



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE  
ISTITUTO DI ASSESTAMENTO E TECNOLOGIA FORESTALE

Dottorato di Ricerca in SCIENZE DEL LEGNO – CICLO XII

Curriculum: TECNOLOGIA DEL LEGNO

SVILUPPO DI UN APPARATO  
PER LA MISURAZIONE DI FORZE E DEFORMAZIONI  
INDOTTE NEI DIPINTI SU TAVOLA DA VARIAZIONI CLIMATICHE:  
LA TRAVERSA STRUMENTATA

*(Development of an apparatus to measure forces and deformations  
induced in Panel Paintings by climatic changes: the Monitoring Crossbeam)*

Tesi presentata per il conseguimento del titolo di Dottore di Ricerca

Candidato: Paolo DIONISI VICI

FIRENZE, DICEMBRE 1999

*“...di avvitare e svitare,  
svitare e avvitare,  
meglio di non parlare,  
meglio.”*

E. Jannacci *“Bobo Merenda”*

Ringraziamenti	i
<b>Introduzione</b>	<b>i</b>
<b>1. Problematiche di base riguardanti la stabilità dimensionale del legno</b>	<b>1</b>
1.1 Anisotropia del legno dal punto di vista meccanico e igroscopico	1
1.2 Meccanismi legati al trasporto di acqua in direzione trasversale	2
1.3 Deformazioni in campo igroscopico	5
1.4 Comportamento mecano-sorbitivo	8
<b>2. Problemi specifici di stabilità dimensionale dei dipinti su tavola intesi come individui complessi</b>	<b>12</b>
2.1 I gradienti di umidità nello spessore	12
2.2 I diversi tassi di scambio tra faccia dipinta e faccia libera	13
2.3 Interferenze tra gradienti e anisotropia dei ritiri	14
2.4 Storia dei cicli di inumidimento e suoi effetti sulla sensibilità individuale di un dipinto su tavola	14
<b>3. Breve storia degli interventi strutturali adottati per contrastare le deformazioni nel piano e fuori piano dei dipinti su tavola</b>	<b>15</b>
<b>4. La Traversa Strumentata</b>	<b>19</b>
4.1 Scopi	19
4.2 Inquadramento delle grandezze da misurare	22
4.3 L'insieme MCB – tavola: studio dei vincoli	22
4.4 Compatibilità con eventuali deformazioni anomale	23
<b>5. Scelte progettuali operate</b>	<b>25</b>
5.1 Misure rilevate su un piano perpendicolare alla tavola	25
5.2 Numero dei punti di misura	28
5.3 Posizione dei centri di rotazione	28
5.4 Modalità di vincolo del sistema MCB - simulacro	30
5.5 Equilibri dei momenti e delle forze delle varie parti svincolate	33
5.6 Interazione tra gli assi X e Z (il <i>cross-talk</i> )	36
<b>6. Scelta e taratura dei vari tipi di trasduttori</b>	<b>38</b>
6.1 Trasduttori di spostamento LVDT	38
6.2 Celle estensimetriche	39
6.3 Sensore termoigrometrico	41

<b>7.</b>	<b>Realizzazione dei vincoli e caratterizzazione meccanica</b>	<b>43</b>
7.1	La scelta delle molle	43
7.2	Caratterizzazione meccanica	44
<b>8.</b>	<b>Misurazione indipendente delle deformazioni del simulacro</b>	<b>46</b>
8.1	Fonte	46
8.2	Uso	48
8.3	Funzionalità	49
<b>9.</b>	<b>Sistema di acquisizione dei dati</b>	<b>50</b>
9.1	Data-logging	50
9.2	Impostazioni Lab-View: problemi riscontrati e soluzioni adottate	51
9.3	Scelta del sampling-rate	51
<b>10.</b>	<b>La camera climatica</b>	<b>52</b>
10.1	Funzionalità	52
10.2	Capacità di regolazione	52
10.3	Risposta a stimoli esterni	53
<b>11.</b>	<b>Il simulacro del dipinto</b>	<b>54</b>
11.1	Dimensioni, caratteristiche tecnologiche, isolamento	54
11.2	Sistema di collegamento alla MCB	56
11.3	Molle	57
11.4	Problemi derivanti dalla posizione in oggetto dei perni	57
<b>12.</b>	<b>Il testimone a deformazione libera</b>	<b>59</b>
12.1	Presupposti teorici	59
12.2	Descrizione del montaggio e dei particolari costruttivi	59
12.3	Confrontabilità dei dati tra testimone e simulacro	61
<b>13.</b>	<b>Prime prove</b>	<b>62</b>
13.1	Cicli programmati	62
13.2	Curve sperimentali	63
<b>14.</b>	<b>Elaborazione dei dati sperimentali</b>	<b>69</b>
14.1	Smoothing	69
14.2	Correlazioni	69
<b>15.</b>	<b>Discussione sui primi risultati riguardanti la funzionalità della MCB</b>	<b>74</b>
15.1	Funzionalità e limiti dello strumento	74
15.2	Ipotesi di miglioramento	74

15.3	Cicli necessari per una migliore comprensione dei fenomeni	75
<b>16.</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>76</b>
16.1	Primi risultati	76
16.2	Sviluppi futuri	77
	<b>Bibliografia</b>	<b>i</b>
	<b>Allegati</b>	<b>a</b>
Allegato 1	Nomenclatura adottata per trasduttori e celle di carico di MCB e testimone	a
Allegato 2	Materiali e componenti equipaggiati sulla MCB e sul testimone a deformazione libera	c
Allegato 3	Galleria di immagini della MCB e del testimone libero durante i cicli di acquisizione	e
Allegato 4	Elaborazione dei dati ottenuti dalla prima prova a deformazione impedita affetti da <i>cross-talk</i>	h

## Ringraziamenti

Questo lavoro si è rivelato impegnativo e faticoso, come si tramanda che debba essere, giustamente, la tesi di dottorato.

In questo caso la parte più impegnativa si è rivelata proprio la fase di progettazione e realizzazione fisica della macchina: alla mia età credevo di aver ormai superato la fase di apprendistato meccanico ma, in realtà, c'era moltissimo da imparare ancora per risolvere, in modo quanto più possibile elegante, i problemi che la nostra *creatura* via via ci proponeva.

Soprattutto per questo (sperando che non se ne abbia a male) devo i miei ringraziamenti al prof. Uzielli: anche nel modo di attuare scelte operative il suo rigore metodologico mi ha spesso salvato da operazioni potenzialmente errate.

Ma farei un grave errore nel non ricordare che al mio fianco ho avuto il laureando (ma soprattutto l'amico) Luca Copertino, col quale abbiamo fatto emergere dai disegni su CAD questo oggetto del quale non posso non andare fiero: fierezza da condividere, quindi.

Ho trovato una voce della coscienza nel prof. Fioravanti, che mi ha spesso riportato coi piedi per terra nei momenti di facili entusiasmi e che ha partecipato con elementi di discussione molto importanti alla comprensione dei primi risultati ottenuti.

L'ing. Φωτεινή Πατρικίου mi ha sostenuto nell'ultimo periodo di questo lungo lavoro, con uno spirito ellenicamente tenace: indubbiamente grazie a lei il *rush* finale è stato più sopportabile.

Nelle lunghe sere d'inverno passate in solitudine a Quaracchi è stata una grande gioia condividere queste sensazioni coi colleghi Andrea Cerulli e Andrea Leccese: sono contento che insieme siamo arrivati a questo traguardo.

## **Introduzione**

Il presente lavoro di tesi per il conseguimento del titolo di Dottore di Ricerca descrive l'ideazione, la realizzazione e la verifica del funzionamento di un'apparecchiatura destinata a monitorare le deformazioni e le tensioni che si generano nel supporto ligneo dei dipinti su tavola al variare delle condizioni igrometriche dell'ambiente in cui questi si trovano.

Questa ricerca, svolta nell'ambito del "Progetto Finalizzato Beni Culturali" del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), è nata dalla collaborazione tra l'Istituto di Assestamento e Tecnologia Forestale dell'Università degli Studi di Firenze (IATF), il laboratorio restauro dipinti su tavola dell'Opificio delle Pietre Dure di Firenze (OPD) e il Dipartimento Tecnologie Avanzate della Galleria degli Uffizi (DTA).

La ricerca nasce dalla necessità

- a) di una più approfondita comprensione di quelli che sono i complessi comportamenti deformativi che si manifestano nei dipinti su tavola in ambiente museale non controllato:
  - nel lungo periodo, come può esserlo la variazione stagionale;
  - nel breve, come nelle variazioni giornaliere dovute all'afflusso di visitatori;
- b) di conoscere quelli che possono essere gli effetti di un irrigidimento della struttura, originario o posto in interventi successivi, finalizzato alla riduzione delle deformazioni stesse.

Alla fine di questa ricerca, della quale questo lavoro copre una parte iniziale e metodologica e dal quale non è dato al momento trarre conclusioni univoche, è auspicabile che si arrivi a definire un quadro delle possibilità operative più preciso per coloro che devono prendere decisioni miranti ad una migliore conservazione di questi manufatti dal comportamento di così difficile interpretazione.

L'approccio al problema è tanto più delicato per l'unicità degli oggetti in esame:

- ognuno di essi ha una sua specifica storia deformativa;
- le indicazioni che devono essere fornite a coloro che si occupano della conservazione hanno un'elevata importanza, dato che ogni intervento del

quale non siano perfettamente conosciuti gli effetti può comportare un danno irreparabile a elementi irripetibili del nostro patrimonio culturale.

Ecco quindi la necessità di ridurre, in fase di sperimentazione, le variabili in gioco, cominciando ad operare su modelli semplificati e senza valore, cercando di ottenere comportamenti generali esportabili, poi, a situazioni più complesse.

Il percorso della progettazione è partito perciò da soluzioni necessariamente sovradimensionate con l'obiettivo di modifiche più raffinate, vuoi nella scelta degli strumenti di misura, vuoi nei collegamenti alla tavola sottoposti a sforzi, sui quali la messa in opera e le prime verifiche sperimentali hanno fornito elementi di successivo miglioramento.



## **1. Problematiche di base riguardanti la stabilità dimensionale del legno**

Per comprendere le tematiche affrontate in questo lavoro è necessario un inquadramento generale su quelli che sono i meccanismi di adeguamento del legno alle variazioni termo-igrometriche in cui il manufatto si trova, partendo dai suoi caratteri ultra- e micro-strutturali, analizzando poi lo stato attuale delle conoscenze sui meccanismi che regolano il trasporto dell'umidità

### **1.1 Anisotropia del legno dal punto di vista meccanico e igroscopico**

Il processo di formazione del legno nell'arco di vita dell'albero porta ad una complessità delle sue caratteristiche che si riflette poi nei suoi comportamenti una volta in opera. Il legno è, trascurando le eventuali anomalie, un materiale anisotropo: tale anisotropia nasce dalla sua funzionalità e dal suo processo di accrescimento; il cambio, che origina nella sua parte interna lo xilema, sovrappone ogni anno un nuovo strato, come un cappuccio, ai tessuti creati negli anni precedenti nel quale si trovano, genericamente, vasi e fibre. Questi costituiscono il primo fattore di anisotropia del legno: l'orientamento dominante degli elementi cellulari definisce la *fibratura* del legno.

La resistenza meccanica alle sollecitazioni orientate parallelamente alla fibratura è molto più elevata rispetto a quella che il legno ha se sollecitato perpendicolarmente ad essa.

Per quanto riguarda le caratteristiche in direzione perpendicolare alla fibratura, il processo di costruzione delle cellule legnose crea un'ulteriore anisotropia tra direzione radiale e tangenziale delle loro pareti: il differente deposito e orientamento dei polimeri cellulósici, responsabili della resistenza meccanica, nelle due direzioni comporta, infatti, una diversa risposta alle sollecitazioni.

Altrettanto complessa è la risposta del legno alle variazioni di umidità nell'ambiente in cui esso si trova: l'idrofilia della cellulosa fa sì che questa modifichi fortemente le dimensioni degli elementi cellulari. La distribuzione delle catene di cellulosa nelle pareti cellulari orienta il ritiro e il rigonfiamento in modo marcatamente perpendicolare alla fibratura e, tra tangenziale e radiale, a favore della prima. Chiamando  $b_t$ ,  $b_r$  e  $b_l$  i ritiri tangenziale, radiale e longitudinale, i loro rapporti sono di circa:  $b_t:2,6=b_r:1=b_l:0,1$ . Ciò

ha una conseguenza a tutti nota: il legno modifica le sue dimensioni nel tempo al variare delle condizioni igrometriche.

L'interazione tra le varie componenti  $\beta$  fa sì che le variazioni dimensionali complessive siano diverse a seconda della parte di tronco da cui il segato che noi usiamo proviene, e cioè dai rapporti di orientamento tra le cellule: una tavola radiale, cioè ricavata da un piano diametrale, risentirà meno della componente  $b_t$  rispetto ad una tagliata dalla periferia del tronco e, in valore assoluto, si ritirerà e rigonfierà meno.

Questi fenomeni sono noti da sempre agli artigiani che scelgono l'orientamento del taglio a seconda dell'uso che devono fare di un segato. Nel campo d'indagine di questo lavoro, i dipinti su tavola, venivano scelte prevalentemente tavole radiali o sub-radiali, con l'obiettivo di una maggiore stabilità dimensionale: va comunque detto che non sempre ciò era possibile e infatti si trovano frequentemente supporti di dipinti su tavole tangenziali.

## 1.2 Meccanismi legati al trasporto di acqua in direzione trasversale

L'accesso dell'umidità nel legno segue due strade diverse: la *capillarità* e la *diffusione*. I principi fisici che regolano questi meccanismi sono rispettivamente quelli dell'*assorbimento* e dell'*adsorbimento*. Mentre il primo è, genericamente, regolato dalla tensione superficiale del liquido che si muove all'interno del lume cellulare, la diffusione è invece un fenomeno fisico-chimico per cui le molecole d'acqua, sotto forma di soluzione solida<sup>1</sup>, si muovono all'interno della parete cellulare secondo la direzione dettata dai gradienti, con un continuo rompersi e riformarsi in nuovi assetti spaziali di legami idrogeno sugli OH della cellulosa cristallina e, soprattutto, di quella amorfa costituenti la parete.

La **capillarità** è un fenomeno di **assorbimento** per cui l'umidità si muove sotto forma di acqua libera e vapore attraverso i lumi cellulari, secondo le leggi che regolano il moto dei fluidi, che nel legno può essere:

- *laminare*: ha andamento di tipo parabolico, con velocità = 0 in prossimità delle pareti e massima al centro del flusso; i parametri con cui viene definito sono la *permeabilità* la quale segue la legge di DARCY:

---

<sup>1</sup> GIORDANO G., Tecnologia del Legno, 1988, UTET Torino

$$k = \frac{V \cdot L}{A \cdot t \cdot \Delta P} \left( \frac{\text{cm}^3}{\text{cm} \cdot \text{atm} \cdot \text{sec}} \right)$$

e la *portata*, che segue la legge di HAGEN-POISEUILLE:

$$q = \frac{\mathbf{p} \cdot r^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot \mathbf{h} \cdot L} \left( \frac{\text{cm}^3}{\text{sec}} \right)$$

- *turbolento*: è quello che si verifica in prossimità delle perforazioni tra i vasi, quando la velocità è necessariamente molto maggiore di quella all'interno del vaso, per cui l'attrito interno alla massa in movimento diviene proporzionale al quadrato della velocità in queste condizioni il flusso non rispetta più la legge di DARCY ma ha un andamento caotico per la cui descrizione matematica si ricorre a fattori di correzione appositi.

Il trasporto di acqua per capillarità in direzione trasversale è molto più lento e meno importante di quanto lo sia in direzione longitudinale.

La **diffusione** è invece un fenomeno di natura fisico-chimica in cui i dipoli dell'acqua vengono **adsorbiti** sugli OH della catena cellulosica formando degli strati mono- o plurimolecolari che cambiano dinamicamente di spessore al variare del gradiente di umidità che si instaura tra strati adiacenti del legno e che, a seconda della sua intensità guida la rapidità e la direzione della migrazione. Se ci troviamo in una situazione in cui il gradiente viene mantenuto costante nel tempo (*steady state*) lo spessore degli strati di molecole adsorbite ha un andamento decrescente di tipo asintotico dalla superficie più umida a quella più secca. Se invece ci troviamo in uno stato transitorio (*unsteady state*) il gradiente varierà in modo dinamico, riducendosi fino ad annullarsi una volta che il legno abbia raggiunto l'equilibrio con le condizioni ambientali circostanti. Il fenomeno richiede energie di attivazione piuttosto basse, data la labilità del legame a ponte di idrogeno che si forma, permettendo così una rapidità di risposta da parte del legno e una reversibilità delle disposizioni di queste molecole che è alla base dei complessi comportamenti deformativi oggetto di questo lavoro.

Vi sono molti modelli per spiegare questo tipo di traslocazione dell'umidità<sup>2</sup>: la più conosciuta è la BET (dal nome degli autori Brunauer, Emmett e Teller) del 1938, un'equazione che considera la sommatoria degli strati monomolecolari dai quali le molecole d'acqua hanno sufficiente energia cinetica per abbandonare lo strato al quale appartengono: l'energia è via via inferiore all'allontanarsi dallo strato più prossimo ai *sorption sites*. L'equazione parte dalla distribuzione di Boltzmann per la quale il numero di molecole con sufficiente energia cinetica varia secondo una curva logaritmica in funzione della temperatura e della costante dei gas. La BET ha la seguente forma:

$$\frac{h}{M(1-h)} = \frac{1}{M_m C} + \frac{(C-1)h}{M_m C}$$

dove M = contenuto di umidità

$h = p/p_0$  rapporto tra la pressione di vapore dello strato e quella di saturazione

C = costante fra i rapporti tra aree di scambio  $A_1/A_0$  e  $A_i/A_{i-1}$  per  $i \neq 1$

$M_m$  = contenuto di umidità possibile nel singolo strato

Il limite intrinseco alla BET è costituito dal ritenere potenzialmente infinito il numero degli strati di molecole d'acqua coinvolte nel fenomeno sorbitivo. In realtà la linea di proporzionalità diretta di  $\frac{h}{M(1-h)} = f(h)$  aderisce correttamente ai dati sperimentali fino

ad un  $h = 0,4$ . Al fine di migliorare l'aderenza del modello anche a valori di  $h$  superiori gli stessi Autori hanno elaborato una nuova formula che mostra una miglior rispondenza per un numero di strati di 6, 7 e 8 molecole.

L'approccio proposto da HAILWOOD e HORROBIN nel 1946 parte invece dal presupposto che l'acqua adsorbita sul legno esista in parte come acqua di idratazione e in parte come soluzione solida: da questa interpretazione nasce una curva sigmoide di andamento molto simile ai dati sperimentali. Questo modello fornisce anche delle interessanti indicazioni sull'*isteresi* nelle fasi di adsorbimento e desorbimento, spiegabile co-

---

<sup>2</sup> SKAAR C., *Water in Wood*, 1972, Syracuse University Press

me indisponibilità di alcuni siti in fase di adsorbimento che ritornano disponibili, una volta inumiditi, per le forze di rigonfiamento.

Ulteriori miglioramenti sono stati apportati da MALMQUIST nel 1959, il quale ha introdotto il *fattore di coesione* ( $k_c$ ) che spiega l'inerzia iniziale di inumidimento del legno anidro, dovuta alla vicinanza tra le microfibrille, tale da impedire l'accesso di molecole d'acqua, cosa che non si verifica in fase di completo inumidimento, dove la distanza è tale da non influire sul libero movimento della soluzione.

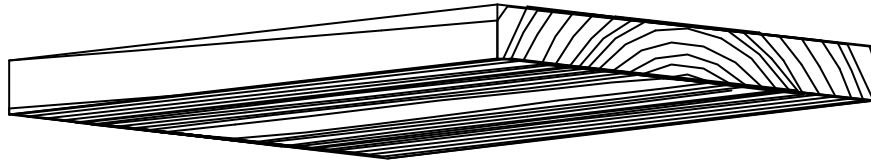
Un'altra interpretazione è quella proposta da PEIRCE nel 1929 che divide l'acqua adsorbita in una frazione  $\alpha$ , fortemente legata ai siti e una  $\beta$  legata più debolmente.

ENDERBY e KING teorizzano la curva di adsorbimento come la risultante dell'interpolazione tra la curva del *monolayer* che si asintotizza al valore 0,4 di  $h$  e quella del *multilayer* che cresce esponenzialmente a partire da questo valore.

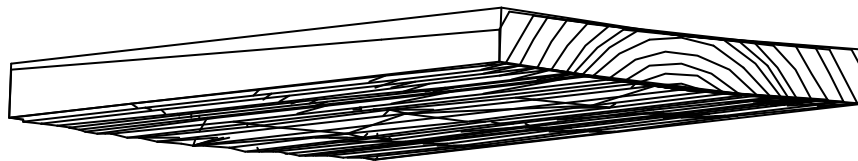
### 1.3 Deformazioni in campo igroscopico

Come visto nella precedente sintesi, l'accesso di acqua all'interno delle catene cellulose provoca un loro rigonfiamento che genera conseguentemente l'aumento dimensionale delle cellule legnose. Questo succede al di sotto di un limite caratteristico, al di sopra del quale l'acqua, sotto forma di vapore, viene definita *libera*, in quanto non legata alla parete cellulare e quindi non coinvolta in fenomeni di ritiro e rigonfiamento. Al di sotto di questo limite, generalmente definito intorno al 30%, ma con ampia variabilità a seconda delle specie e della composizione del segato da alborno o durame, il legno perde l'acqua *legata* ai gruppi ossidrilici delle catene cellulose, innescando il ritiro volumetrico. La parete della cellula legnosa è costituita da vari strati concentrici, la parete primaria, la secondaria e la terziaria: quella di maggior spessore e, probabilmente, maggiormente responsabile delle grandi deformazioni in direzione trasversale è la secondaria; questa è a sua volta composta da tre strati denominati S1, S2 e S3. Lo strato S2 è il più importante per quanto riguarda l'anisotropia igroscopica del legno: considerando schematicamente la cellula simile ad uno scatolato, in questo strato le catene di cellulosa non sono orientate secondo l'asse longitudinale ma sono inclinate con un angolo, denominato MFA (*micro-fibril angle*); inoltre lo spessore della faccia radiale è solitamente maggiore di quello tangenziale. Da ciò deriva che al momento del rigonfia-

mento la componente tangenziale sarà marcatamente più forte di quella radiale. L'anisotropia di queste deformazioni si manifesta diversamente a livello macroscopico:



a)



b)

Fig. 1 Imbarcamento in tavola sub-radiale sottoposta a desorbimento: a) tempo  $t_0$  b) tempo  $t_x$

- per quanto riguarda tondame e squadrati, dove le due dimensioni trasversali sono distribuite in un solido di rotazione assimilabile ad un cilindro, le tensioni generate dal maggiore ritiro angolare rispetto a quello radiale superano la resistenza del materiale a trazione perpendicolare alla fibratura, provocando l'apertura delle *fessurazioni*, equilibrio traumatico con le nuove condizioni di umidità del legno;
- in presenza di tavole, dove la libertà di ricollocazione spaziale delle cellule legnose è maggiore, la riduzione volumetrica si manifesta sotto forma di deformazioni risultanti da coppie di forze diverse nei singoli punti a seconda che questi siano più o meno

tangenziali. Rinviano al paragrafo successivo la cinematica del processo di deformazione igrometrica, passando dal  $t_s$  in cui il legno si trova al punto di saturazione delle fibrille al  $t_0$  in cui le fibre sono a  $U = 0\%$  e ipotizzando l'assenza di irregolarità strutturali del materiale la tavola passerà dalla situazione *a* alla situazione *b* (ved. fig. 1) in modo differenziato a seconda della sua posizione originaria all'interno del tronco da cui è stata ricavata. Il tipo di deformazione che si manifesta in modo più accentuato nelle tavole più tangenziali viene definito *imbarcamento*.

