizzato in campo astronomico per compensare il moto rotatorio della volta celeste rispetto alla stella polare, rappresentato di seguito in figura 4.1. È del tutto evidente che tale dispositivo è inadatto per le nostre applicazioni, in quanto realizzato per annullare la rotazione di un fenomeno sempre costante nel tempo ed a velocità molto ridotte; tuttavia il principio di funzionamento permane assolutamente valido anche nel nostro caso.



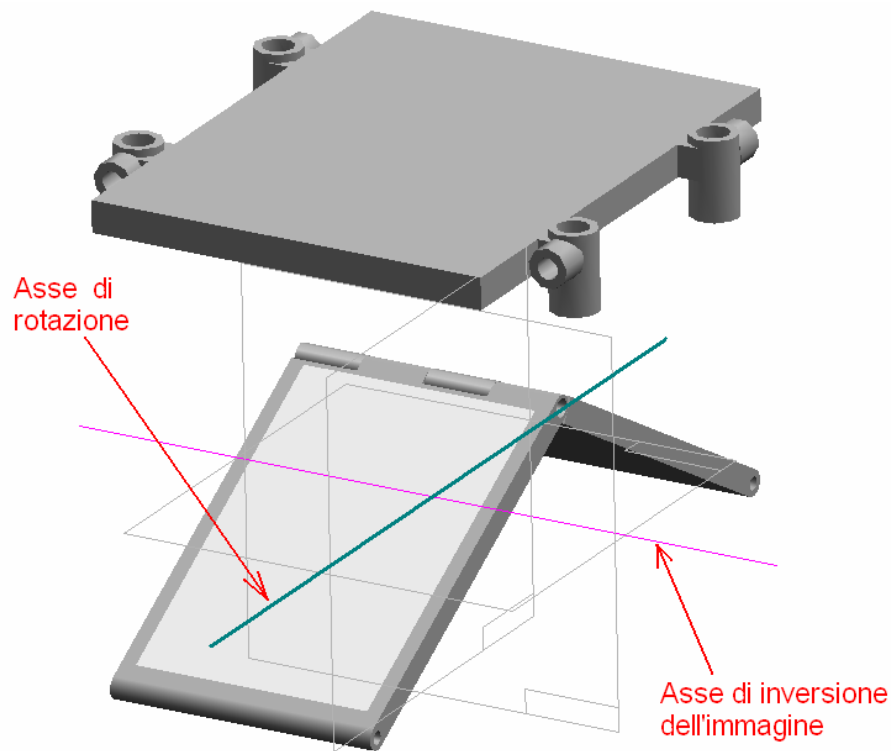
**Fig. 4.1: strumento utilizzato in campo astronomico.**

L'elemento chiave del meccanismo è il "Dove Prism". Questo è costituito da un prisma in grado di invertire (o capovolgere) l'immagine incidente su di esso; tale dispositivo (come si vedrà empiricamente di seguito) permette di effettuare acquisizioni termoelastiche su oggetti rotanti restituendo in output un'immagine fissa nello spazio.

Il "Dove Prism" può essere sostituito da un sistema di specchi opportunamente orientati che ne eguagliano perfettamente il comportamento. La disposizione degli specchi è mostrata di seguito (fig. 4.2) e (fig. 4.3). Dalla prima figura risulta immediatamente evidente l'inversione dell'immagine operata dal dispositivo rispetto all'asse centrale degli specchi 1 e 2, rappresentato nella seconda con una linea viola.