- Le altre deformazioni che possono intervenire nel legno in presenza di anomalie strutturali, quali *legno di reazione* o *deviazioni della fibratura*, sono l'*arcatura*, la *falcatura* e lo *svergolamento*: si tralascia la trattazione di queste, dato che esulano dalle misure delle quali si occupa questo lavoro.

## 1.4 Comportamento meccano-sorbitivo

La complessità di risposta del legno alle variazioni cicliche di umidità impone un'analisi

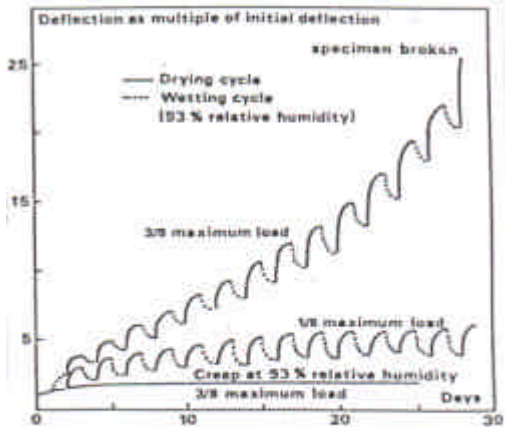


Fig. 1 Longitudinal creep test in bending for small beech specimens, from Hearman and Paton (1964)

Fig. 2 Esempio di comportamento meccano-sorbitivo (da GRIL)

più approfondita della risposta meccanica del legno allo stimolo igrometrico: in un articolo del 1996 GRIL<sup>3</sup> fa un breve riassunto dei passi che hanno portato all'evidenza sperimentale del comportamento meccano-sorbitivo, inteso come modificazione del comportamento viscoelastico del legno sottoposto a cicli igrometrici ripetuti. Già a partire dagli anni '60 ARMSTRONG e KINGSTON<sup>4</sup> avevano scritto degli effetti delle variazioni di umidità sul *creep*; nel '64 HEARMAN e PATON<sup>5</sup> pubblicavano i risultati di prove a flessione su provini di faggio per cui, anche se sollecitati a  $\sigma$  uguali, molto inferiori alla  $\sigma_{rott}$  ( $\sigma = 3/8 \sigma_{rott}$ ), quelli sottoposti a

variazioni cicliche di 24 ore dell'UR tra il 93% e il 30% arrivavano a rottura, con un incremento di freccia molte volte superiore a quella elastica; quelli sollecitati in regime di UR costante al 93% non superavano il doppio della freccia elastica (ved. fig. 2). Molto rilevante era l'entità del suo scostamento rispetto al valore calcolato, che doveva essere dell'ordine di grandezza di quello della prova a UR = 93%. Un altro fattore sorprendente fu constatare che responsabile dell'incremento di freccia fosse la fase di riduzione dell'UR.

Nel 1976 GROSSMAN<sup>6</sup> chiamò il fenomeno *meccano-sorbitivo* e propose alcuni parametri per la sua modellizzazione.

<sup>3</sup> GRIL J., *Principles of mechano-sorption*, 1996, Stuttgart, International COST 508 Wood Mechanics Conference

<sup>4</sup> ARMSTRONG L. D., KINGSTON R. S. T., *Effect of Moisture changes on creep in wood*, 1960, Nature

<sup>5</sup> HEARMAN R. F. S., PATON J. M., *Moisture content changes and creep of wood*, 1964, Forest Products J.

<sup>6</sup> GROSSMAN P. U. A., *Requirements for a model that exhibits Mechano-sorptive behaviour*, 1976, Wood Sci. Technol.



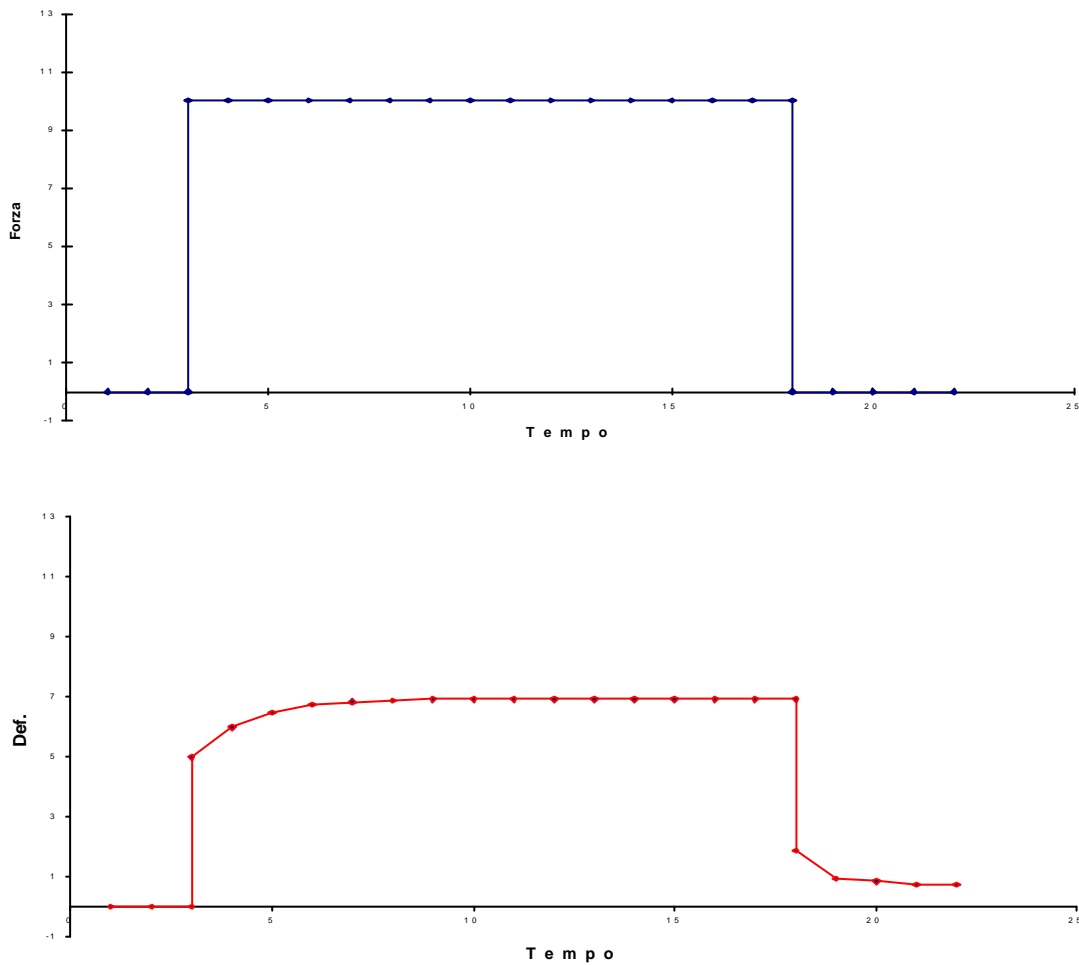
Quanto su detto mostra che questo aspetto influenza in modo non trascurabile un'ampia gamma di tematiche:

- il comportamento dipendente dal tempo: il *creep*, il rilassamento, la loro combinazione e le prove in controllo di carico e di deformazione;
- ogni scala di prova, da quelle dinamiche alle quasi-statiche;
- ogni direzione anatomica che venga sollecitata (radiale , tangenziale o longitudinale);
- tutte le possibili sollecitazioni: compressione, trazione, flessione, taglio e torsione;
- qualsiasi dimensione di prova, dai provini piccoli e netti al legname in dimensione d'uso;
- qualsiasi materiale a base legno.

Evidentemente non poteva esserne esente il settore d'indagine di questo lavoro e vedremo in un prossimo paragrafo quali siano le implicazioni che ne derivano.

Ciò che emerge subito chiaramente è il fatto che le dinamiche igrometriche nei riguardi del legno interferiscono fortemente con il suo comportamento meccanico, sovrappo-  
nendosi in modo non trascurabile alle tradizionali distinzioni in *deformazioni elastiche*, intese come totalmente recuperabili, e *deformazioni plastiche*, suddivise come *a recupero ritardato* e *permanenti* come mostrato nei sovrastanti grafici di deformazione in funzione del tempo:

Il fenomeno schematicamente rappresentato in Graf. 1 prende il nome di *creep*, o scorrimento viscoso; l'altra faccia di questo comportamento è il *rilassamento* dove, imponendo al legno una deformazione costante, si legge la resistenza che questo esercita nel tempo, decrescente con un andamento asintotico esattamente comparabile a quello del *creep*.



Graf. 1 Schematizzazione del *creep*

Su questi fenomeni, dipendenti dalla rottura e ricostituzione in posizioni differenti dei legami idrogeno tra le catene cellulosiche, va a interferire come un amplificatore il comportamento mecano-sorbitivo, con i sorprendenti effetti visti sopra.

Per quanto riguarda gli effetti mecano-sorbitivi di variazioni ambientali di lungo periodo, quali possono essere considerate quelle che possono aver interessato i dipinti su tavola posti in ambiente a clima variabile, non vi sono informazioni sufficienti, ma la loro indagine, ovviamente su scala ridotta, è di grande importanza: gli studi svolti su questi temi hanno una grande ricaduta nel campo dell'essiccazione dei segati, dove i cicli di condizionamento sono necessariamente molto rapidi. È però immediatamente percepibile l'effetto che questo fenomeno potrebbe avere, per quanto riguarda la *memoria*, su individui dalla lunga storia di variazioni climatiche. Quelle che potevano essere le caratteristiche meccaniche del legno originariamente impiegato per la costruzione del supporto del dipinto possono essere alterate a tal punto da non poter prevedere quali

siano i valori caratteristici del materiale antico rispetto a quelli del materiale nuovo: in questo senso si può immaginare un *ageing effect* di non trascurabile importanza.

Le domande che scaturiscono per quanto riguarda le variazioni di lungo periodo sono principalmente le seguenti:

- le modifiche delle caratteristiche meccaniche dovute a sollecitazione meccano-sorbitiva sono permanenti o reversibili quando al disotto del punto di rottura?
- la rapidità dello stimolo e la sua reiterazione sono fattori che influenzano qualitativamente e quantitativamente questo comportamento?

Possiamo immaginare che le risposte richiedano approfondimenti mirati dato il breve periodo da cui si è cominciato ad investigare questo settore delle caratteristiche del legno.

## **2. Problemi specifici di stabilità dimensionale dei dipinti su tavola intesi come individui complessi**

### **2.1 I gradienti di umidità nello spessore**

L'inquadramento dello stato della ricerca sul comportamento del legno in ambiente variabile dal punto di vista igrometrico ci permette ora di affrontare le problematiche inerenti lo specifico dei dipinti su tavola, descritte da BUCK<sup>7</sup> nel 1962, dove i fenomeni sopra descritti subiscono l'interferenza di vari altri fattori.

Nel meccanismo di diffusione in *unsteady state* (quello che abbiamo studiato in questo lavoro), quello, cioè, in cui si passa da un momento  $t_0$  a uno  $t_x$  con variazione dell'UR unidirezionale e tale da permettere l'equilibramento della tavola alle nuove condizioni (non come nello *steady state*, dove il legno è mantenuto in uno stato di equilibrio dinamico), è presente l'effetto dei *gradienti*, differenze di umidità tra strati adiacenti che traslano via via verso il centro della tavola: si instaurano così nello spessore della tavola stati tensionali *transitori* dovuti alla disomogeneità dimensionale degli elementi cellulari più o meno inumiditi; ne possono derivare deformazioni temporanee che possono essere concordi con quelle che saranno le deformazioni definitive della tavola una volta equilibrata o discordi: ciò dipende dal modo in cui le tensioni dovute alle sollecitazioni di trazione (o compressione) che si instaurano tra strati adiacenti rispettino quello che sarà poi il nuovo assetto dimensionale al nuovo stato di equilibrio: dal punto di vista meccanico, partendo da una situazione di perdita di umidità i passaggi possono essere schematizzati come segue:

- lo strato superficiale della tavola perde umidità più rapidamente rispetto allo strato immediatamente sottostante e quindi tenderebbe a contrarsi; ciò gli è impedito dal vincolo costituito dallo strato inferiore, arrivando così ad uno stato temporaneo di sollecitazione a trazione sullo strato esterno e di compressione su quello più interno;

---

<sup>7</sup> BUCK R. D., *Some applications of mechanics to the treatment of panel paintings*, 1962, in "Recent advances in Conservation", Butterworths, London

- via via che gli strati, di spessore infinitesimo, passano dal primo livello igrometrico a quello di equilibrio le tensioni si scaricano e il gradiente trasla verso l'interno della tavola;
- da questo tipo di sollecitazione deriva il fatto che gli strati esterni tenderebbero a flettersi verso quelli più interni;

la forza di questo fenomeno è influenzata dall'entità del gradiente generato nello spessore e dallo spessore stesso: se lo stato transitorio di tensione è molto rapido e lo spessore della tavola è sufficientemente grande sarebbe ragionevole supporre che l'effetto dei gradienti si "scaricherà" per rilassamento viscoelastico tra strati contigui, senza raggiungere il centro della tavola. Questo è comunque uno degli aspetti che questo lavoro cerca di investigare.

## **2.2 I diversi tassi di scambio tra faccia dipinta e faccia libera**

I punti sinteticamente inquadrati per quanto riguarda la diffusione in direzione trasversale in stato non stazionario partono dal presupposto di facce a *diffusività* omologa, cosa che nei dipinti su tavola non è frequente; anche nel caso di impermeabilizzazione sulla faccia posteriore nulla ci garantisce sull'uguale diffusività rispetto alla faccia dipinta: ciò implica l'instaurarsi di gradienti asimmetrici che sottopongono la tavola a stati di deformazione temporanea diversa da quella definitiva una volta che la tavola sia giunta all'equilibrio con le nuove condizioni di umidità imposte. UZIELLI<sup>8</sup> rappresenta chiaramente le diverse possibilità di azione dei gradienti asimmetrici nei meccanismi deformativi: uno degli aspetti più importanti è rappresentato dalla possibilità per cui, qualora la sollecitazione dovuta ai gradienti superi valori critici per la resistenza a compressione in direzione trasversale alla fibratura, si verifichino deformazioni permanenti di tale entità da modificare la godibilità di un dipinto. Tutto ciò nell'ipotesi che la deformazione (temporanea o permanente) del legno non induca tensioni nello strato dipinto tali da provocare distacchi o *sbollamenti* del colore.

---

<sup>8</sup> UZIELLI L., 1992, *Danni causati ai dipinti su tavola da variazioni termoigrometriche, e loro prevenzione*, in "Conservazione dei dipinti su tavola", Nardini editore

### **2.3 Interferenze tra gradienti e anisotropia dei ritiri**

Un ulteriore fattore del quale tenere conto nell'analisi dei comportamenti deformativi è dato dall'interferenza tra l'effetto transitorio dei gradienti e quello dell'anisotropia dei ritiri: la tendenza deformativa di una tavola è determinata dall'orientamento degli anelli nel suo spessore, mentre l'effetto dei gradienti si distribuisce sulle facce in funzione della diffusività del materiale. Pertanto si possono avere molteplici possibilità di interazione con il risultato che i gradienti possono amplificare o ridurre il manifestarsi delle deformazioni legate all'anisotropia del materiale, fino ad arrivare al caso limite dell'inversione dell'imbarcamento dovuta allo stato di tensione transitorio.

### **2.4 Storia dei cicli di inumidimento e suoi effetti sulla sensibilità individuale di un dipinto su tavola**

Se quanto ipotizzato nel capitolo precedente riguardo alla *memoria* dei cicli di equilibrio igrometrico in clima variabile ha effetti permanenti sull'intima struttura del supporto ligneo dei dipinti su tavola, diviene indispensabile trovare dei criteri di correlazione tra il fattore tempo e questa alterazione delle caratteristiche meccaniche del materiale: questo tipo d'indagine potrebbe rendere comprensibile la variabilità di comportamento da un individuo ad un altro a parità di altri fattori, quali le caratteristiche tecnologiche dei materiali o le tipologie di vincolo e di isolamento.

Tutto ciò a ulteriore conforto di quanto il dipinto su tavola sia il luogo d'incontro di un grande numero di variabili indipendenti tra loro, delle quali finora troppo poco sappiamo e verso la cui comprensione, seppure a livello inizialmente molto semplificato, tende questo lavoro.

### **3. Breve storia degli interventi strutturali adottati per contrastare le deformazioni nel piano e fuori piano dei dipinti su tavola**

Nello studio dei dipinti su tavola non è possibile scindere i due elementi legno e dipinto vero e proprio, in quanto l'intima unione di materiali così eterogenei, i quali rispondono in tempi e modalità diverse al variare dei fattori ambientali, rende problematica la conservazione e il restauro delle opere stesse.

La stabilità degli stati preparatori e pittorici, infatti, è fortemente condizionata dai delicati rapporti di equilibrio ed elasticità che legano legno, gesso, colla e colore.

Nella maggior parte dei casi, comunque, i danneggiamenti più gravi alla struttura e alla godibilità del dipinto devono essere attribuiti all'azione, diretta o indiretta, del supporto ligneo<sup>9</sup>.

Le variazioni dimensionali e le deformazioni che il legno subisce in seguito a variazioni termo-igrometriche possono causare stati di tensione che si ripercuotono sullo strato pittorico che, avendo un diverso grado di deformabilità subisce una serie di traumi che possono risultare anche di gravissima entità. Ad esempio il sollevamento del colore dovuto all'alternanza di fasi di rigonfiamento e ritiro del legno causati da sbalzi termo-igrometrici. Bolle di colore localmente distaccato, sovrapposizioni fra due lembi di pellicola pittorica, la formazione di cretti, la cosiddetta *micro-craquelure* o, ancora, la sconnessione di due tavole con conseguenti lesioni estese e spaccature nel colore sono ulteriori danni attribuibili al ritiro del legno.

La tecnica di costruzione dei manufatti lignei realizzati dall'inizio del Medioevo fino a tutto il XVI secolo, secolo in cui si conclude la produzione delle opere dipinte su tavola, necessitava, quindi, di una profonda conoscenza del materiale legno e del suo comportamento. Grande importanza rivestiva la scelta del materiale e la conoscenza delle tecniche di lavorazione: la specie legnosa è quasi sempre pioppo o tiglio, legni leggeri di pasta omogenea e di buona lavorabilità eccezioni sono date da castagno e abete. La scelta delle tavole è accurata, risultando preferite quelle con fibratura diritta, un taglio

---

<sup>9</sup> UZIELLI L., 1992, *op.cit.*

mediano se non radiale, scarto delle parti marginali contenenti alborno ottenendo così tavole di minor larghezza, ma con una sezione piuttosto spessa. Tutti questi elementi tendono a garantire la maggior stabilità possibile nei confronti di eventuali future deformazioni<sup>10</sup>.

Le tavole costituenti il supporto del dipinto dovevano essere assemblate a formare un vero e proprio pezzo unico che doveva assicurare la massima sicurezza di comportamento sia all'interno dei suoi singoli costituenti sia, e soprattutto, nella sua totalità. Da qui la necessità di un sistema di sostegno ai supporti lignei che risolvesse il bisogno immediato di mantenere stabile localmente un insieme a volte anche molto complesso, voluminoso e pesante, e che contrastasse l'estrema mobilità naturale del legno come materiale, anche dopo e al di là di una perfetta stagionatura.

Le tavole venivano incollate lungo lo spessore con una colla a base di caseinato di calcio e connesse tra loro per mezzo di incastri tramite cavicchi di sezione circolare o delle ranghette (invece rettangolari) in legno duro, disposti gli uni e le altre senza colla e con la venatura ortogonale rispetto al supporto.

Il problema del sostegno veniva affrontato in varie maniere, ma sempre usando un sistema di *traverse*, cioè di aste di legno, di solito di un legno più robusto del supporto, spesso di conifera, poste in senso trasversale sul retro del supporto precedentemente assemblato.

Tra gli esempi di sostegno mediante traverse se ne citano tre fra i più comuni, il primo di tipo *fisso* e gli altri due di tipo *mobile*. Con il primo tipo le traverse venivano direttamente inchiodate al supporto *dal diritto*, cioè dalla parte su cui doveva posare il dipinto. Le teste dei chiodi venivano *affogate* cioè spinte in dentro, nei casi migliori ricoperte da un tassello o altrimenti semplicemente stuccate con cera.

Nel tipo mobile le traverse venivano poste in sedi precedentemente ricavate sul retro del supporto. Tali traverse hanno una sezione detta *a coda di rondine* ed hanno il vantaggio di essere mobili, cioè scorrevoli. Tuttavia tale mobilità è opportunamente frenata dalla loro forma rastremata in senso longitudinale.

---

<sup>10</sup> ALLEGRETTI O., 1994, *Stabilità dimensionale del supporto ligneo di un dipinto medioevale: ricerche sperimentali sull'influenza della traversatura*, Tesi di Laurea



Altrimenti le traverse potevano essere collegate al supporto da perni metallici ad anello, infissi nel supporto stesso, trapassanti la traversa e bloccati infine da una barretta anch'essa metallica. Ovviamente anche in questo caso il pernio era infisso nel supporto *dal davanti ed affogato* analogamente ai chiodi di cui si è detto sopra. Questo sistema mantiene le traverse completamente *mobili*<sup>11</sup>

Il risultato delle deformazioni degli elementi facenti parte di un supporto ligneo non è evidentemente quello che i singoli costituenti mostrerebbero se fossero indipendenti, anziché collegati gli uni agli altri: pur deformandosi secondo modalità e quantità proprie, i collegamenti impongono che le deformazioni siano congruenti fra loro, generando reazioni vincolari che tendono a contrastare le deformazioni non consentite (UZIELLI, 1992 *op. cit.*).

L'effetto contrastante che le traverse esercitano emerge quando si confronta il loro grado di rigidità (tipo fisso, tipo mobile) in funzione delle variazioni di umidità

- per limitate variazioni di umidità che generano deformazioni di piccola entità le azioni di vincolo generate dalle traverse hanno un effetto positivo in quanto le tensioni generate dalle forze vincolari sono assorbite senza ripercussioni da limitate deformazioni elastiche. In questo caso, quanto più la traversatura è rigida tanto più essa contribuisce ad eliminare o a ridurre deformazioni che possono causare peggioramento della planarità del dipinto, con conseguente danno estetico e l'insorgere di pericolose tensioni fra supporto e dipinto generate da contrazioni e dilatazioni;
- per elevate variazioni di umidità viceversa, le azioni di vincolo possono produrre effetti negativi per il tavolato e quindi per il colore: opponendosi alle forti deformazioni a cui tende il tavolato, tali azioni generano infatti, nel legno e nelle connessioni, tensioni che non possono essere assorbite senza provocare fessurazioni, sconnessioni, rotture nel supporto e quindi gravi danni al colore.

---

<sup>11</sup> Danti C., 1983, *Restauro del supporto di dipinti su legno. Metodologia di condizionamento mediante traverse scorrevoli*, in *Legno nel restauro e restauro del legno*, Palutan Editrice, Milano

Considerando le traverse come elementi piuttosto rigidi nei confronti delle sollecitazioni a flessione, e praticamente indeformabili a compressione e a trazione, la libertà di movimento consentito al tavolato dipende significativamente dal tipo di collegamento che li unisce. L'azione della traversa viene finalizzata principalmente alla riduzione dei movimenti di imbarcamento, in quanto la riduzione dei movimenti lineari (ritiro e rigonfiamento), ottenibili con l'uso di traverse di tipo fisso, causano in seguito ad elevati sbalzi di umidità danni maggiori dei benefici. Una traversa scorrevole, invece, impedisce o limita fortemente l'imbarcamento, ma consente anche liberamente il ritiro e il rigonfiamento del tavolato. Compromesso questo che offre i maggior benefici, limitando il più possibile gli effetti collaterali. Tuttavia nessun sistema di traversatura può garantire in misura ottimale la conservazione e la godibilità del dipinto a seguito di qualsiasi variazione termoigrometrica ambientale.

I più grandi laboratori di restauro del mondo sono impegnati nello studio su quale sia il modo più corretto di intervenire nelle svariate situazioni: da come intervenire nel caso una traversatura troppo rigida abbia già creato danni rilevanti a come garantire una buona conservazione di individui giunti a noi attraverso secoli in condizioni perfette: le esperienze fin qui maturate sono state per lo più basate sull'esperienza diretta di abilissimi restauratori, dei cui interventi possiamo beneficiare in molti musei, ma è indispensabile un approccio più scientifico che comprenda profondamente i meccanismi di interazione tra tavola e traversatura.

## 4. La Traversa Strumentata

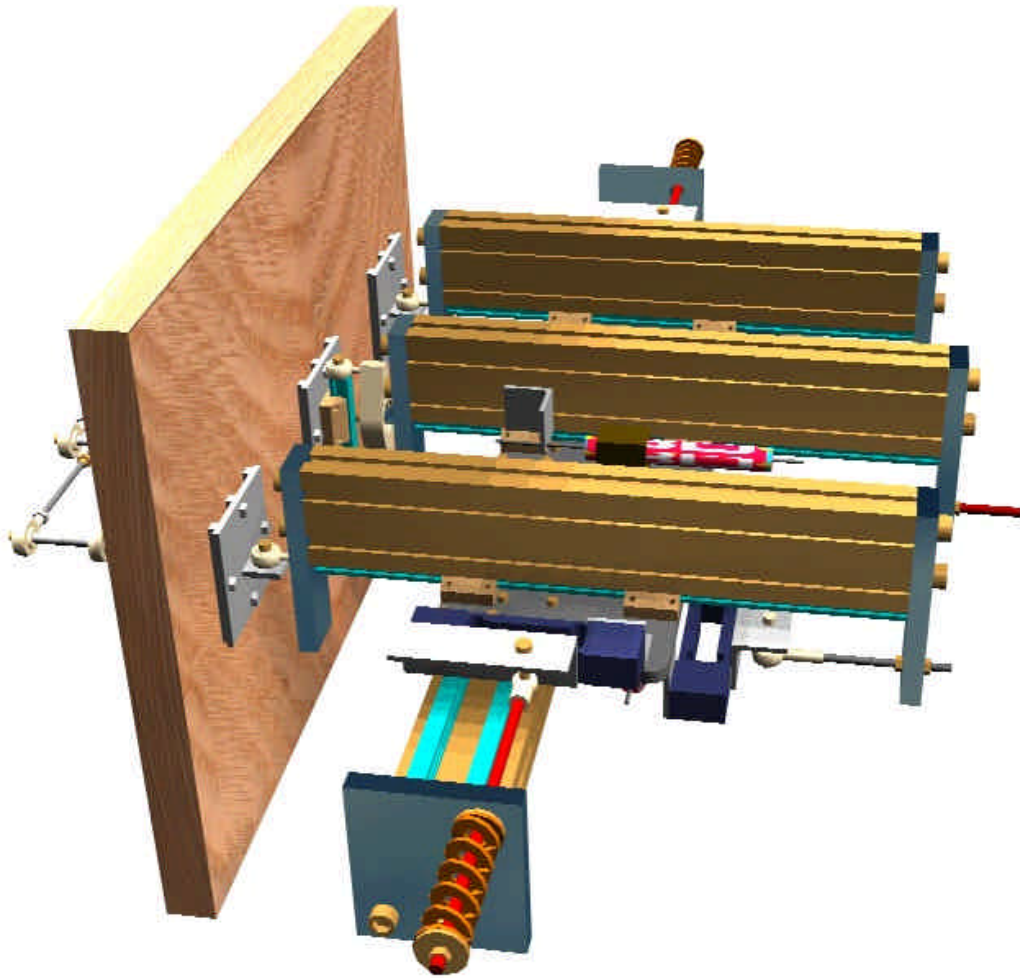


Fig. 3: La Traversa Strumentata (acronimo MCB)

### 4.1 Scopi

L'idea costruttiva che sta alla base della Traversa Strumentata (Monitoring Cross Beam = MCB) è quella di ottenere uno strumento di misura delle deformazioni e delle forze d'imbarcamento che si sviluppano nel supporto di un dipinto scomponendole in componenti ortogonali come avviene in un sistema di assi cartesiani.

La necessità di un apparato di misura di questo tipo è nata nel momento in cui si è cominciato ad approfondire, da parte dei restauratori, l'effetto che il vincolo di un elemento più rigido, nelle sue diverse possibilità di azione, produce sulla tavola: la realizzazione di singoli modelli per ciascuna delle alternative possibili avrebbe introdotto una variabilità dei sistemi da non permettere una comparazione ragionevole tra i risultati ottenuti.

La MCB nasce proprio per risolvere questo problema: il sistema è unico, le sue caratteristiche meccaniche sono note e caratterizzate e la sua funzionalità permette di imporre alla tavola tutto lo spettro dei gradi di impedimento possibili, dalla totale libertà di deformazione alla rigidità di una traversatura bloccata.

Dato che le deformazioni igrometriche di imbarcamento si possono scomporre in deformazioni *nel piano* e *fuori piano*, intendendosi con piano quello della tavola, l'unico modo per seguire, in tempo reale, un punto di misura nel suo cammino deformativo è quello di avere uno strumento sul quale sia possibile fissare un'origine dalla quale ricavare poi tutti i  $\Delta$  successivi.

Nella MCB viene materializzato un piano XZ, perpendicolare alla tavola, sul quale è possibile visualizzare il reale cammino dei punti di misura rispetto all'origine che si trova all'esterno della tavola stessa.

Una sostanziale novità nella MCB è costituita dalla possibilità di ottenere, con lo stesso principio, informazioni sulle tensioni che si manifestano nella tavola quando, al variare dell'UR, la sua deformazione venga impedita con dei vincoli. Le forze applicate nei centri di rotazione dei vincoli applicati alla tavola, scomposte ortogonalmente sugli assi X e Z secondo la regola del parallelogramma, vengono lette da trasduttori di forza applicati alle estremità degli assi stessi.

Rifacendosi alle nomenclature adottate nel lavoro di Allegretti<sup>12</sup>, la MCB ha in sé sia il sistema a ponte (PN) per la misura delle deformazioni *fuori piano* che quello a scorrimento assiale (AS) per le variazioni delle dimensioni *nel piano*: entrambi i sistemi, infatti, fornivano soltanto una faccia del problema deformativo: nel sistema PN si ottengono i valori di deformazione sul piano YZ, ignorando lo spostamento dei punti di misura sul piano XY e viceversa nel sistema AS.

---

<sup>12</sup> ALLEGRETTI O., *Sviluppo e caratterizzazione di metodologie per la misurazione delle variazioni dimensionali dei dipinti su tavola*, 1998, Tesi per il conseguimento del titolo di Dottore di Ricerca

Tutto il sistema è monitorato in continuo da computer che acquisisce i segnali provenienti dai trasduttori di spostamento, dalle celle di carico e dai sensori di umidità relativa e temperatura.

Le possibilità di interazione con la tavola che lo strumento deve permettere sono le seguenti:

- MCB completamente libera: si acquisiscono soltanto i dati di deformazione della tavola scomposti in X e Z forniti dai trasduttori di spostamento;
- MCB completamente bloccata: entrano in forza le celle di carico, i trasduttori non leggono deformazione, se non quella derivante dalla deformazione della MCB, tanto minore quanto più alta è la sua rigidità;
- MCB bloccata con elementi di rigidità calibrata, non infinitamente grande in rapporto a quella della tavola: si avrà una deformazione, ridotta rispetto alla tavola libera, contemporaneamente al manifestarsi di tensioni minori rispetto alla MCB totalmente bloccata.

Per quanto riguarda la ricostruzione tridimensionale della deformazione esistono sistemi non a contatto (*scanner 3D, holographic interferometry*) basati su tecnologie ottiche che forniscono un reticolo di punti molto fitti le cui coordinate permettono di ricostruire ed elaborare la forma del dipinto nello spazio vettoriale di un CAD e ricavare la funzione che meglio descriva le variazioni dimensionali dell'oggetto reale.

Ma il motivo per cui è stata concepita la MCB a livello di prototipo è quello di indagare per confronto la risposta del legno ai diversi tipi di stimolo igrometrico in condizioni note e soprattutto per quanto riguarda le forze:

- rispetto alla variabilità ambientale, tipologica, strutturale e storico-deformativa dei veri dipinti esposti nei musei la tavola sottoposta a prova è perfettamente conosciuta e su di essa è possibile qualunque intervento volto alla simulazione controllata degli aspetti di nostro interesse.
- l'approccio deve essere necessariamente costruito per passi successivi e questo è il criterio in base al quale abbiamo pianificato le prove da svolgere.

#### 4.2 Inquadramento delle grandezze da misurare

La Traversa Strumentata (successivamente denominata MCB = Monitoring Cross-Beam) nasce come strumento di misura di deformazioni e forze esercitate da una tavola di legno al variare delle condizioni igrometriche ambientali.

Queste grandezze vengono misurate lungo un allineamento di punti situati su un piano che interseca la tavola perpendicolarmente all'andamento della fibratura.

Le grandezze che la MCB misura vengono espresse in  $\Delta$  mm rispetto a un tempo  $t_0$  per quanto riguarda le deformazioni e in Kg (assoluti) per quanto riguarda le forze.

Le grandezze che si rilevano sulla tavola vengono scomposte, grazie alla geometria della MCB, in due assi ortogonali che chiameremo X per quanto riguarda la direzione parallela all'allineamento dei punti di misura e Z per quanto riguarda quella perpendicolare a detto allineamento.

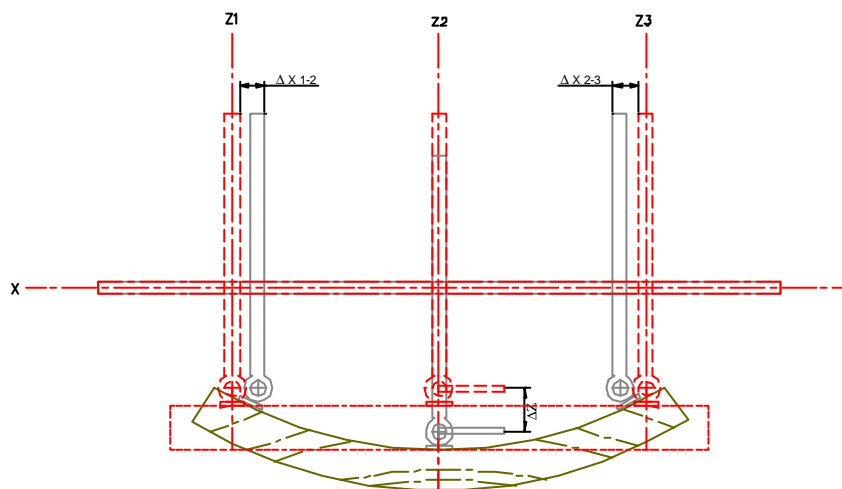


Fig. 4 La scomposizione delle deformazioni in X e Z

La traslazione secondo i due assi è garantita dal tipo di vincoli che fanno sì che l'asse Z1 e Z3, bloccati nel loro scorrimento assiale, possano muoversi solo lungo l'asse X. L'asse Z2, fissato rigidamente all'asse X, può scorrere solo lungo il suo asse.

#### 4.3 L'insieme MCB – tavola: studio dei vincoli

Mentre per quanto riguarda la misura delle deformazioni nella situazione di MCB non bloccata, grazie alle scelte costruttive adottate (a parte gli inevitabili attriti di scorrimento dei vari collegamenti per quanto possibile ridotti al minimo), non si creano stati

tensionali all'interno della struttura della MCB, che quindi non interferisce con la tavola, nello stato di deformazione parzialmente o totalmente bloccata le forze esercitate dalla tavola si trasmettono alla traversa attraverso i tre punti di collegamento presenti.

#### 4.4 **Compatibilità con eventuali deformazioni anomale**

L'obiettivo del progetto è far sì che le forze trasmesse dalla tavola vengano scomposte correttamente nelle componenti X e Z per essere trasmesse ai trasduttori di forza che si trovano alle estremità degli assi.

Nelle condizioni di applicazione della tavola in modo simmetrico rispetto all'asse Z2 le equazioni di equilibrio alla traslazione sono:

$$FZ2 = FZ1 + FZ3$$

$$FX1 = FX3$$

che dà la certezza di una trasmissione diretta delle forze

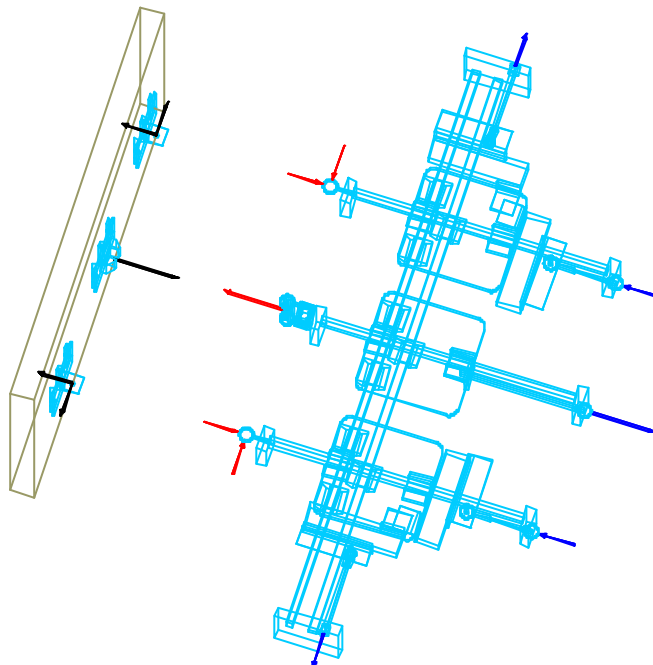


Fig. 5 La corretta trasmissione delle forze tra i sistemi tavola e MCB

Nella fig. 5 le forze applicate dal simulacro alla MCB sono complanari e situate sul piano XZ. Ciò avviene nel caso che la tavola sviluppi solo deformazioni d'imbarcamento: nel caso in cui si sviluppino forze in direzione Y, come nello svergolamento, la MCB sa-

rebbe sottoposta a tensioni per la misura delle quali non è progettata. La soluzione adottata è stata quella di lasciare alla tavola la libertà di deformarsi in questa direzione senza che la MCB eserciti reazioni vincolari. Sui punti 1 e 3 di vincolo sono state poste delle cerniere sferiche, sul punto 2 (affinché il sistema non fosse labile) è stato realizzato uno snodo che avesse un grado di libertà in meno, e cioè la rotazione sul piano YZ. La progettazione ha portato alla creazione dello snodo in fig. 6, costituito da una cerniera cilindrica con libertà di rotazione lungo l'asse Z2 e da una con grado di libertà lungo l'asse Y e da un carrello che consente lo scorrimento lungo l'asse Y.

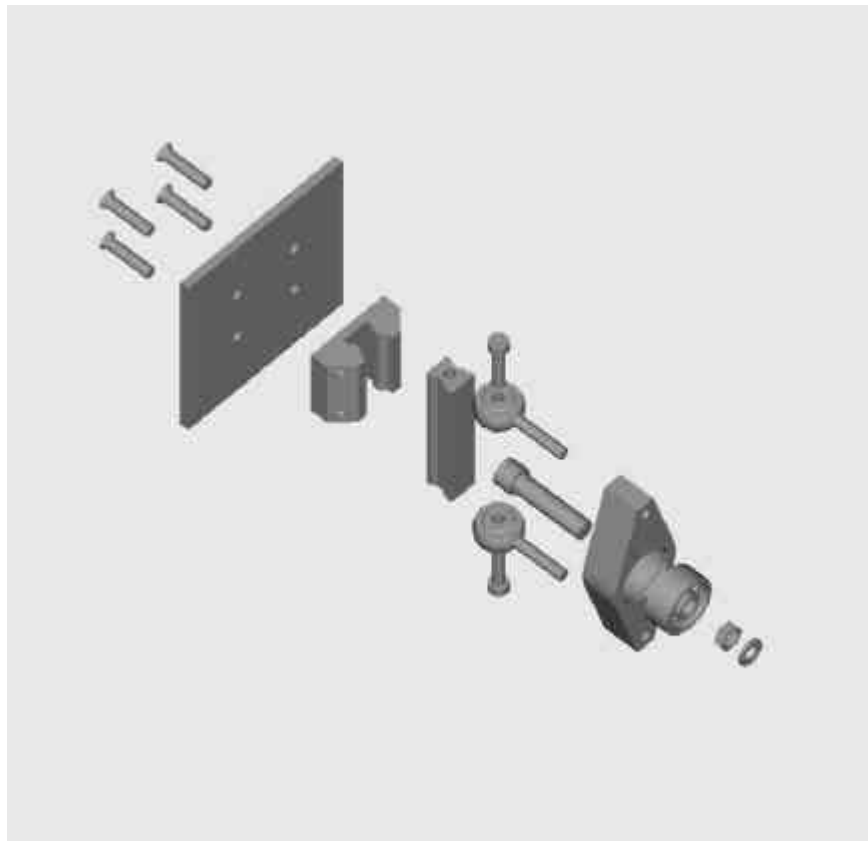


Fig. 6 Esploso del giunto del binario Z2



## **5. Scelte progettuali operate**

### **5.1 Misure rilevate su un piano perpendicolare alla tavola**

La materializzazione del piano XZ (ved. fig. 7) viene realizzato da una struttura di tre rotaie di acciaio STAR<sup>®</sup>, parallele, denominate Z1, Z2, Z3, di cui la centrale, rappresentante l'asse Z, scorrevole rispetto alle altre due e da due perpendicolari e scorrevoli rispetto alle Z, che rappresenta l'asse X.

Lo scorrimento relativo di ogni singola rotaia e la perpendicolarità rispetto all'altro asse è assicurato da due coppie di pattini STAR<sup>®</sup> (ved. fig. 8) a ricircolo di sfere, fissate per mezzo di viti a brugola di 5 mm e dadi sulle facce di una piastra in alluminio forata di 10 mm di spessore (ved. fig. 9):

- è stata fatta la scelta di porre due pattini per ogni rotaia perché fossero evitate distribuzioni anomale delle sollecitazioni sulle sfere, quando sottoposte a sforzi di flessione, nelle prove a deformazione impedita. Il superamento della tolleranza a sollecitazioni dovute ai momenti che si generano provocherebbe una forte riduzione della scorrevolezza, particolarmente grave nel caso di deformazione parzialmente impedita, dove, diversamente da quella totalmente bloccata, le rotaie devono scorrere ugualmente per la parte di libertà che lasciano alla tavola.