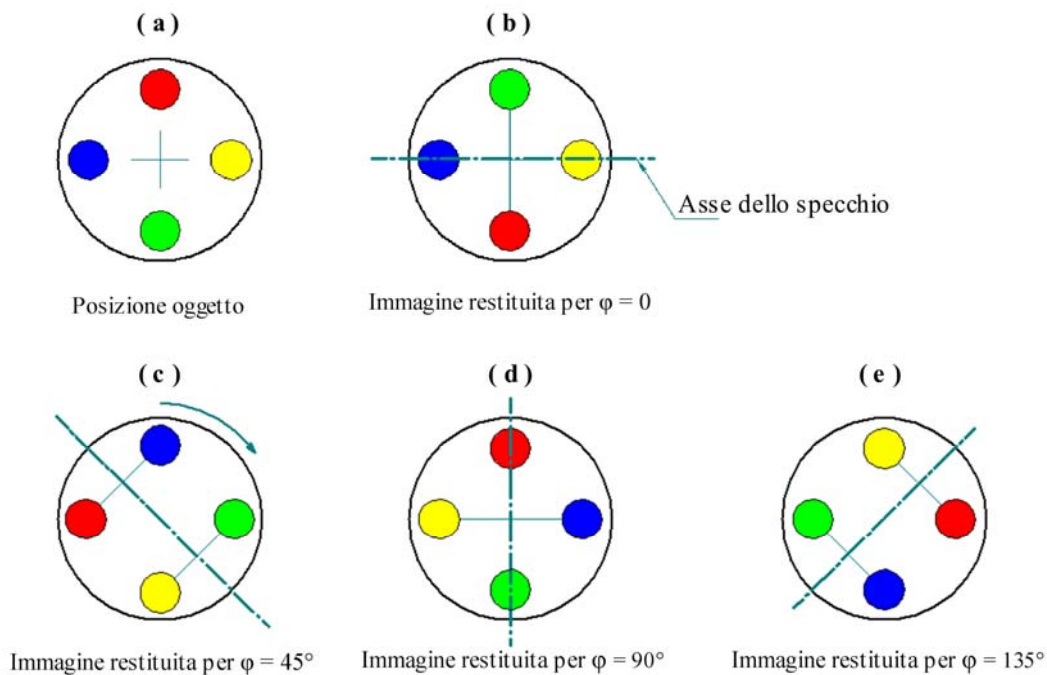


**Fig. 4.2: inversione dell'immagine operata dal sistema di specchi.**



**Fig. 4.3: disposizione degli specchi.**

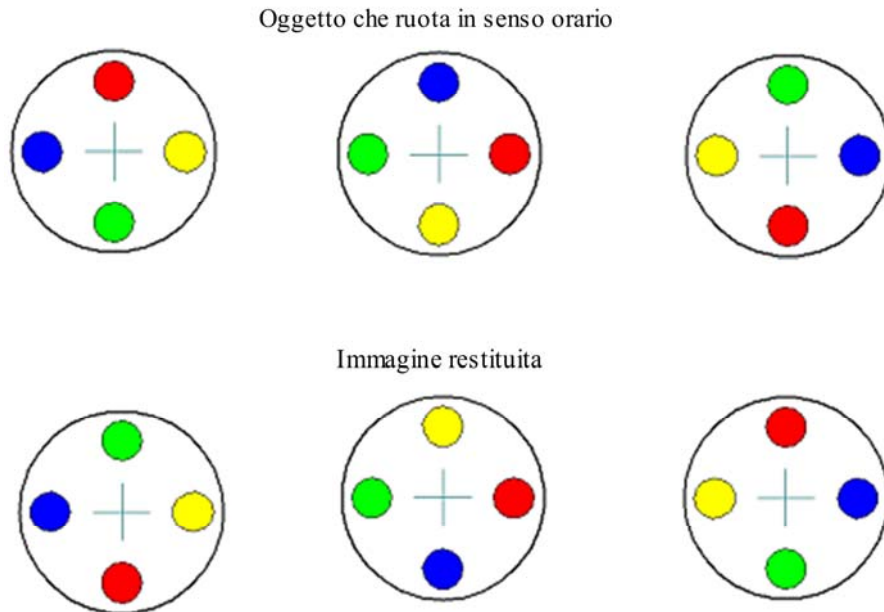
Se ora si mette in rotazione il sistema costituito dai tre specchi intorno all'asse di rotazione, rappresentato in (Fig. 4.2) dalla linea blu, ad una velocità angolare  $\omega$ , l'immagine riflessa dallo specchio 3 ruoterà ad una velocità doppia, cioè  $2\omega$ . Tale fenomeno può essere meglio compreso con l'esempio rappresentato in (Fig. 4.4).



**Fig. 4.4: immagine di un disco fisso restituita dal De-rotator in diversi istanti di tempo.**

In figura 4.4a è stato rappresentato un generico disco all'interno del quale sono stati inseriti dei cerchi di vario colore per individuarne facilmente l'orientamento nello spazio. Supponiamo che tale elemento sia il nostro misurando e che sia fisso nello spazio durante tutta la prova. Se ora posizioniamo l'insieme dei tre specchi fra l'oggetto ed il punto di vista, l'immagine proiettata è data dalla fig. 4.4b; infatti il "Dove Prism" capovolge l'immagine rispetto al proprio asse, per cui i due cerchi posti orizzontalmente restano nelle loro posizioni, mentre i due posti verticalmente vengono scambiati. Se ora ruotiamo l'asse del "dove Prism" di un angolo  $\varphi = 45^\circ$  avremo l'immagine di figura 4.4c caratterizzata dallo scambio di posizione del cerchio verde con il giallo e del blu con il rosso, dato che il sistema di specchi capovolge la figura 4.4a, rispetto all'asse in questione. L'effetto finale è che mentre il sistema di specchi è ruotato di  $45^\circ$ , l'immagine restituita ha compiuto  $90^\circ$ , cioè il doppio, e questo è dimostrato anche dalle figure 4.4d e 4.4e, che rappresentano l'immagine restituita per  $\varphi = 90^\circ$  e per  $\varphi = 135^\circ$ . In base a tale principio passiamo alla compensazione del moto del disco.

Supponiamo dunque di porre in rotazione il disco con velocità  $\omega$ . Per annullare tale movimento basta far ruotare il sistema di specchi ad una velocità angolare pari alla metà di quella del disco. Di fatti il dispositivo oltre a capovolgere l'immagine fa sì che quella riflessa cambi senso di rotazione, come si vede in figura 4.5.