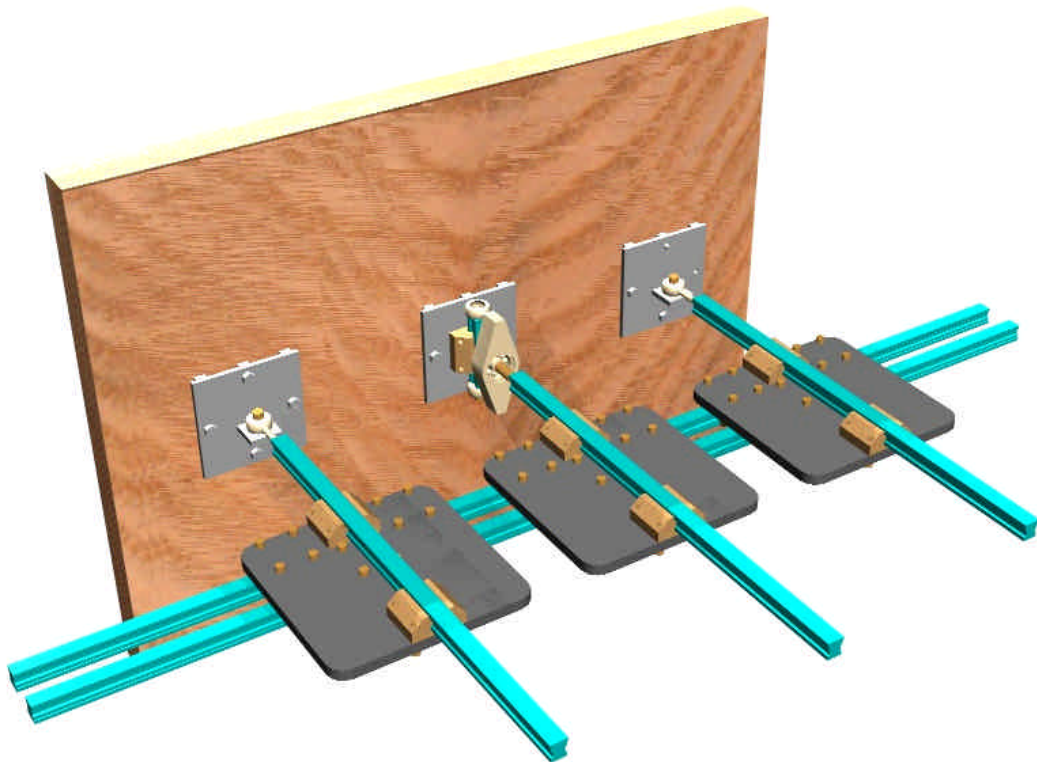


Fig. 7 La materializzazione del piano XZ costituita dai binari STAR

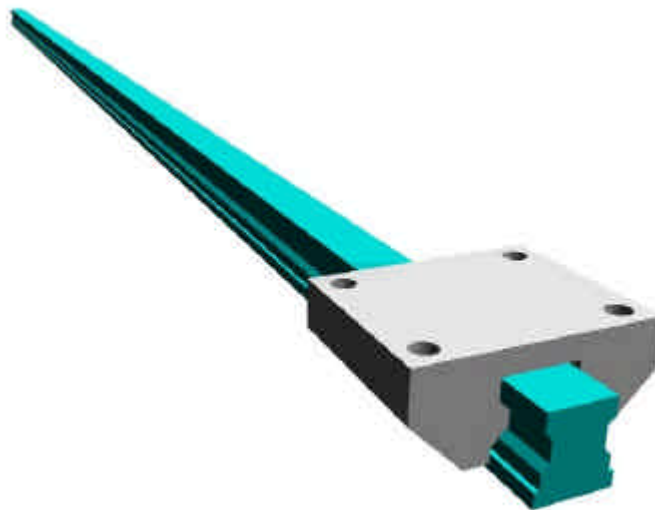


Fig. 8 Il sistema pattino – rotaia STAR

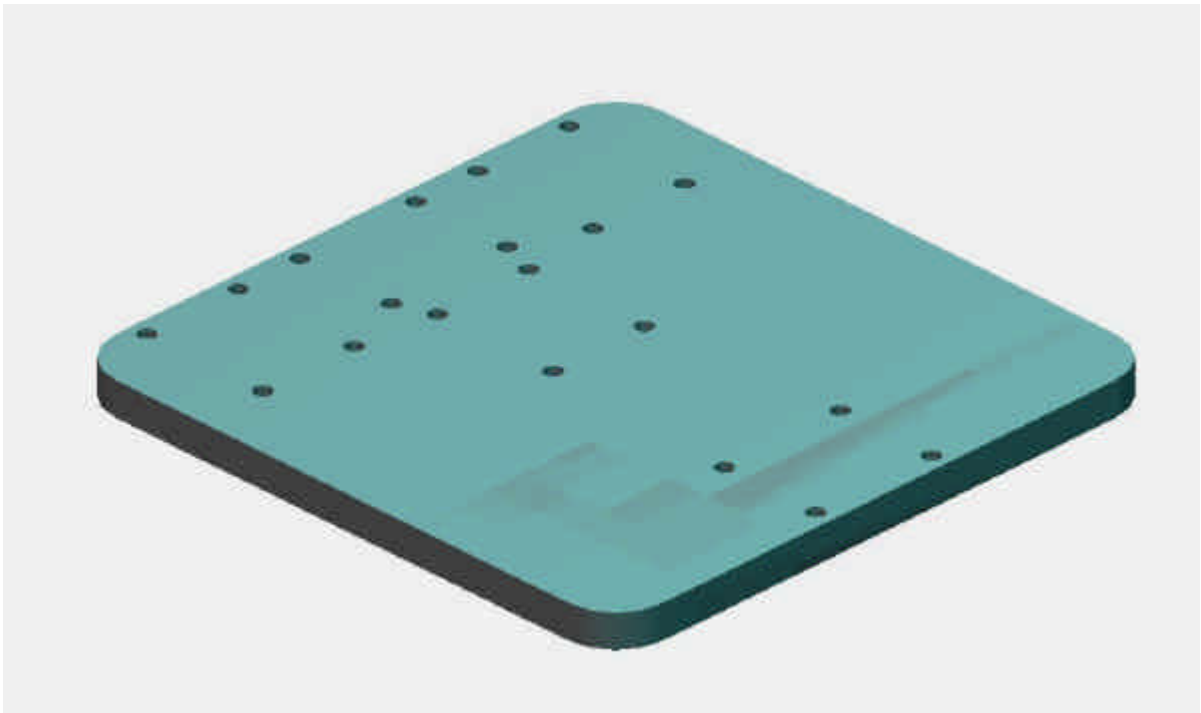


Fig. 9 Una piastra di collegamento tra rotaie X e Z

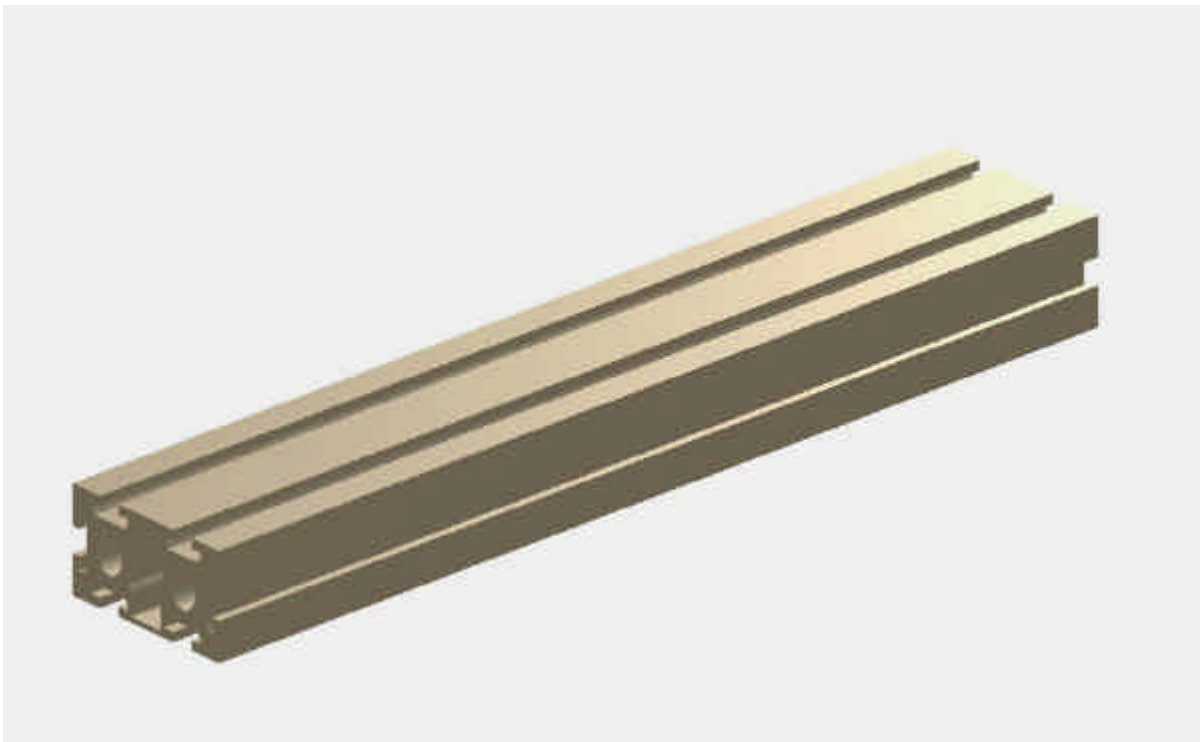


Fig. 10 I profilati ad elevato momento d'inerzia della STAR

I pattini, progettati per la movimentazione industriale, garantiscono una elevata scorrevolezza una volta che siano leggermente precaricati; il fattore di precarico è indicato nelle specifiche fornite dalla casa. Nel nostro caso abbiamo posto un certo numero di

strisce di carta fra piastra e pattino: stringendo le viti di fissaggio si raggiunge il precarico necessario perché l'attrito sia trascurabile: il precarico necessario è stato stimato empiricamente come quello per cui, inclinando il sistema pattino-rotaia a  $\sim 10^\circ$ , il pattino si mette in movimento sottoposto soltanto al peso proprio.

Per garantire un miglior scorrimento dei pattini è stata aumentata la sezione delle rotaie, avvitando a queste dei profilati in alluminio estruso della STAR<sup>®</sup> (ved. fig. 10), dal profilo di 40x80 mm ottimizzato in favore della leggerezza e dell'elevato momento d'inerzia: l'inflessione generata dalle forze applicate alle rotaie rientra così nei valori di non linearità tollerati dalla casa costruttrice.

La MCB misura così lo spostamento (nel caso di deformazione libera) dei punti di misura come  $\Delta$  mm rispetto all'origine degli assi fissato all'intersezione dell'asse Z2 con l'asse X.

Nel caso di deformazione bloccata la MCB ci fornisce dei vettori che per costruzione sappiamo scomposti secondo la regola del parallelogramma nelle componenti orientate secondo gli assi X e Z.

Nel terzo caso in cui la deformazione non è totalmente impedita la MCB ci fornisce delle misure di deformazione insieme a dei valori di forza.

## **5.2 Numero dei punti di misura**

I punti di misura per questo tipo di geometria devono essere almeno 3, per ricavarne una variazione di deformazione in prima approssimazione riconducibile all'arco di circonferenza, ma nulla vieta che possano essere in numero maggiore. Al contrario, ciò potrebbe fornire maggiori informazioni sul tipo di deformazione che la tavola ha nel suo piano XY e fuori da esso.

## **5.3 Posizione dei centri di rotazione**

Abbiamo scelto di collocare i centri di rotazione nei punti di misura al di fuori del piano XY della tavola per vari motivi:

- mancanza in commercio di terminali sferici il cui centro di rotazione si trovi al di fuori del terminale stesso come in figura; ciò richiedeva quindi una progetta-

zione piuttosto complessa che abbiamo deciso di rinviare ad un'eventuale fase successiva;

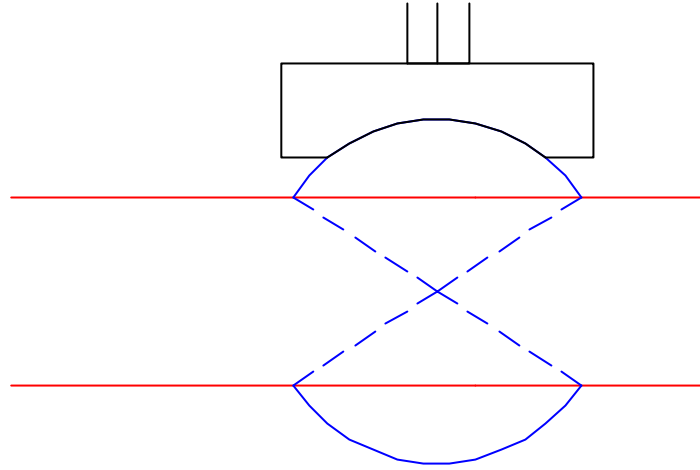


Fig. 11 Ipotesi di collegamento con centro di rotazione corretto

- un'altra strada percorribile era quella di portare i centri dei terminali sferici al centro dello spessore ma questo avrebbe avuto vari effetti indesiderati:
  - un intervento fortemente invasivo, seppure plausibile sul simulacro su cui è applicata la MCB in questa fase del lavoro, sarebbe inaccettabile su dipinti veri;
  - l'intervento di creazione della sede per lo snodo nel simulacro ne avrebbe ridotto lo spessore collaborante alla sollecitazione igrometrica, alterando certamente le risposte deformative proprio sull'allineamento oggetto di misura.

Il risultato di compromesso adottato per le prove sul simulacro consiste nell'applicazione dei centri di rotazione dei terminali sferici in posizione molto ravvicinata alla superficie della tavola considerando che:

- a) in fase di deformazione libera non ha grossa importanza (se non in fase d'elaborazione dei valori forniti dai trasduttori) dove si trovino i centri di rotazione dei vincoli sulla tavola: se assumiamo in prima approssimazione il modello deformativo assimilabile ad un arco di circonferenza e fis-

siamo i connettori dei terminali della traversa perpendicolarmente al piano della tavola, quando la tavola si deforma i punti di rotazione si troveranno su un arco di circonferenza concentrico a quello della tavola, non apportando errori alla misura dell'angolo di curvatura;

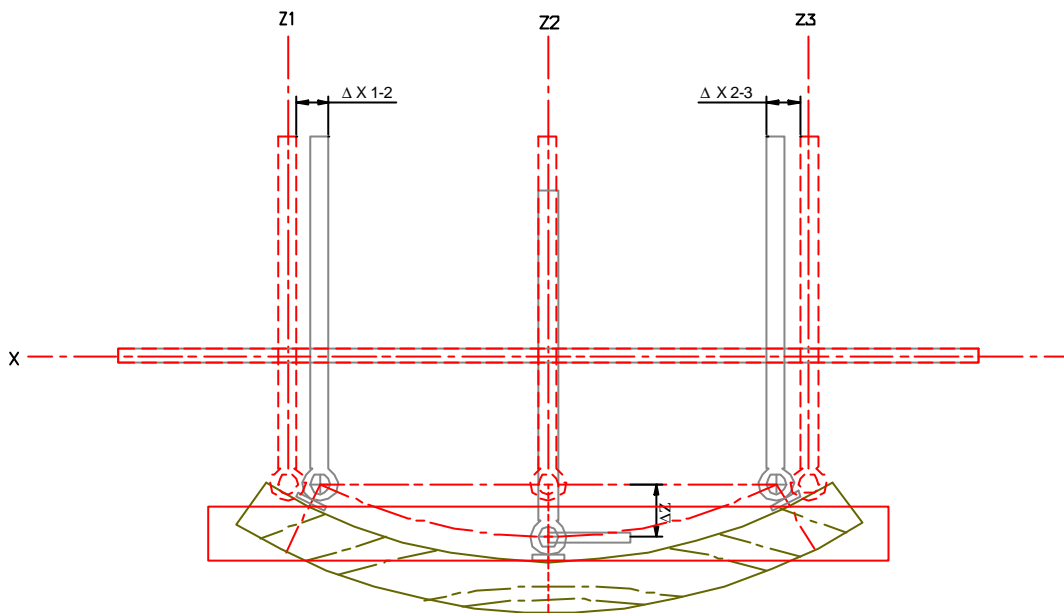


Fig. 12 I centri di rotazione della tavola nella deformazione libera

- b) nella situazione di deformazione impedita la forza esercitata dalla tavola, applicata al centro dei terminali distanziati è generatrice di momenti i cui effetti saranno discussi successivamente.

#### 5.4 Modalità di vincolo del sistema MCB - simulacro

Nella situazione di prova e validazione sperimentale del funzionamento della MCB è stata fatta la scelta di fissare iperstaticamente la MCB, incastrando l'asse X e lasciando libera e sospesa ai vincoli della MCB la tavola. Ciò fa sì che la tavola sia sottoposta soltanto al proprio peso.

Un'altra possibilità è quella di collocare il sistema isostaticamente fissando su due punti l'asse X e ponendo il terzo vertice del triangolo d'appoggio al centro del bordo inferiore della tavola: in questo caso, però, bisogna considerare che il vincolo della tavola non dovrà essere fisso ma scorrevole sul piano di appoggio del sistema per consentire alla tavola di deformarsi. Inoltre, diversamente dal caso precedente, la tavola deve soppor-

tare una parte non trascurabile del peso del sistema: nel nostro caso la MCB ne costituisce la parte più rilevante.

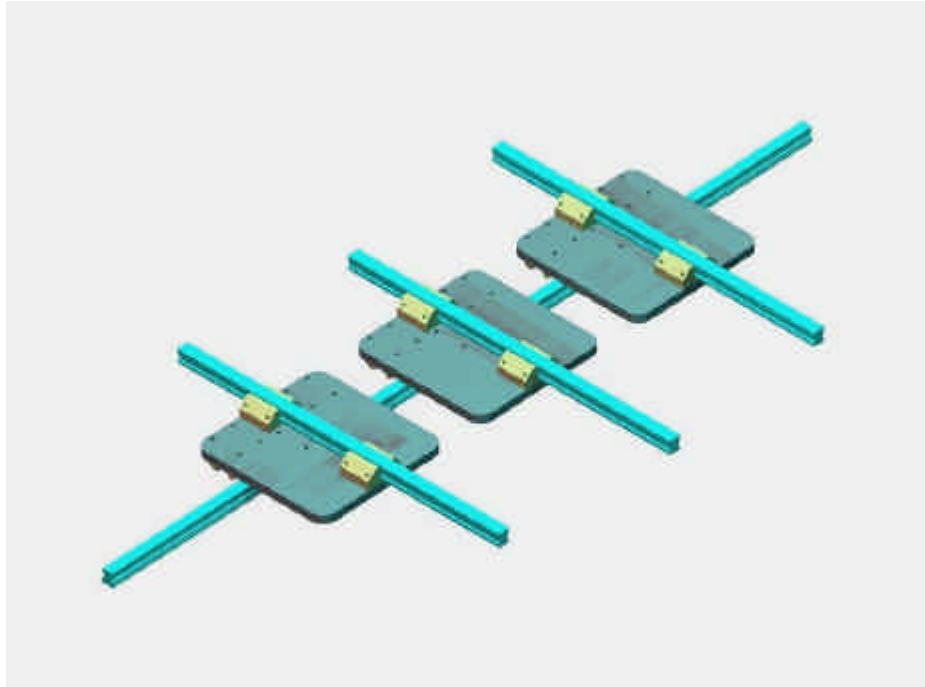


Fig. 13 Lo sfalsamento dei binari X e Z

#### 5.4.1 *Insorgenza di momenti dovuta alla non complanarità di assi X e Z*

L'impossibilità di rendere complanari gli assi X e Z per l'ingombro ineliminabile dei pattini e delle piastre fa sì che l'equilibrio tra le forze applicate e le reazioni dei vincoli crei dei momenti  $= F \times l$  dove  $F$  è la reazione vincolare e  $l$  è la distanza del vincolo dal punto di applicazione della forza esercitata dalla tavola.

Da questo effetto discende che:

- il momento flettente sugli assi Z1 e Z3, essendo opposto il verso delle forze applicate, è opposto a quello dell'asse Z2;
- il fatto che la forza applicata in Z2 sia il doppio (con segno invertito) delle singole forze applicate in Z1 e Z3 fa sì che il sistema sia in equilibrio statico;

#### 5.4.2 *Posizione in altezza di celle di carico e barre che trasmettono le forze*

Per quanto possibile, dato l'ingombro dei singoli componenti, si è cercato di ridurre la distanza tra gli assi Z e le celle di carico al fine di ridurre l'entità dei momenti.

#### 5.4.3 *Raddoppio dell'asse X*

La composizione dei momenti degli assi Z, con versi opposti per gli assi Z1 e Z3 rispetto a Z2, determina sull'asse X un momento torcente non trascurabile, tale da impedire lo scorrimento dei pattini; per ridurre questo effetto è stata fatta la scelta di aggiungere un'altra rotaia  $X_2$  parallela e solidale alla prima affinché i momenti di ogni singola rotaia Z si annullino nel punto stesso d'insorgenza: con questo tipo di geometria, infatti, quando sul sistema  $X1 - X2$  - profilato si crea un momento con un verso di rotazione, sullo stesso sistema ne insorge uno con verso opposto ad annullare il primo.

La visualizzazione della tendenza deformativa della MCB è rappresentata in fig. 14.



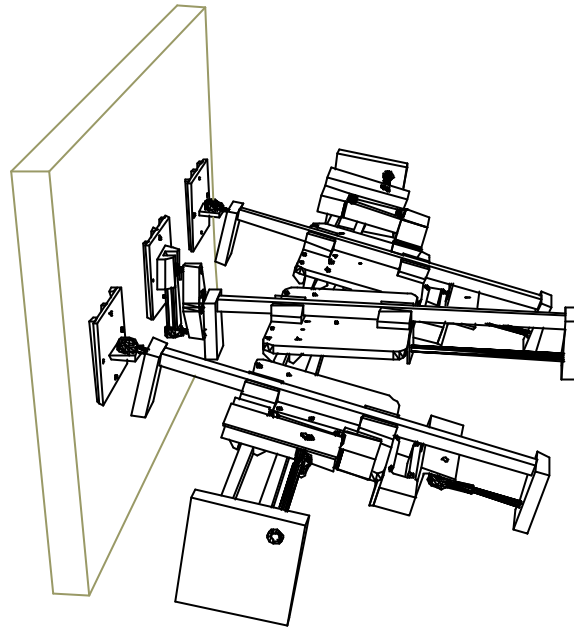


Fig. 14 La tendenza deformativa della MCB che ha portato alla scelta del raddoppio dell'asseX

## 5.5 Equilibri dei momenti e delle forze delle varie parti svincolate

Segue adesso un'esposizione grafica dei concetti sopra esposti ricorrendo allo svincolamento delle singole parti del sistema.

Il sistema garantisce un corretto funzionamento quando le forze in input provenienti dalla tavola che tende a deformarsi vengono trasmesse senza alterazioni ai trasduttori di forza situati alle estremità degli assi della MCB.

Le reazioni vincolari che si manifestano nella MCB sono piuttosto complesse, data la geometria della macchina, e richiedono un corretto inquadramento statico, ricorrendo ai criteri dello svincolamento:

- i primi sistemi che analizziamo sono costituiti dai singoli assi Z1, Z2 e Z3. Ai fini dell'equilibrio statico li consideriamo infinitamente rigidi e senza giochi fra le parti; affinché il sistema sia determinato staticamente le forze in ingresso devono essere equilibrate da reazioni vincolari uguali in modulo e opposte in verso; quando poi queste non sono applicate sullo stesso asse della forza in ingresso esse generano momenti che devono essere equilibrati a loro volta. Schematizzando il comportamento dei vincoli dell'asse Z1, essi sono:

- a) una cerniera sferica nel punto di applicazione delle forze;

- b) una biella, anch'essa con tre gradi di libertà (rotazione sui piani XZ, XY e YZ) e con la possibilità di resistere solo alle sollecitazioni lungo il suo asse, sull'estremità opposta del binario;
- c) dei carrelli con un grado di libertà alla traslazione lungo l'asse Z1.

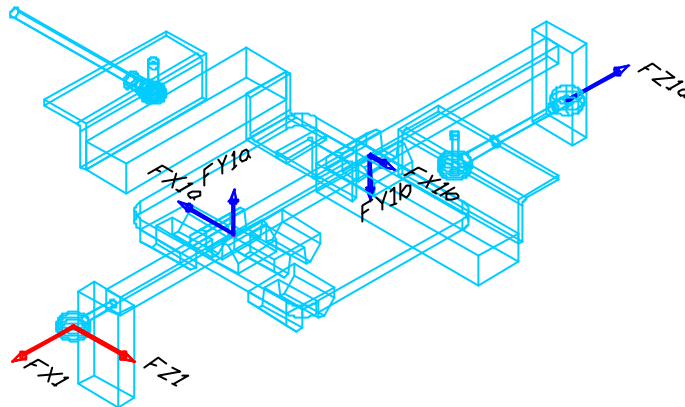


Fig. 15 Le forze generate sull'asse Z1 rispetto alla piastra di collegamento dall'imbarco per desorbimento

Le equazioni di equilibrio alla traslazione, univocamente determinate per i valori di FX1 ed FZ1, sono:

$$\begin{cases} FX1 = FX1a + FX1b \\ FZ1 = FZ1a \\ FY1a = FY1b \end{cases}$$

Quelle di equilibrio alla rotazione, assumendo come centro di riduzione sull'asse Z la proiezione del punto di applicazione della forza FZ1a, sono:

$$\begin{cases} FX1 \times LZ1 + FX1b \times (LZ1 - LZ1b) = FX1a \times (LZ1 - LZ1a) \\ FZ1a \times LY1a + FY1b \times (LZ1 - LZ1b) = FY1a \times (LZ1 - LZ2a) \end{cases}$$

Siccome le forze in ingresso  $FX1$  e  $FZ1$  non generano momenti sul piano XY non viene scritta la corrispondente equazione d'equilibrio.

Sull'asse Z3 le equazioni sono le stesse con la differenza che la  $FX3$  ha verso opposto rispetto alla  $FX1$ .

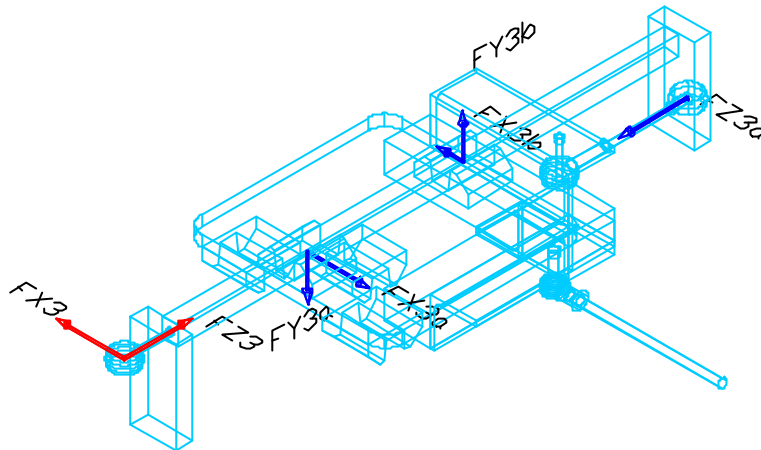


Fig. 16 Le forze generate sull'asse Z3

Le reazioni vincolari delle piastre si trasmettono all'asse X in modo molto complesso, dato che le reazioni vincolari sono suddivise sui tre pattini per ogni piastra. Nella fig. 17 è visualizzato come i momenti generati dallo sfalsamento dei vincoli sugli assi Z producono momento torcente sull'asse X.

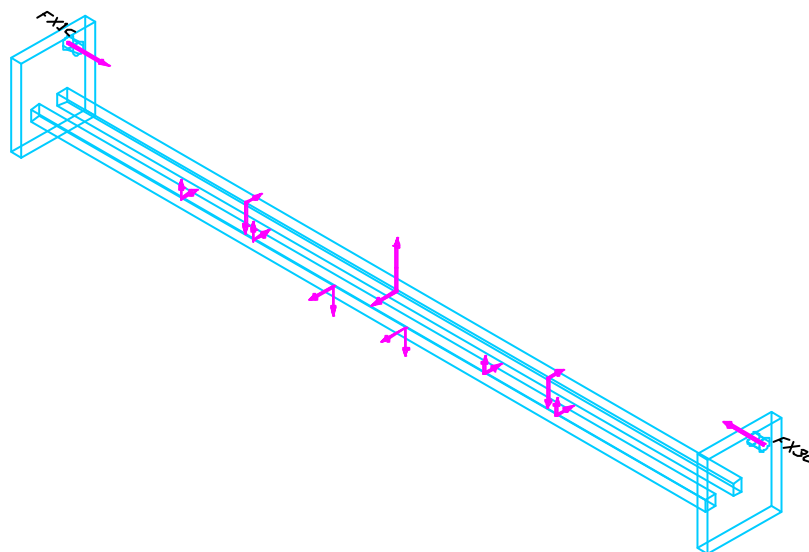


Fig. 17 Le forze generate sull'asse X

## 5.6 Interazione tra gli assi X e Z (il *cross-talk*)

Per quanto riguarda l'asse Z2, nel caso in cui la geometria di applicazione della MCB sia perfettamente simmetrica rispetto al vincolo centrale, le FX1 ed FX2 sono uguali ed opposte e non producono così momento sul piano XZ.

Ciò si verifica anche nel caso in cui l'asse Z2 non sia bloccato allo scorrimento lungo X: su di esso non si possono generare forze in direzione X e gli unici elementi che reagiscono sono Z1 e Z3 che daranno valori uguali di FX1 e FX3.

Nel caso in cui l'asse Z2 sia fissato rigidamente all'asse X e gli assi Z1 e Z3 siano fissati in modo che i tre punti di vincolo non si trovino allineati, si svilupperà sull'asse Z2 una FX2 dovuta al momento che si genera sui vincoli.

Nelle equazioni di equilibrio alla traslazione si aggiunge la nuova componente:

$$\begin{aligned} &\text{se } FX1 > FX3 \\ &\text{allora } FX1 = FX2 + FX3 \end{aligned}$$

e la presenza dei bracci M12 e M13 crea un momento il cui equilibrio è:

$$FZ3 \times L13 + FX3 \times M13 + FX2 \times M12 + FZ2 \times L12 = 0$$

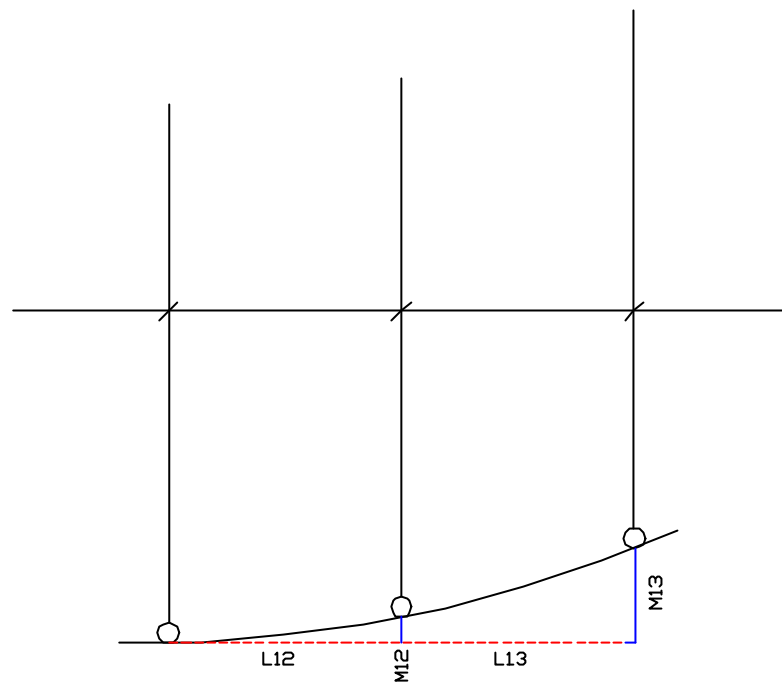


Fig. 18 Condizioni per l'instaurarsi di *cross-talk*

Questi elementi hanno grande importanza per interpretare correttamente i dati sperimentali: è infatti molto difficile applicare in modo parallelo e simmetrico la MCB sulla tavola e quindi, qualora si decida di bloccare l'asse Z2 lungo l'asse X, le formule suddette hanno la funzione di fattori di correzione dei dati anomali che si otterrebbero.

In Allegato 4 si trovano le elaborazioni secondo la formula suddetta dei primi dati sperimentali ricavati dalla prima prova a deformazione impedita con punto Z2 bloccato.

## **6. Scelta e taratura dei vari tipi di trasduttori**

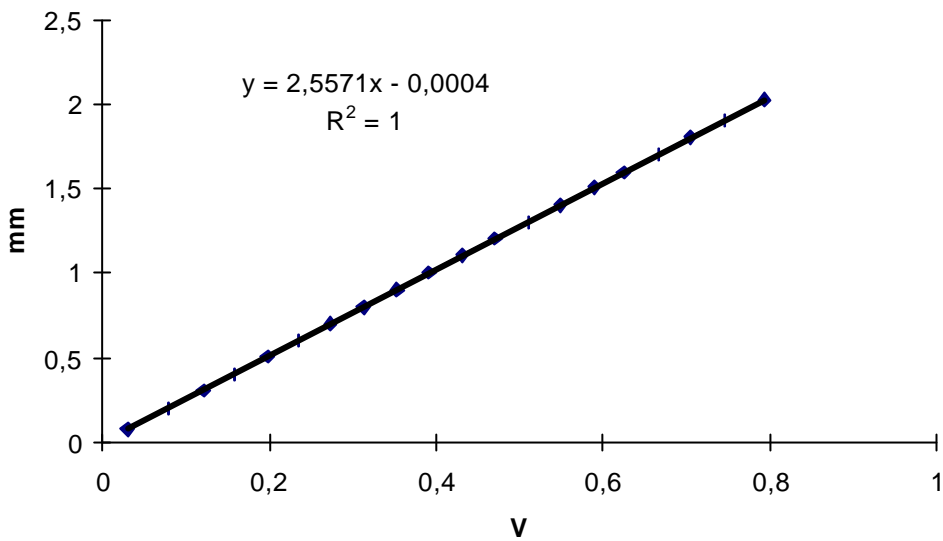
### **6.1 Trasduttori di spostamento LVDT**

La scelta dei trasduttori di spostamento e di forza doveva rispondere all'esigenza di robustezza e affidabilità in vista delle variazioni ambientali cui questi potevano essere sottoposti unita ad un'elevata precisione utile a seguire fedelmente le variazioni anche piccole che il legno avrebbe potuto manifestare.

Per quanto riguarda i trasduttori di spostamento la scelta è caduta sul tipo LVDT (*Linear Voltage Displacement Transducers*) della ditta inglese *Monitran*<sup>®</sup>; questi strumenti, progettati per uso industriale, garantiscono una robustezza elevata e, soprattutto, la circuiteria interna garantisce una stabilità del segnale in uscita in un ampio *range* di tensione di alimentazione e anche in presenza di suoi sbalzi improvvisi. Abbiamo scelto dei trasduttori di  $\pm 5$  e  $\pm 25$  mm di corsa utile nel campo di misura di  $\pm 2.5$  VDC, con l'intenzione di utilizzare quelli a corsa più lunga per rilevare le deformazioni più ampie senza correre il rischio di uscire dal campo di misura dello strumento: questa scelta ha comportato alcuni problemi; infatti la precisione della misura è data dal rapporto tra grandezza da misurare, sensibilità dello strumento e sensibilità del sistema di acquisizione: nonostante la sensibilità degli LVDT sia virtualmente infinita (in quanto funzione continua e non discreta), la scheda di acquisizione del segnale, fornita di un convertitore A/D a 12 bit, non riesce a discriminare più di 4096 *digits*, che nel nostro caso equivalgono a scalini di  $\pm 2,5V / 4096 = 1,2$  mV, limite comunque accettabile per le informazioni che riusciamo ad ottenere. Inoltre l'influenza dei disturbi di natura elettromagnetica, ormai inevitabili, seppure di piccola entità, va ad alterare le piccolissime variazioni di segnale del trasduttore, trasformando così un disturbo in segnale impossibile da discriminare.

Analizzando i singoli valori dei trasduttori vediamo che per un campo di lettura di 25 mm abbiamo una sensibilità di  $\pm 25$  mm /  $\pm 2.5$  V che significa 10  $\mu\text{m}/\text{mV}$ ; essendo l'ordine di grandezza del disturbo di circa  $\pm 3$  mV, abbiamo così un'incertezza di misura di  $\pm 30$   $\mu\text{m}$ , con un errore percentuale pari a 0,12% del fondo scala.

Il trasduttore da  $\pm 5$  mm ha invece una sensibilità di  $\pm 5$  mm /  $\pm 2.5$  V = 2  $\mu\text{m}/\text{mV}$  con un'incertezza di misura dovuta ai disturbi di  $\pm 6$   $\mu\text{m}$ .



Graf. 2 Taratura di trasduttore LVDT

La taratura dei trasduttori, cioè l'operazione che fornisce il fattore di conversione da Volt in uscita a millimetri di deformazione, è stata svolta per mezzo di un comparatore digitale micrometrico della *Mitutoyo* per mezzo del quale sono stati imposti dei tassi di deformazione ai trasduttori ai quali venivano associate le tensioni in uscita in Volt lette direttamente sul software di acquisizione. A titolo di esempio viene riportato in Graf. 2 uno dei grafici delle operazioni di taratura effettuate. Va detto che i valori si discostavano in maniera non significativa da quelli dichiarati dalla casa costruttrice.

## 6.2 Celle estensimetriche

Per quanto riguarda i trasduttori di forza sono stati adottate delle celle estensimetriche *off-center* della *Shinkoh*<sup>®</sup> di portata nominale pari a 100 daN.

Pur essendo destinate alla costruzione di bilance non di precisione, si adattano molto bene alle nostre esigenze per il fatto che, a differenza delle normali celle a compressione, in queste la forza applicata viene misurata attraverso lo sforzo di taglio applicato alla struttura della cella che sollecita gli estensimetri incollati sulle facce; in questo modo la cella fornisce gli stessi valori di forza anche se questa non è applicata secondo il suo asse. Le celle a compressione sono invece molto sensibili ai momenti generati da una non corretta applicazione del carico, cosa da evitare nel caso di una deformabilità del sistema come nel caso della MCB parzialmente bloccata.

Gli estensimetri hanno bisogno di un'alimentazione stabilizzata e, dato che il loro segnale in uscita è bassissimo, di un amplificatore che deve essere di qualità tale da non alterare l'informazione contenuta: le schede di alimentazione e condizionamento del segnale ATT-6 (una per cella) fornite dalla Pavone elettronica rispondono egregiamente a queste esigenze. Anche in questo caso è necessario stabilire l'influenza quantitativa dei disturbi sul segnale in uscita:

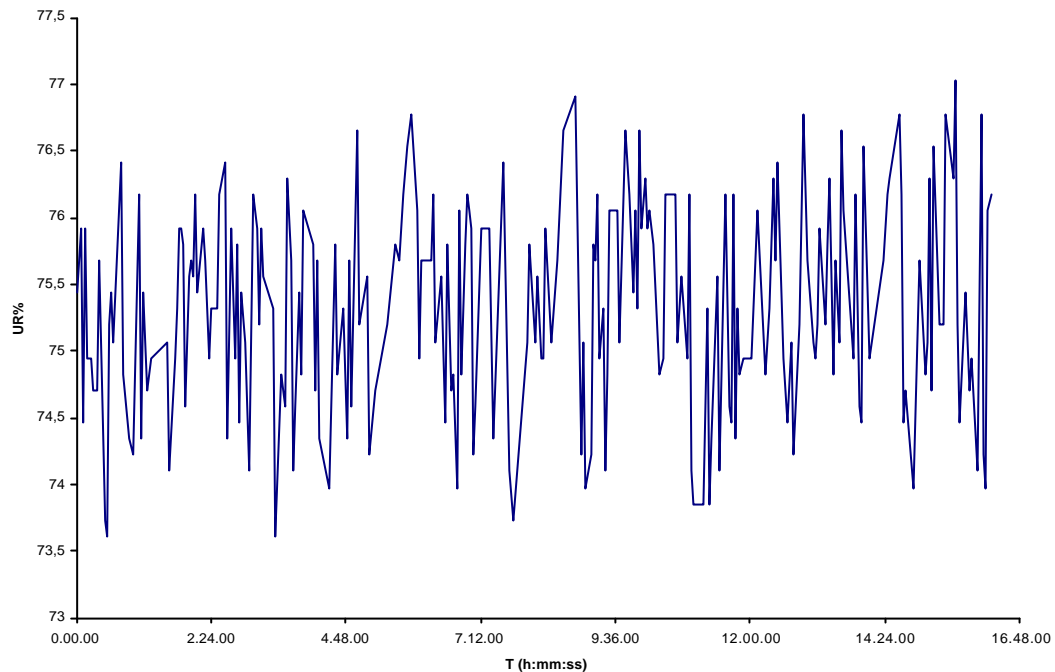
$$\begin{cases} 100daN = 2.5V \\ 0,04daN = 1mV \end{cases}$$

da cui per un disturbo di  $\pm 3mV$  la zona di incertezza di misura di  $\sim \pm 0,12 daN$ .

Anche per i trasduttori di forza è stata compiuta un'operazione di taratura abbastanza complessa: a ciascuna cella sono stati applicati carichi noti via via crescenti, regolando il *gain* della scheda di amplificazione del segnale fino ad ottenere un valore in Volt riconducibile facilmente al carico applicato [ad esempio  $(0,5V = 10daN)$ ;  $(2,5V = 50daN)$ ;  $(5v = 100daN)$  e così via]. La stessa operazione è stata ripetuta con gli stessi carichi per ogni cella.

Per ridurre i disturbi di carattere elettromagnetico sono stati posti, in parallelo ai singoli canali all'ingresso della scheda di acquisizione, dei condensatori elettrolitici da  $1000 \mu F$  che, filtrando le frequenze più alte (e cioè quelle dei disturbi elettromagnetici), ripuliscono i segnali in modo ragionevole.





Graf. 3: oscillazione della sonda di UR in soluzione satura di NaCl (senza condensatore)

I condensatori smussano i picchi dei segnali molto rapidi ritardando la loro salita ma, nel caso delle deformazioni del legno, le variazioni sono così lente da non risentire in modo apprezzabile di questo effetto.

### 6.3 Sensore termoigrometrico

Per acquisire, in parallelo ai dati di deformazione e tensione, le variazioni di umidità relativa e di temperatura in prossimità del simulacro è stata posizionata una sonda di tipo *Hygroclip* prodotta dalla *Rotronic*<sup>®</sup>. La sonda è dotata di due sensori, alimentati con una tensione di 5V, i cui segnali in uscita variano tra 0 e 1V per l'umidità relativa (0V = 0%UR e 1V = 100%UR) e tra -0,2 e 0,6V per la temperatura (-0,2V = -20°C e 0,6V = 60°C).

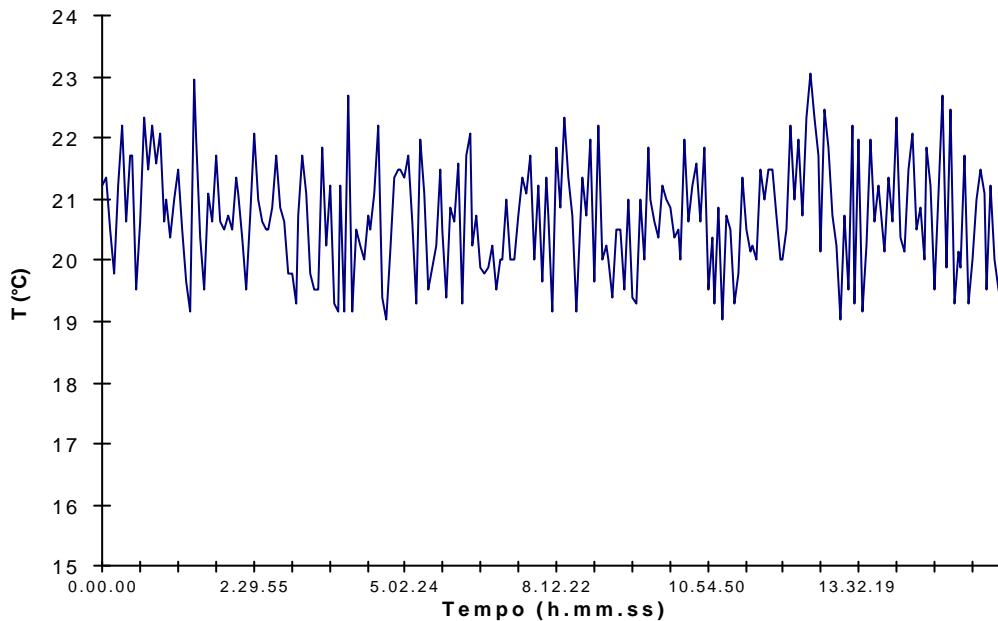
La sensibilità della sonda alle variazioni circostanti è rapidissima; purtroppo anche la sensibilità ai disturbi elettromagnetici provoca un'oscillazione di circa  $\pm 1,5\%$  del segnale per quanto riguarda l'umidità relativa. L'adozione dei condensatori anche per questo segnale ha portato miglioramenti di  $\sim 50\%$  del disturbo.

Seppure la ditta costruttrice garantisca il grado di precisione dichiarato in modalità *plug and play*, sono state svolte prove di taratura ricorrendo a soluzioni titolate in recipienti a

tenuta nei quali la sonda veniva collocata fino a raggiungere stabilmente il valore noto. I risultati sono riportati nel Grafico 3.