**Fig. 4.5: immagine riflessa della rotazione del solo oggetto.**

Quindi con il dispositivo fisso l'immagine restituita ruoterà con velocità  $\omega$ , ma da come si era appena visto se l'oggetto è fermo e il De-rotator si muove di velocità  $\omega/2$  l'immagine riflessa si muove con velocità  $\omega$ , di conseguenza per il principio di sovrapposizione degli effetti si ha:

$$\omega_{tot. imm. riflessa} = \omega_{imm. riflessa rot. oggetto} + \omega_{imm. riflessa rot. De-rot.} = -\omega + \omega = 0 \quad (4.1)$$

Da ciò appare evidente che l'immagine restituita dal sistema di specchi risulterà fissa nello spazio e quindi perfettamente acquisibile dalla termocamera. Anche per tale fenomeno possiamo dare una spiegazione di tipo empirico seguendo lo stesso approccio adottato precedentemente ottenendo la disposizione di figura 3.5.

Nella prima riga è rappresentato il disco precedentemente utilizzato, rotante in senso orario con velocità di  $90^\circ/\text{sec}$  in tre istanti successivi; nella seconda riga invece è rappresentata l'immagine restituita dagli specchi il cui asse ruoterà ad una velocità di  $45^\circ$  al secondo. L'effetto di inversione dell'immagine rispetto al proprio asse fa sì che l'immagine restituita sia perfettamente immobile pur essendo il disco in movimento.

Seguendo tale principio è quindi possibile la completa compensazione del moto rotatorio dell'oggetto ed il conseguente uso della termocamera differenziale per la misura delle tensioni superficiali.

#### 4.1.1 Requisiti del sistema

La prima condizione è che il moto del misurando deve essere puramente rotatorio; la presenza di una componente verticale del moto o un disallineamento tra gli assi di rotazione dell'oggetto e del dispositivo ottico sono fonti di incertezza; il misurando come il De-rotator deve avere velocità di rotazione costante.

Nell'impiego del sistema, la termocamera deve essere posta di fronte al misurando cercando di far coincidere l'asse di rotazione di quest'ultimo con il centro del campo di misura, in modo che tutti i raggi luminosi considerati siano pressoché paralleli all'asse di rotazione; fra i due

elementi deve essere interposto il De-rotator con il proprio asse di rotazione perfettamente allineato con quello del misurando (questo è un requisito fondamentale).

L'asse di rotazione del dispositivo ottico deve anche coincidere con il centro del proprio campo visivo e cioè con il centro dello specchio 1 e 3 per massimizzare il campo visivo.

Altro requisito estremamente importante è che il De-rotator deve costantemente muoversi ad una velocità angolare pari alla metà di quella dell'oggetto di misura.

Un ultimo aspetto fondamentale è la disposizione ad hoc degli specchi, che si può effettuare con una attenta regolazione o con delle lavorazioni di massima precisione [15].

## Riferimenti bibliografici

1. "Thermoelastic stress analysis applied to fully reversed bending fatigue", Nasa contractor report 1968, L. Byrd and M. Haney.
2. "Stress intensity measurement via infrared focal plane array", SEM conference 1998, J. Lesniak et all.
3. "Simultaneous Application of Scanning Laser Vibrometry and Thermoelasticity for Measurement of Stress-Strain Fields on Mechanical components." Atti convegno AIVELA 2006, A. Di Renzo pp. 2 - 3.
4. "Identification of the sources of non-adiabatic behaviour for practical thermoelastic stress analysis", Journal of strain analysis pp 60 - 70, S. Quinn J. M. Dulieu Barton 2002.
5. "Studio delle cause di incertezza nelle misure con la termoelasticità su componenti meccanici", Congresso Nazionale di Misure Meccaniche e Termiche 2005, G. L. Rossi.
6. "Tecniche di analisi digitale di immagini di flussi bifase riprese con videocamera ad alta velocità." Atti del congresso su Tecniche ottiche e termografiche in termofluidodinamica 2005, P. Di Marco.
7. "Identification of the sources of non-adiabatic behaviour for practical thermoelastic stress analysis", Journal of strain analysis pp 59, S. Quinn J. M. Dulieu Barton 2002.
8. "A Frequency-Domain Description of a Lock-in Amplifier", American Journal of Physics, John H. Scofield 1994.
9. "Amplificatore lock-in con demodulazione di fase ed ampiezza". Atti del congresso CNR, G. Galzerano et al. 2003.
10. "Nuove tecniche di compensazione del movimento". Atti del congresso dell'Associazione nazionale del disegno di macchine, M. Moretti et al. 2007.
11. "Measurement on rotating mechanical component by Thermoelasticity". Congresso BSSN 2005, M. Moretti et al. 2005.
12. "Thermoelastic stress analysis by means of a standard thermocamera", Experimental techniques E. M. Zanetti et al. 2007.
13. Ernest O. Doebellin: "Strumenti e metodi di misura", McGraw-Hill, New York, 2001.
14. Alan O. Schafer: "Discrete - time signal processing", Prentice Hall International Inc.
15. G. Brustenga: "Sviluppo di un sistema innovativo per l'analisi termoelastica su oggetti in rotazione", tesi di dottorato XVI ciclo, Università degli Studi di Perugia, 2004.