Molto più stabile è la misura della temperatura, dove il diverso tipo di sensore è molto meno sensibile ai disturbi elettromagnetici.

Anche in questo caso (Graf. 4) la precisione è nei limiti dichiarati dalla casa.



Graf. 4 oscillazione della sonda di T in ambiente controllato(senza condensatore)

## **7. Realizzazione dei vincoli e caratterizzazione meccanica**

### **7.1 La scelta delle molle**

Il vincolamento degli assi Z e delle piastre di collegamento, trasmettitori delle forze esercitate dal simulacro, deve essere il più versatile possibile per consentire la varietà delle possibilità operative cui la MCB deve assolvere.

A tal fine la scelta operata è caduta sulle barre filettate (in acciaio inox, date le condizioni di variabilità del clima di prova) per la possibilità di regolarne la lunghezza tramite dadi. Queste si fissano alle celle di carico tramite terminali sferici e ai binari tramite dei collegamenti in alluminio visibili in fig. 19.

La regolazione ha un'utilità immediata per adattare la MCB alla conformazione della tavola cui deve essere applicata, ma soprattutto serve ad applicare con sufficiente semplicità gli elementi che hanno la funzione di controllare la rigidità dello strumento.

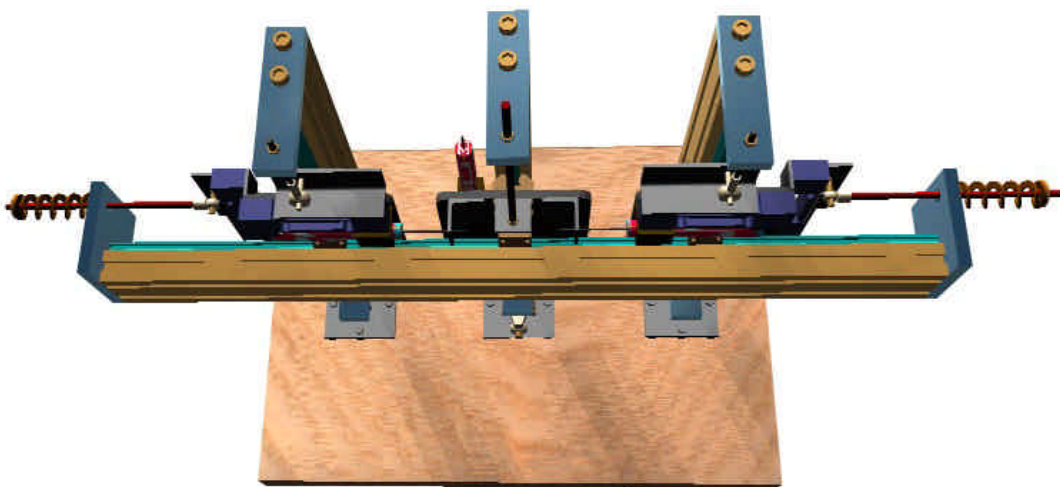


Fig. 19 Vista delle barre di collegamento tra celle e assi della MCB

Questa funzione è affidata a delle molle che, essendo elementi di rigidità calibrata, permettono di regolare la cedevolezza dell'insieme, simulando così la diversa interazione che si può verificare nella realtà tra la tavola di un dipinto e una traversatura di diverse specie legnose, dimensioni e tipo di vincolo.

Le molle possono essere collocate su entrambi i lati del vincolo agli assi, con il vantaggio di poter operare anche al passaggio dello zero di sollecitazione e passare così dallo stato di compressione a quello di trazione della traversa.

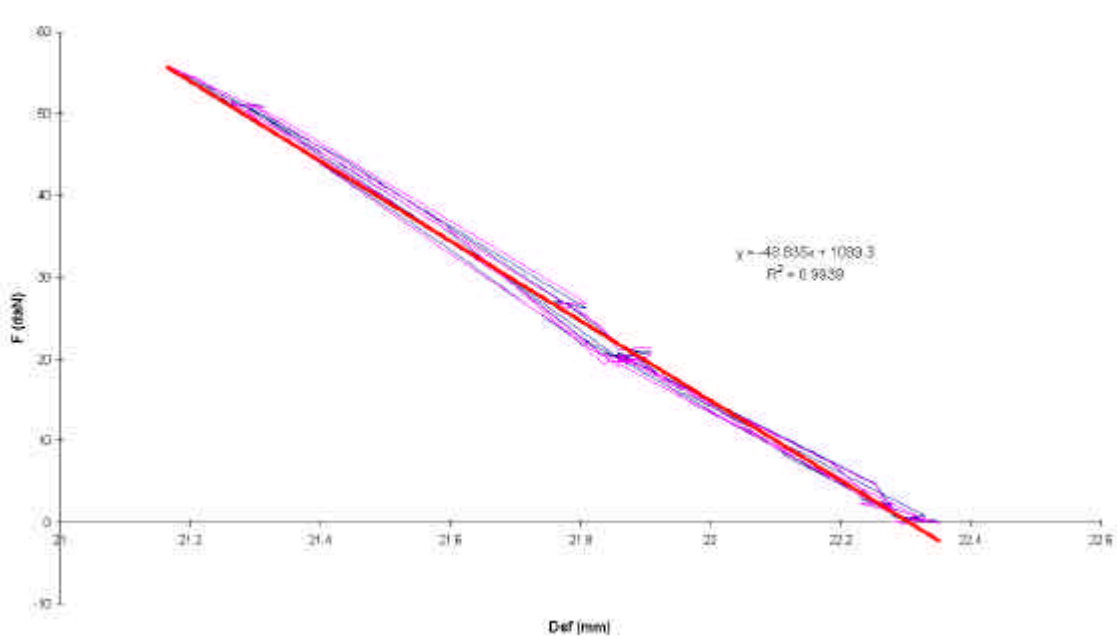
In questa fase di prima validazione l'eventualità non è stata realizzata, ma pensando all'uso in condizioni reali, con periodi di monitoraggio prolungati, la variabilità stagionale può portare il supporto ligneo a invertire il verso delle sollecitazioni e perciò la necessità andava consentita a livello progettuale.

## **7.2 Caratterizzazione meccanica**

L'auspicata rigidità infinita della MCB è ovviamente un obiettivo virtuale: la complessità strutturale del sistema, la possibilità di giochi, seppure ridotti, e la deformabilità dei vari componenti sono elementi che si sommano in tutta la catena di misura.

Le operazioni compiute in fase di realizzazione per irrigidire il sistema hanno certamente migliorato le caratteristiche strutturali, ma la strada più efficace è la caratterizzazione per confronto; a tal fine è stato fissato rigidamente alla traversa un profilato a C di ferro molto più rigido della traversa e sono stati imposti dei carichi via via crescenti tramite i dadi di fissaggio della barra filettata all'asse Z2. I trasduttori di spostamento forniscono così i dati di deformazione, in prima approssimazione riferibili esclusivamente alla MCB e le celle leggono le forze.

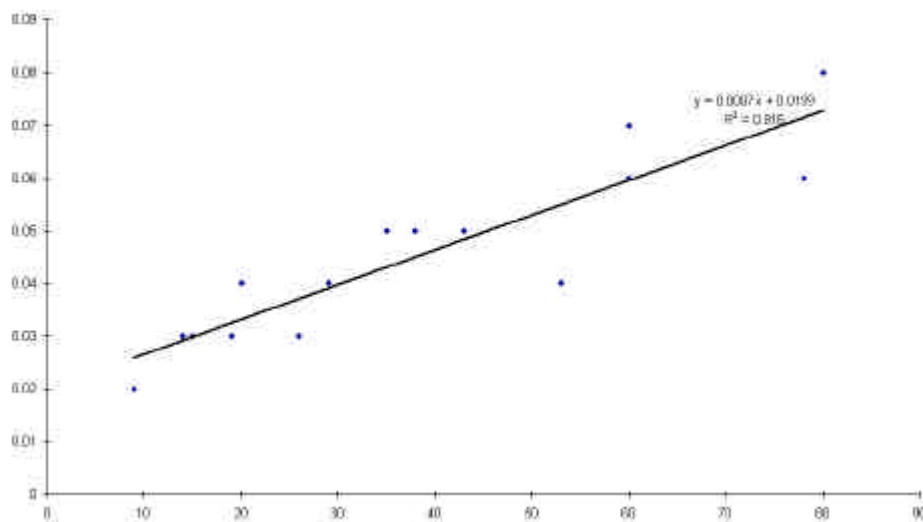
Si può così ottenere una retta carico-deformazione il cui coefficiente angolare rappresenta la rigidità complessiva dello strumento. Il grafico 5 rappresenta una di queste prove.



Graf.

#### 5 Carico-deformazione assi Z

Uno dei problemi più rilevanti riscontrati in fase di caratterizzazione è stato constatare che, a causa dei giochi interni al sistema (identificati probabilmente nei minimi giochi dei pattini e dei terminali di collegamento alla tavola), si manifesta una zona di isteresi nel passaggio dello zero di forza che è stato comunque constatato essere direttamente proporzionale ai carichi applicati e quindi correggibile con un apposito fattore.



Graf. 6 Andamento dell'isteresi in funzione del carico

## **8. Misurazione indipendente delle deformazioni del simulacro**

### **8.1 Fonte**

Uno dei problemi intrinseci alla MCB è quello di ricorrere comunque ad un allineamento di tre punti che ci forniscono un modello geometrico di deformazione “per corde”: ciò che realmente avviene sulla superficie della tavola sulla quale viene applicata la MCB non è conosciuto. A questo fine, per meglio capire quanto le informazioni dei trasduttori della MCB siano aderenti al reale fenomeno deformativo, è stata adattata una metodologia di rilievo dell’angolo d’imbarcamento e del ritiro e rigonfiamento elaborata per la campagna di misure svolte in continuo nel 1991 sulla Maestà di Ognissanti di Giotto da *Uzielli et al.*<sup>13</sup>.



Fig.20 Un trasduttore di spostamento potenziometrico

In quell’esperienza era stato scelto di determinare il raggio di curvatura in varie zone del dipinto e perciò erano state usate delle coppie di trasduttori potenziometrici (ved. fig. 20) posizionati parallelamente: anche in quel caso il modello deformativo di riferimento era l’arco di circonferenza e il tipo di geometria della prova non poteva contraddire questa ipotesi.

---

<sup>13</sup> UZIELLI L., FIORAVANTI M., CASAZZA O., PERUCCA G., A technique for monitoring on both faces the deformations of the wooden support of panel paintings: the Giotto’s “Maestà di Ognissanti” experience, 1992

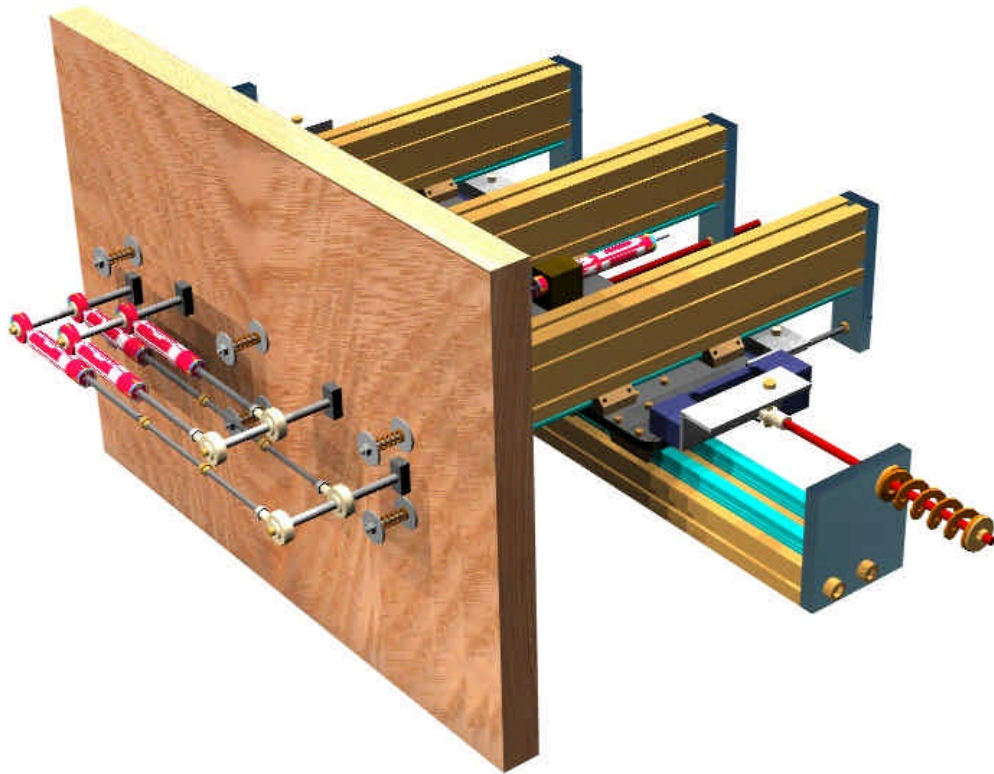
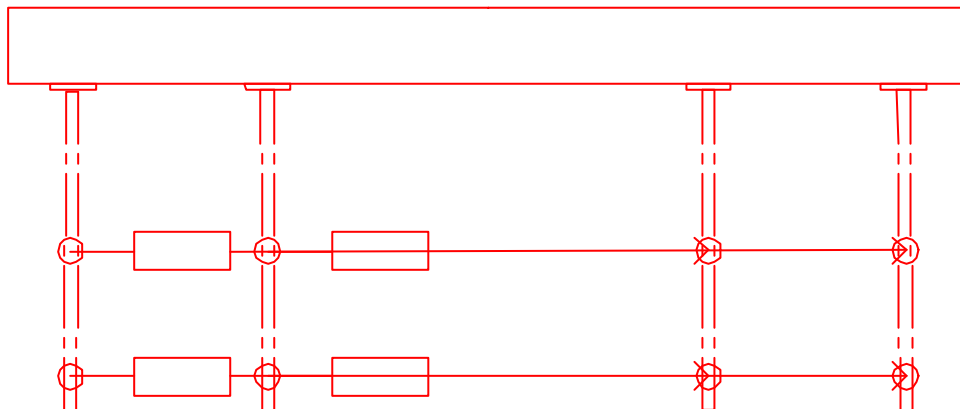


Fig. 21 I trasduttori potenziometrici montati sulla tavola



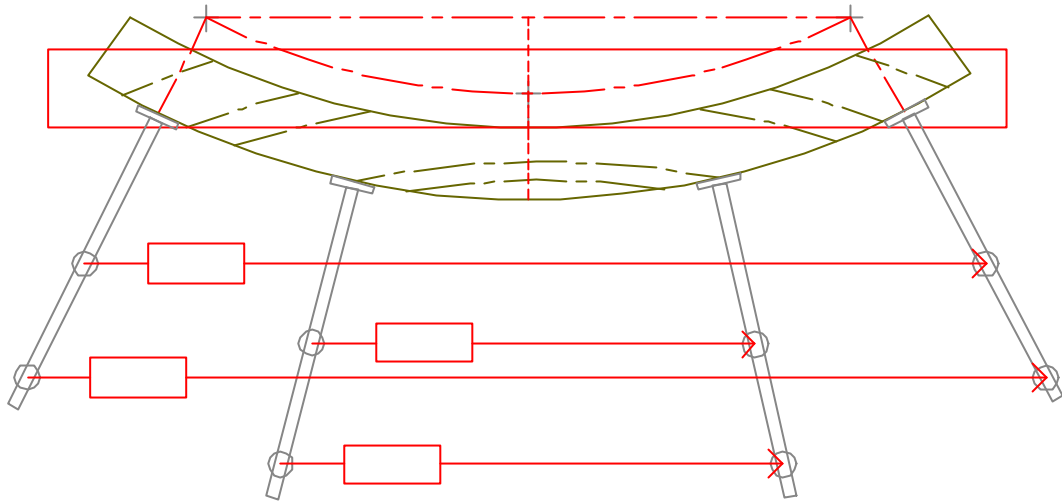


Fig. 22 Funzionamento del sistema di misura dell'imbarcamento di *Uzielli et al.*

Il sistema si basa, infatti, sulla differenza di deformazione dei due trasduttori paralleli per ricavare, con semplici relazioni geometriche tra triangoli simili, l'angolo al centro di due archi di circonferenza concentrici, e quindi quello della corda sottesa alla faccia concava della tavola imbarcata. Siccome in quella indagine si cercava di comprendere come il dipinto si deformava in zone diverse, veniva posizionata una sola coppia di trasduttori per ciascun allineamento monitorato.

## 8.2 Uso

Nel nostro caso la sovrapposizione di due coppie di trasduttori sullo stesso allineamento dà modo di verificare l'aderenza del modello deformativo basato sul principio della conservazione delle sezioni piane di *Bernoulli-Navier* al reale comportamento della tavola: se infatti l'imbarcamento procedesse secondo un arco di circonferenza le due misure dovrebbero fornirci corde sottese ad archi appartenenti alla stessa circonferenza, cosa che, come sarà dimostrato nella sezione dedicata alla discussione dei risultati ottenuti non avviene con sufficiente aderenza, se non grossolanamente.

Ne consegue che il modello necessita certamente di un aggiornamento alla luce di nuovi approfondimenti sperimentali.



### **8.3 Funzionalità**

La risposta dei trasduttori potenziometrici in uso in questa prova permette di analizzare a livello qualitativo la tendenza deformativa in tratti diversi dell'allineamento misurato sul simulacro: la stabilità di risposta, apparentemente soddisfacente nei dati disaggregati, diviene fortemente disturbata una volta elaborata per ottenere curve di variazione angolare: la causa di ciò è imputabile all'andamento casuale del disturbo in più o in meno rispetto al dato reale, con la conseguente interferenza sui dati elaborati, impercettibile prima di queste operazioni di somma. I trasduttori potenziometrici utilizzati in questa prova non hanno alcun tipo di protezione dalle oscillazioni del segnale di alimentazione e trasformano in spostamento qualunque variazione del segnale elettrico in ingresso. L'utilizzo di trasduttori meno sensibili a questo tipo di variazioni, come gli LVDT usati sulla MCB, potrebbe dare indicazioni più chiare dal punto di vista quantitativo. È comunque evidente che la complessità della deformazione d'imbarcamento in questa prova è certamente di grado superiore al luogo geometrico rappresentato dall'arco di circonferenza.

## **9. Sistema di acquisizione dei dati**

### **9.1 Data-logging**

Le misure oggetto di questa ricerca hanno come presupposto la stretta dipendenza dallo scorrere del tempo: le variazioni, sia dimensionali che tensionali, avvengono secondo relazioni nelle quali il tempo è variabile indipendente e sulle quali la ricerca non ha ancora stabilito un rapporto chiaro dal punto di vista matematico.

Per questo motivo, ogni esperimento che riguardi il condizionamento termo-igrometrico del legno necessita di un affidabile sistema di correlazione tra la grandezza in esame e il momento preciso della sua variazione. Attualmente esistono programmi di acquisizione molto efficaci e con un'interfaccia utente molto semplificata, tali da permettere un'agevole programmazione dei ritmi di acquisizione.

Nel nostro caso abbiamo adottato il sistema offerto dalla National Instruments<sup>®</sup>, il *Lab-View 5.0.1*, costituito da:

- **hardware**: una scheda PCI per PC su cui si trova, sinteticamente, il convertitore A/D a 12 bit di cui sopra e l'interfaccia di collegamento con i vari canali provenienti dall'esterno;
- **software**: un complesso programma di gestione dei segnali convertiti in digitale, tale da poter emulare tramite algoritmi degli strumenti di analisi ed elaborazione dei dati. Il linguaggio di programmazione degli strumenti virtuali è del tipo ad oggetti, cosicché è possibile personalizzare con sufficiente semplicità gli strumenti già esistenti in libreria secondo le proprie necessità

Lo strumento virtuale utilizzato per l'acquisizione è un *data-logger a scan rate* regolabile a piacimento che salva i dati in formato ASCII immediatamente importabile come *spreadsheet* del tipo di Excel. Esso mostra inoltre sotto forma di grafico l'andamento nel tempo delle variazioni dei singoli canali, permettendo così un rapido controllo in tempo reale del buon andamento dell'acquisizione.

## 9.2 Impostazioni Lab-View: problemi riscontrati e soluzioni adottate

Il programma occupa una buona parte della RAM del computer, rallentandone fortemente le prestazioni in *multitasking*: nella prima parte delle acquisizioni di questo lavoro, la presenza di Windows '98 su un Pentium 133 con soli 16 Mbytes di RAM provocava grossi problemi allo strumento; per molti punti successivi venivano collocate successivamente le celle di data e ora senza letture dei canali, sfasando così la regolarità del file. La prima procedura adottata è stata quella di creare delle *macro* di correzione per riportare i dati in colonne. Identificata la causa del problema è stato reinstallato Windows '95 ed è stata aumentata la RAM.

## 9.3 Scelta del sampling-rate

Seppure i processi di adeguamento del legno alle nuove condizioni climatiche siano molto lenti, vari fattori di variabilità non lineare hanno consigliato di adottare un tasso di campionamento piuttosto fitto (1 punto ogni 4 minuti):

- la scelta di un basso numero di punti non avrebbe permesso di leggere con accuratezza eventuali fenomeni rapidi che potevano verificarsi durante l'acquisizione;
- la densità di punti e il conseguente rapido aggiornamento sullo schermo permette un intervento sollecito nel caso di malfunzionamento degli apparati elettrici, con perdita ridotta di informazioni;
- a posteriori si è dimostrato utile avere un grande numero di dati, eventualmente filtrabili, per la miglior comprensione del comportamento della cella climatica: con un numero inferiore di punti non sarebbe stato possibile interpretare correttamente certi comportamenti del legno alle variazioni cicliche molto rapide dell'ambiente.

## **10. La camera climatica**

### **10.1 Funzionalità**

L'apparato di misura è posto in un ambiente chiuso, climaticamente controllato da relè che agiscono su un gruppo frigorifero e un gruppo di resistenze.

Il meccanismo del condizionamento utilizza questi due gruppi in parallelo per mantenere le condizioni stabili intorno ai valori di umidità relativa e temperatura impostati sull'unità di controllo all'esterno della camera.

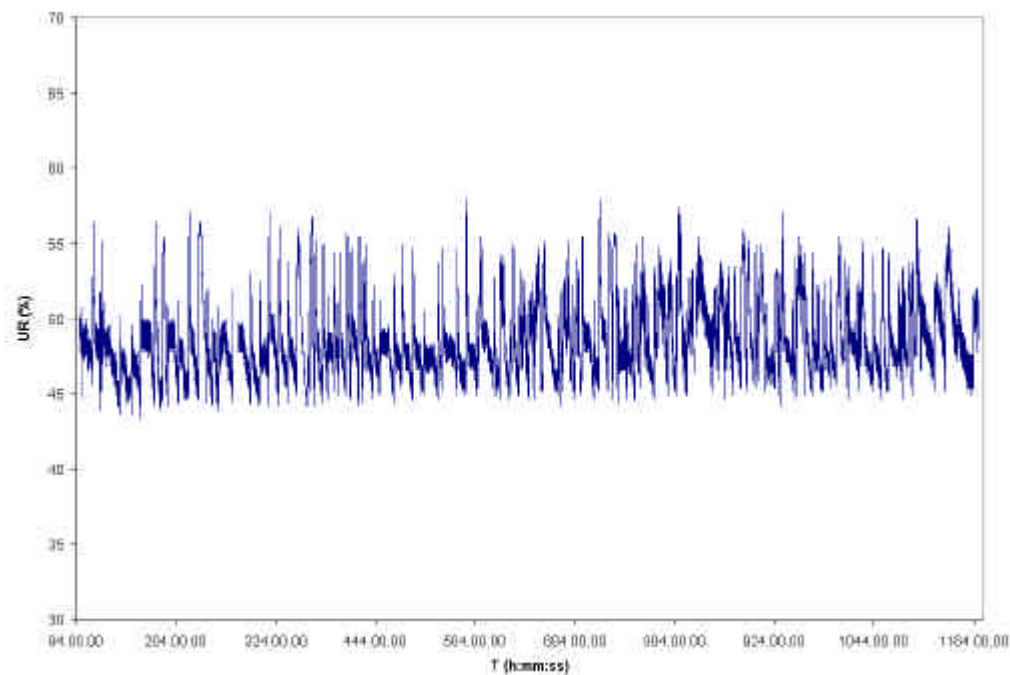
Il sistema di controllo agisce in modo diretto per quanto riguarda il controllo della temperatura grazie ad una termocoppia che fa entrare alternativamente in funzione il gruppo frigorifero o le resistenze quando vengono superati i valori di *dead zone* impostati sulla centralina di controllo; nel nostro caso  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  rispetto al valore voluto.

Per il controllo dell'umidità relativa il controllo è invece indiretto; gli stessi gruppi vengono azionati da una sonda a filamenti igroscopici sintetici della *Krautli*, posta su una parete della camera, come segue:

- a) quando l'umidità è al di sotto del valore impostato viene richiamata umidità da un bollitore posto all'esterno della camera;
- b) quando l'umidità supera il valore impostato entra in funzione il gruppo frigorifero che fa condensare parte dell'umidità dell'aria.

### **10.2 Capacità di regolazione**

L'efficienza del sistema è data dalla prontezza di risposta dell'ambiente all'intervento dei condizionatori e dall'equilibrio della loro reciproca interferenza: il dimensionamento corretto del volume d'aria da condizionare e della potenza delle resistenze e del gruppo frigorifero fa sì che l'oscillazione intorno al punto voluto sia ridotta al minimo.



Graf. 7 Andamento dell'UR nella camera climatica condizionata al 50%

L'elevata potenza degli impianti fa sì che, anche in condizioni di variazione simmetrica rispetto al *set-point*, si abbia un campo di  $\pm 5\%$  di oscillazione dell'umidità relativa. La presenza di grossi ventilatori all'interno garantisce che non si formino sacche a umidità molto diversa dal valore impostato ma non può impedire il pendolamento.

L'elevata sensibilità della *Hygroclip* permette comunque un fedele monitoraggio della variabilità delle condizioni, permettendo utili correlazioni in fase di elaborazione dei dati sperimentali.

### 10.3 Risposta a stimoli esterni

Il funzionamento della camera dove sono state svolte le prove risente di una progettazione tecnicamente superata: l'isolamento non è ottimale e ciò comporta una sensibilità piuttosto elevata alle condizioni esterne, cosicché in periodo estivo l'impianto di refrigerazione non riesce a contrastare l'elevata temperatura esterna e viceversa in inverno. Ciò si riflette sulla stabilità del valore impostato con oscillazioni che variano in frequenza e ampiezza con le stagioni.

## **11. Il simulacro del dipinto**

### **11.1 Dimensioni, caratteristiche tecnologiche, isolamento**

Le prime prove di funzionamento della MCB non potevano, come già detto, essere svolte su dipinti veri per l'attuale invasività dei vincoli senza una corretta interpretazione delle interazioni dell'apparecchio con il sistema quadro, assolutamente indispensabile in questa prima fase del lavoro.

Data la quantità di variabili in gioco in una situazione reale, è molto utile ridurre il loro numero grazie ad una semplificazione dove tutti i parametri sono noti e controllabili.

Il simulacro è costituito in questa fase da una tavola di *Populus alba L.* di dimensioni:

- 40 cm di lunghezza secondo la fibratura
- 40 cm di larghezza
- 4 cm di spessore

La tavola è stata posta a stagionare in ambiente stabilizzato a 20°C di temperatura e 65% di umidità relativa per circa un anno, affinché qualunque tensione eventualmente presente avesse modo di rilassarsi.

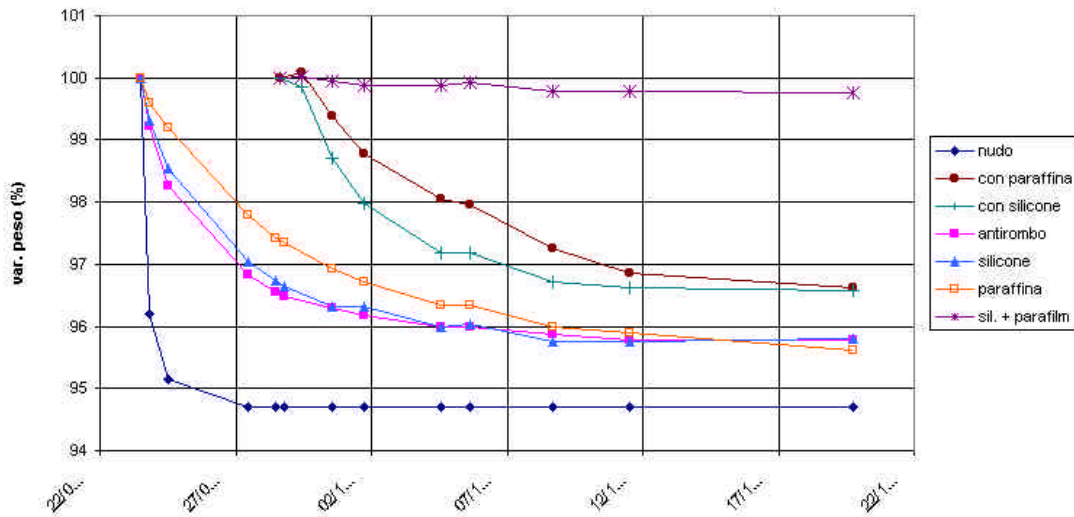
La tavola è sub-radiale, ha fibratura diritta, ed è totalmente priva di difetti.

Dallo stesso tavolone dal quale è stata ricavata sono stati ricavati altri provini di uguali larghezza e spessore, ma di lunghezza 4 cm sui quali sono state prese in fase preliminare delle misure di variazione dimensionale ponendoli in una vasca con soluzione saturata di NaCl (UR = 75%).

Al fine di impedire quanto più possibile lo scambio di umidità attraverso i bordi perpendicolari alla fibratura, questi sono stati isolati con silicone e *parafilm*; l'obiettivo principale è quello di ridurre il più possibile la componente di scambio legata alla capillarità non inquinando gli effetti dello scambio per diffusione. Questo particolare dovrebbe inoltre rendere la deformazione teoricamente indipendente dalla lunghezza secondo l'asse Y, rendendo comparabili gli ordini di grandezza di deformazione della tavola e dei provini più piccoli.

La scelta dell'accoppiamento silicone-*parafilm* è stata fatta dopo aver isolato vari provini con diversi prodotti:

1. paraffina fusa
2. antirombo per carrozzieri
3. silicone
4. silicone-*parafilm*



Graf.

#### 8 Prove di equilibramento con diversi isolanti

In queste prove i provini erano tutti completamente isolati con il prodotto adottato e l'accoppiamento silicone-*parafilm* si è dimostrato assolutamente il migliore.

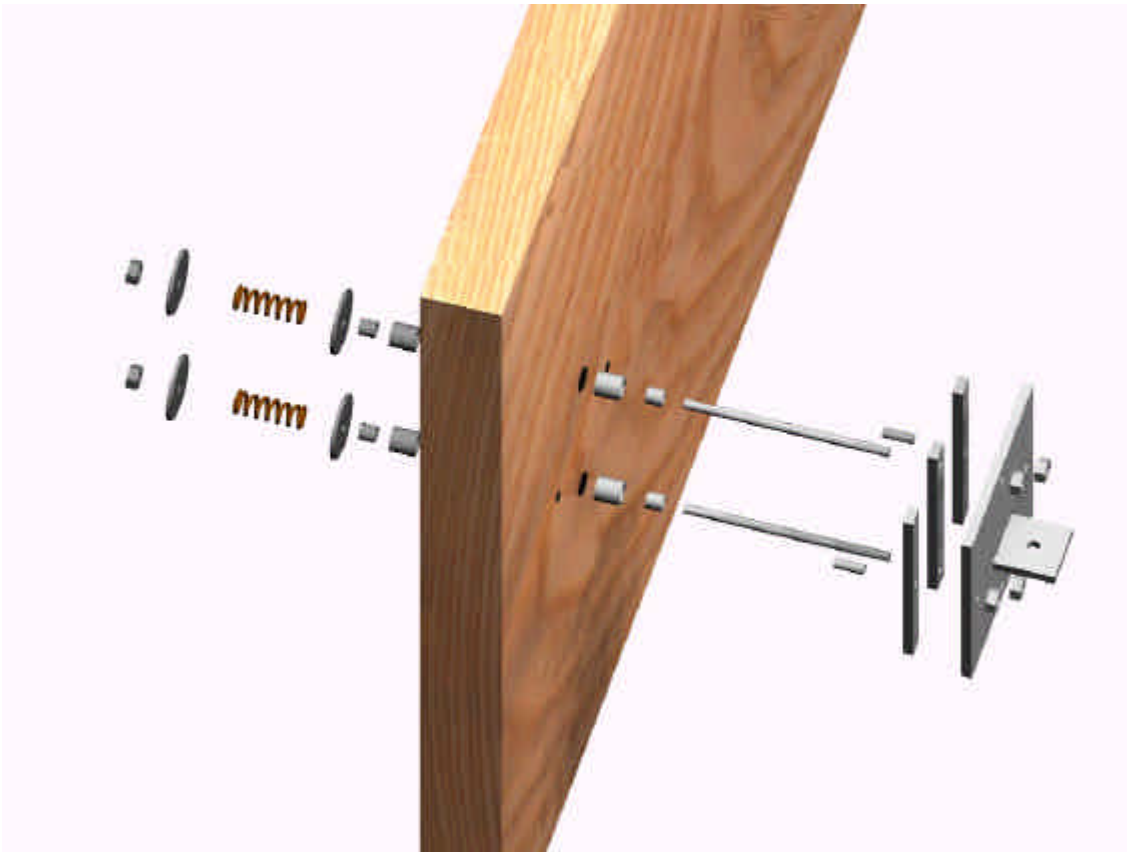


Fig. 23 Il sistema di collegamento tra piastre e simulacro

## 11.2 Sistema di collegamento alla MCB

Il collegamento del simulacro a ciascuno degli assi Z1, Z2 e Z3 è stato realizzato con tre piastre metalliche quadrate di 100 mm di lato e 5 mm di spessore fissate alla tavola con delle viti a brugola ( $\varnothing 5 \times 85$  mm) passanti e bloccate sulla faccia opposta. Le piastre hanno la funzione di distribuire su una superficie di legno più ampia la forza esercitata dal simulacro sui tre vincoli quando impedito, cosicché la  $\sigma$  scenda a valori compatibili con la resistenza del legno a compressione trasversale.

La superficie di queste piastre è pari a  $300 \text{ cm}^2$  e insiste sulla superficie totale della tavola interessata alla misura che è uguale a  $400 \text{ cm}^2$ : ciò comporta un'inaccettabile interferenza con la capacità di scambio della tavola, creando le condizioni per il manifestarsi di un gradiente asimmetrico sulle due facce.

È stato perciò necessario fare una scelta di compromesso tra le due esigenze, arrivando all'interposizione tra piastre e tavola di tre piastrine di alluminio che permettes-



sero un sufficiente passaggio d'aria sulla superficie della tavola e che aumentassero comunque la superficie collaborante alla sollecitazione.

### **11.3 Molle**

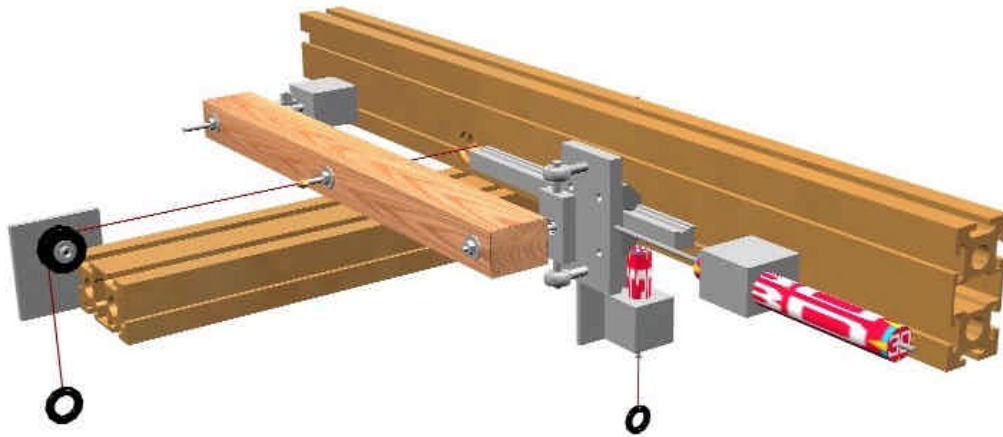
Un altro aspetto del quale tenere conto per poter misurare le reali forze esercitate dal simulacro è il ritiro in spessore del legno: se esso non fosse stato considerato avrebbe costituito una potenziale via di deformazione non misurabile, equivalente perciò ad una frazione di forza non esercitata.

A tal fine, come si vede dalla fig. 23, sono state poste due molle precaricate per ogni piastra che costringono la tavola a restare a contatto con le piastre; il precarico è stato attribuito alle molle con il serraggio dei dadi posti all'estremità della barra filettata: con un accorciamento di 7 mm il precarico raggiunto è di circa 65 daN. Se la tavola diminuisse il suo spessore di 1 mm, la diminuzione della forza esercitata dalle molle scenderebbe a circa  $56 \text{ daN} \times 2 = 112 \text{ daN}$  per piastra.

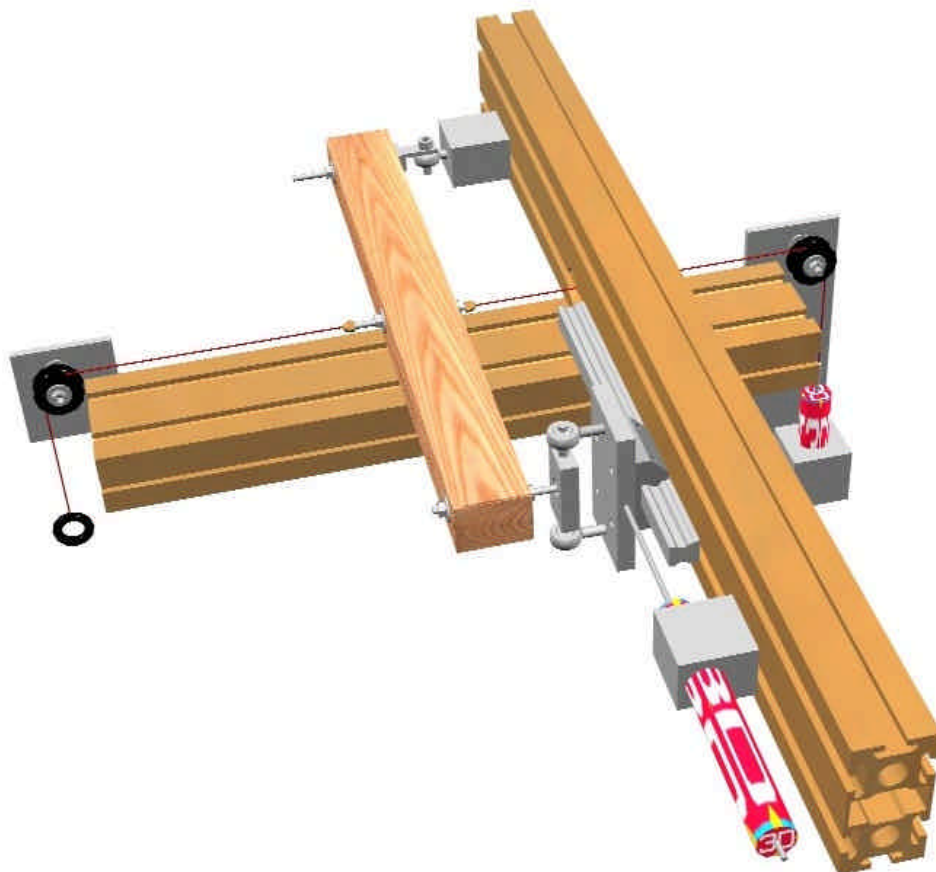
### **11.4 Problemi derivanti dalla posizione in aggetto dei perni**

La soluzione adottata ponendo i centri di rotazione della MCB al di fuori dell'asse neutro della tavola crea sulle estremità delle piastre momenti ribaltanti che si manifestano sotto forma di sollecitazioni a rifollamento esercitate dalle barre lungo lo spessore della tavola.

Le molle svolgono quindi anche l'altra importante funzione di contrastare questa sollecitazione indesiderata e non misurabile grazie alla loro cedevolezza elastica che permette una minima quota di scorrimento delle barre nella loro sede. Perché questo scorrimento possa realizzarsi sono state poste due coppie di anelli di acciaio concentrici per cuscinetti ( $\varnothing 1$ : 12mm – 8mm;  $\varnothing 2$ : 8mm – 5mm) per ogni sede delle barre. I fori sul simulacro hanno un  $\varnothing=6\text{mm}$  per consentire lo scorrimento delle barre.



a)



b)

Fig. 24 a) e b): due viste dell'apparato allestito per il testimone a deformazione libera

## **12. Il testimone a deformazione libera**

### **12.1 Presupposti teorici**

Le informazioni sui carichi e sulle deformazioni che ci può fornire il simulacro nei suoi cicli di deformazione impedita, senza un riferimento certo, potrebbero avere una valenza molto limitata, non essendo originate da un materiale perfettamente elastico: gli effetti determinati dal rilassamento e dal comportamento meccano-sorbitivo potrebbero far sì che ad ogni ciclo di adsorbimento o desorbimento alcune differenze di comportamento vengano influenzate dalla variabile tempo, non più inteso come tempo della prova svolta ma come tutta la serie delle precedenti, rendendo irreversibile il processo chimico-fisico cui il simulacro è stato sottoposto.

Dato che i risultati sperimentali che la MCB è in grado di fornire devono essere esportabili a situazioni reali, nelle quali ci troviamo in un punto ignoto della storia igrometrica e deformativa, tanto più indispensabile diventa verificare l'ipotesi appena esposta ponendo il nostro simulacro in relazione univoca con un testimone di caratteristiche meccaniche assolutamente analoghe che non venga sollecitato ma sottoposto soltanto ai cicli igrometrici in totale libertà di deformazione; ne dovrebbe scaturire una specie di *esperimento dei gemelli* descritto da EINSTEIN nella sua teoria della relatività generale: cosa sarebbe successo al simulacro se non impedito e viceversa, con un possibile aiuto alla descrizione quantitativa degli effetti delle frazioni di deformazione permanente rispetto alla pura isteresi igrometrica.

### **12.2 Descrizione del montaggio e dei particolari costruttivi**

Per ottenere valori direttamente confrontabili con quelli forniti dal sistema di acquisizione del simulacro è stata progettata una versione semplificata della MCB nel quale la misure rispettano fedelmente la luce totale tra i vincoli 1 e 3 del simulacro, pur cambiando tipo di geometria, per cui le deformazioni sono lette solo con due trasduttori: allungamento e accorciamento del provino lungo X rispetto al punto 1 e spostamento lungo Z per il punto centrale del provino.

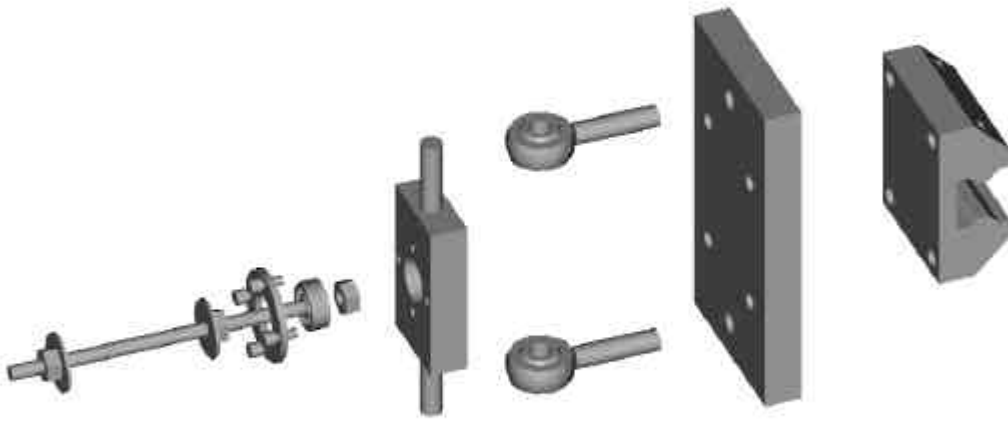


Fig. 25 Esploso dello snodo del testimone a deformazione libera

Anche per quanto riguarda il tipo di vincoli applicati al testimone tutto è stato replicato, adattando le soluzioni operative alla diversa geometria dell'apparato:

- sull'appoggio 1 il vincolo del testimone all'apparato è costituito da una cerniera sferica;
- il vincolo dell'appoggio 2, come sintesi dei vincoli 2 e 3 della MCB, è scorrevole lungo l'asse X ed è costituito da due cerniere cilindriche, una libera di ruotare sull'asse Y e l'altra sull'asse Z.
- dato che il punto di misura della freccia d'inflessione sull'asse Z non è fisso, ma trasla secondo X di una quantità pari a  $\frac{\Delta x}{2}$ , il trasduttore su Z avrebbe commesso un errore proporzionale all'angolo compreso tra l'asse del trasduttore e il segmento congiungente il punto di misura con il tastatore del trasduttore; la soluzione adottata è quella di allontanare il trasduttore a distanza tale da minimizzare l'angolo che si crea.

### **12.3 Confrontabilità dei dati tra testimone e simulacro**

La possibilità di mettere in correlazione due individui la cui storia deformativa è perfettamente identica e conosciuta può fornire elementi utili alla comprensione degli effetti viscosi derivanti dalla traversatura: è però indispensabile che le misure di deformazione del testimone siano omogenee a quelle del simulacro per ordine di grandezza e verso. L'omogeneità del materiale è assicurata dal fatto che il testimone proviene dallo stesso tavolone del simulacro e ha uguale larghezza e spessore.

Per quanto riguarda l'altezza, l'isolamento identico sui bordi dovrebbe ridurre l'effetto di questa terza dimensione, rendendo gli scambi possibili solo per diffusione.

Nelle conclusioni verranno analizzati i dati e fatte alcune ipotesi per far sì che le differenze riscontrate possano essere utilizzate proficuamente.

Per quanto riguarda la numerazione adottata in sede di acquisizione degli strumenti di misura utilizzati su MCB e testimone si rimanda all'Allegato 1.

## **13. Prime prove**

### **13.1 Cicli programmati**

Dopo tutte le fasi di progettazione, realizzazione e taratura della MCB erano indispensabili alcune prove che verificassero il corretto funzionamento di tutto l'apparato di misura.

Il primo criterio adottato è stato quello di attuare cicli di adsorbimento e desorbimento in regime di *unsteady state*, con variazioni a scalino dell'umidità relativa piuttosto drastiche, in modo da indurre nel simulacro risposte il più amplificate possibili e avere così un buon margine per l'analisi della risposta, senza risentire troppo degli eventuali disturbi. Sia nella deformazione libera che impedita si è scelto di portare il legno all'equilibrio con le nuove condizioni di umidità senza invertire i gradienti, prova che costituirà materia di approfondimenti successivi.

Un altro criterio adottato in questa fase è stato quello di far lavorare il sistema in regime di gradiente simmetrico lungo lo spessore del simulacro e del testimone, operando perciò con facce prive di isolanti e perciò libere di scambiare.

Per accelerare il raggiungimento dell'equilibrio nei vari cicli è stato scelto di operare a temperatura costante di 30°C.

Ciò detto, i cicli scelti sono stati i seguenti:

- ✓ con simulacro e testimone liberi ed equilibrati a 30°C di T e 65% di UR: discesa dell'umidità della camera al 30%;
- ✓ nelle stesse condizioni di vincolo, l'umidità è stata fatta risalire al 75%;
- ✓ come prima prova con testimone libero e MCB completamente bloccata: discesa al 50% di UR.

Ai fini di una migliore esposizione dei dati sperimentali ottenuti si allegano separatamente i grafici di UR e T delle singole prove. Su di essi è necessario premettere alcune informazioni per quanto riguarda i primi giorni di condizionamento:

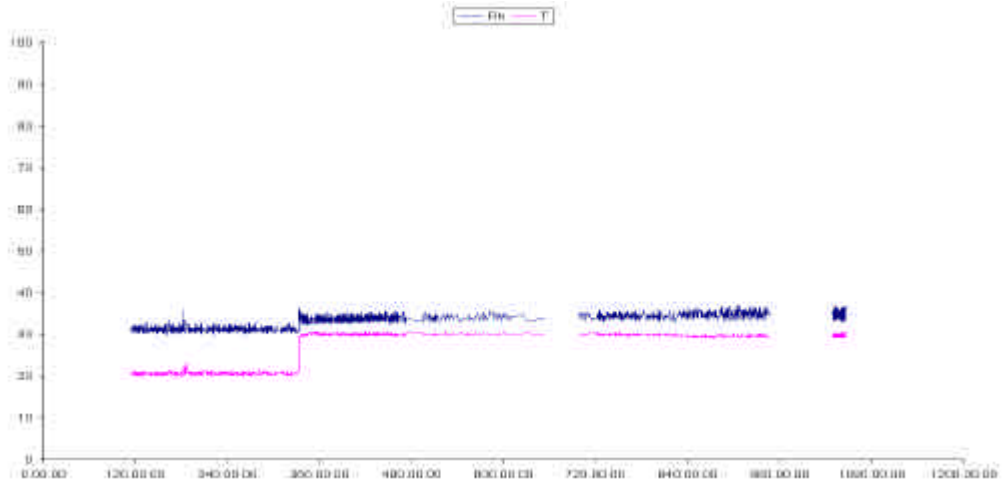
- ✓ la prima prova mirava a creare un forte gradiente di desorbimento e a tale scopo era stata regolata l'UR su valori prossimi al 25%. Purtroppo il cattivo isolamento della camera climatica ha fatto sì che l'elevata temperatura estiva esterna, superiore a 35°C, ha fatto surriscaldare l'ambiente interno, sovrapotenziando le resistenze ed impedendo al gruppo frigorifero di contrastare l'incremento di temperatura. La prima operazione effettuata è consistita nel rialzare l'UR fino a valori compatibili con le capacità dell'impianto di condizionamento;
- ✓ successivamente, dopo la valutazione dell'utilità di accelerare gli scambi del simulacro, si è provveduto ad innalzare la temperatura a 30°C, temperatura che tuttora si mantiene agevolmente;
- ✓ gli sbalzi di T hanno provocato sensibili dilatazioni della MCB, che sono state lette dal sistema di acquisizione e che sono ben visibili nei successivi grafici;
- ✓ durante il ciclo di adsorbimento il bollitore che fornisce umidità alla camera si è rotto durante la notte e, nell'attesa dell'assistenza, vi è stato un repentino crollo dell'UR, fortunatamente non troppo lungo; la sensibilità del sistema ha comunque fedelmente riportato gli eventi.

### 13.2 Curve sperimentali

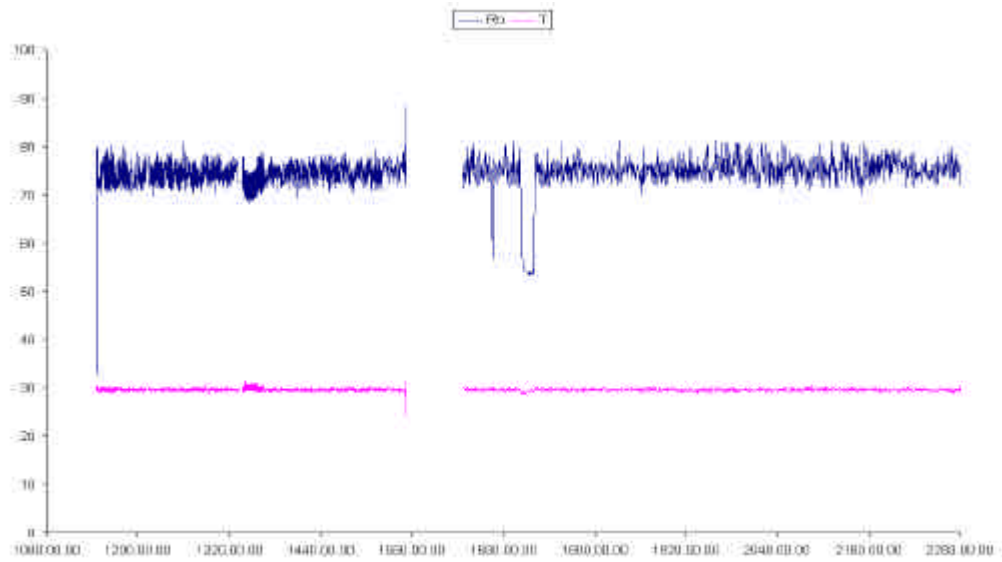
Le curve di deformazione libera sono state suddivise con la stessa cadenza dei precedenti grafici di T e UR; la rappresentazione scelta è quella dei  $\Delta$  di deformazione scomposta negli assi X e Z letti dai trasduttori. Non sono state fatte operazioni di correzione (*smoothing*) dei dati perché l'entità dei disturbi è poco influente, dato l'ordine di grandezza delle deformazioni misurate.



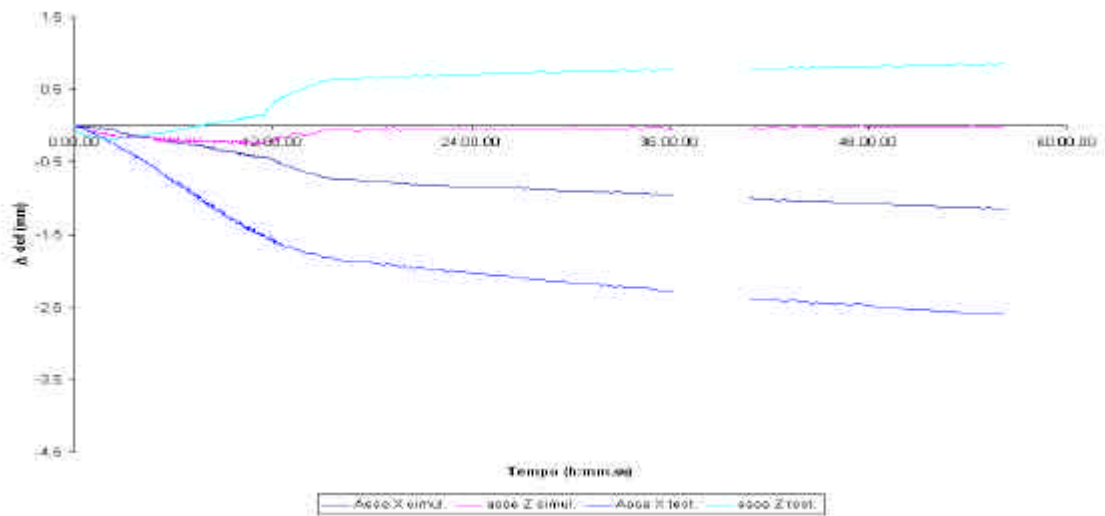
Graf. 9: primi 2 giorni di acquisizione



Graf. 10: primo ciclo UR 30% (durata 38 giorni)



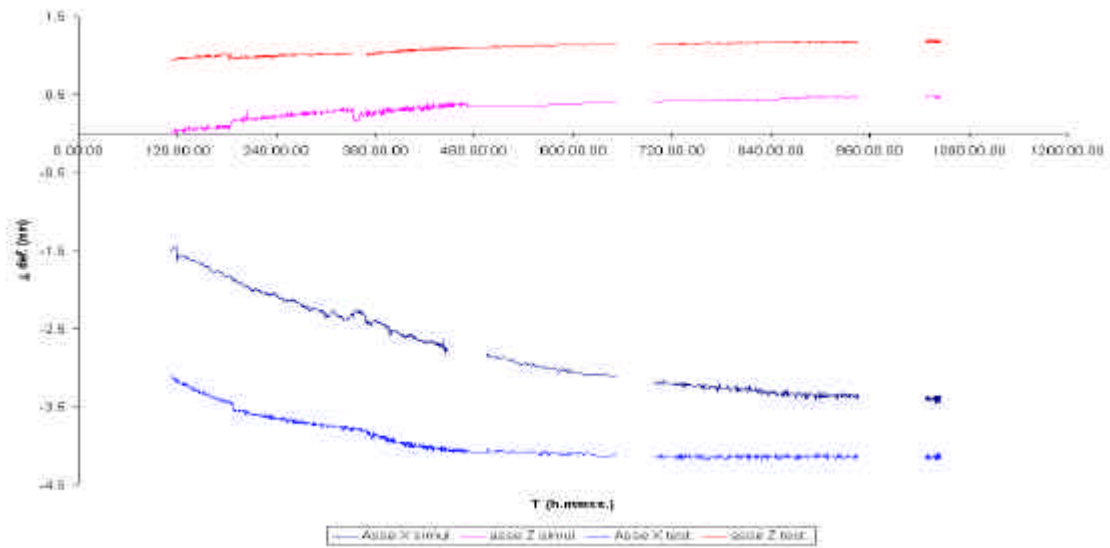
Graf. 11: secondo ciclo UR 75% (durata 49 giorni)



Graf.

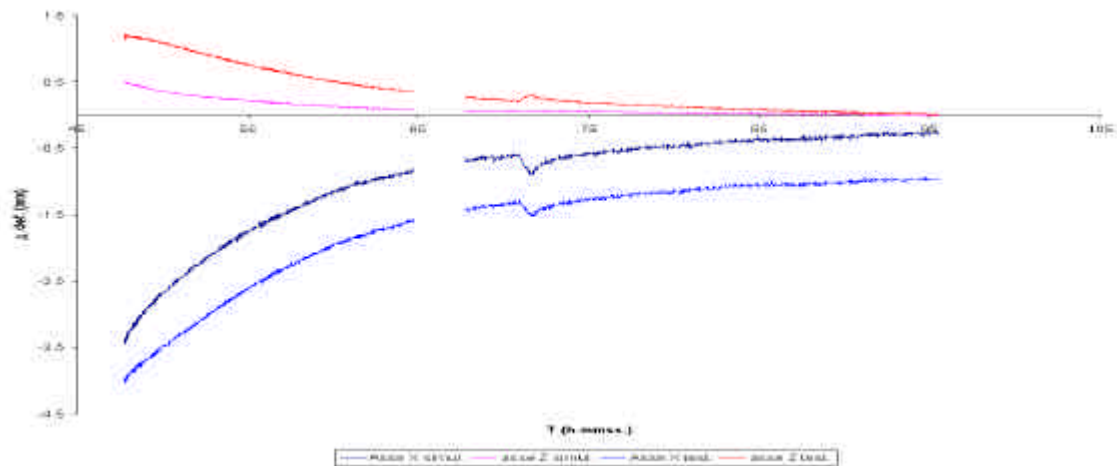
12 Primi due giorni di deformazione libera





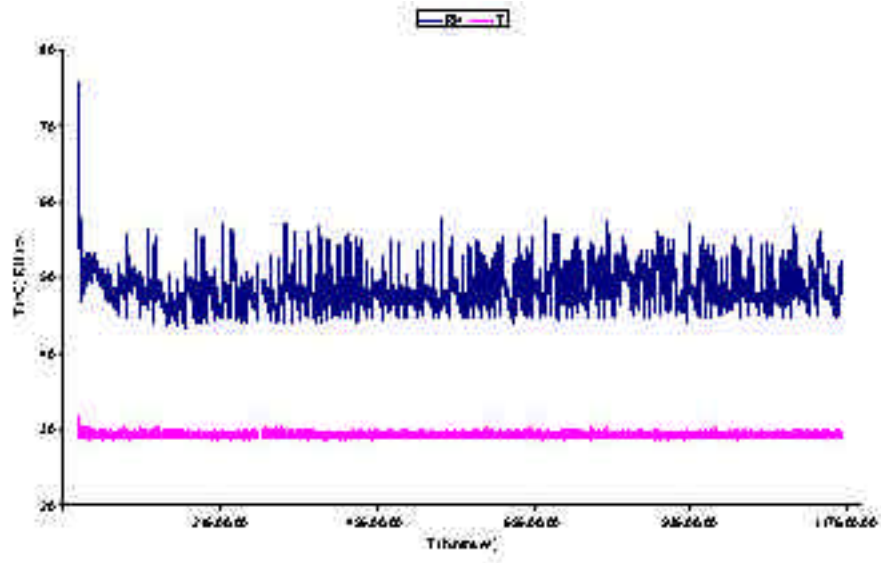
Graf.

13 Primo ciclo di desorbimento al 30%

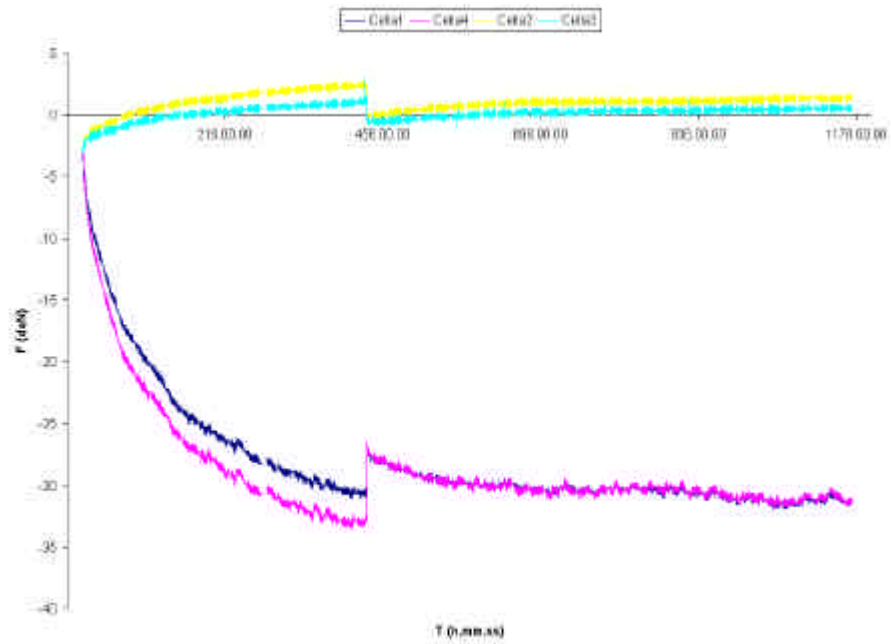


Graf. 14 Secondo ciclo di adsorbimento al 75%

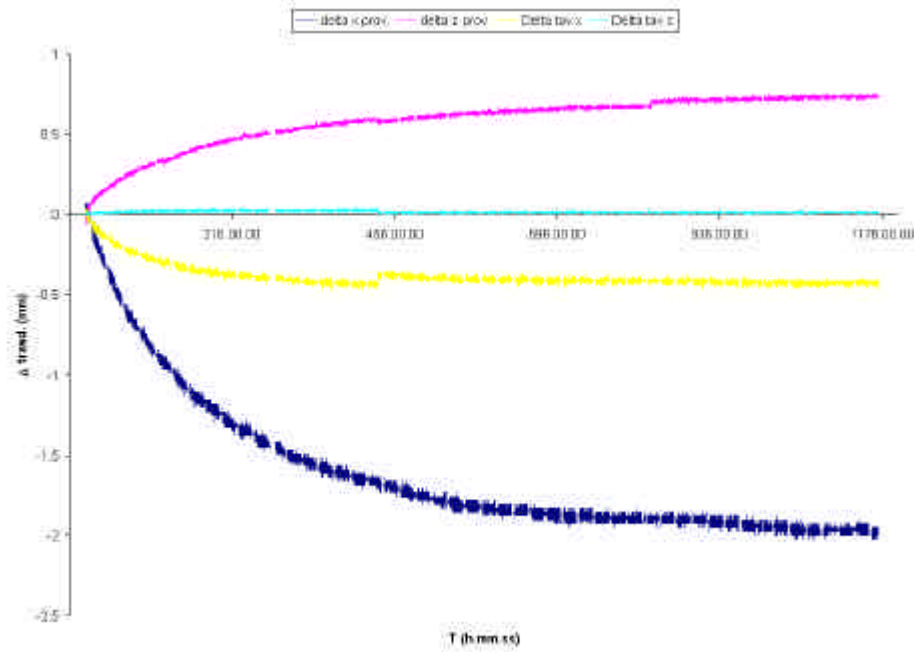
Si è poi attuato un primo ciclo di desorbimento a MCB totalmente bloccata, per verificarne il funzionamento: come si ipotizzava, la prova doveva fornire dati di forza ipoteticamente priva di deformazioni; ciò si sarebbe verificato nel caso di un'infinita rigidità e della MCB, ma era prevedibile che una quota di deformazione si sarebbe comunque manifestata. Ciò sarà oggetto di successiva discussione dei risultati ottenuti.



Graf. 15 Andamento di T e UR nella prova a deformazione impedita

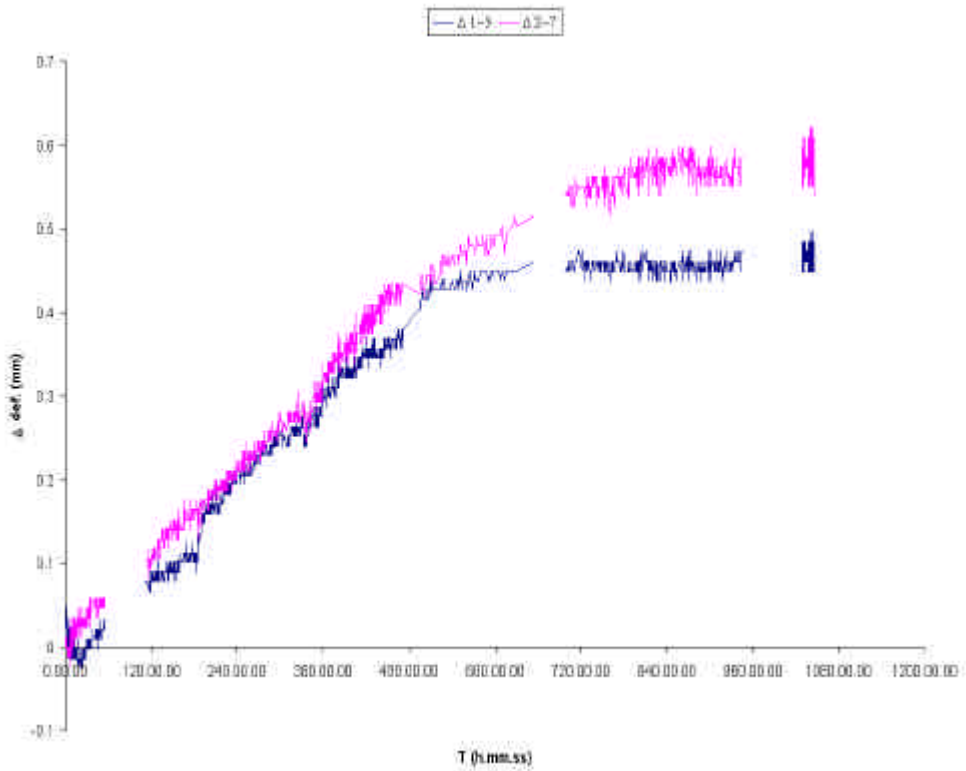


Graf. 16 Andamento delle forze esercitate dal simulacro

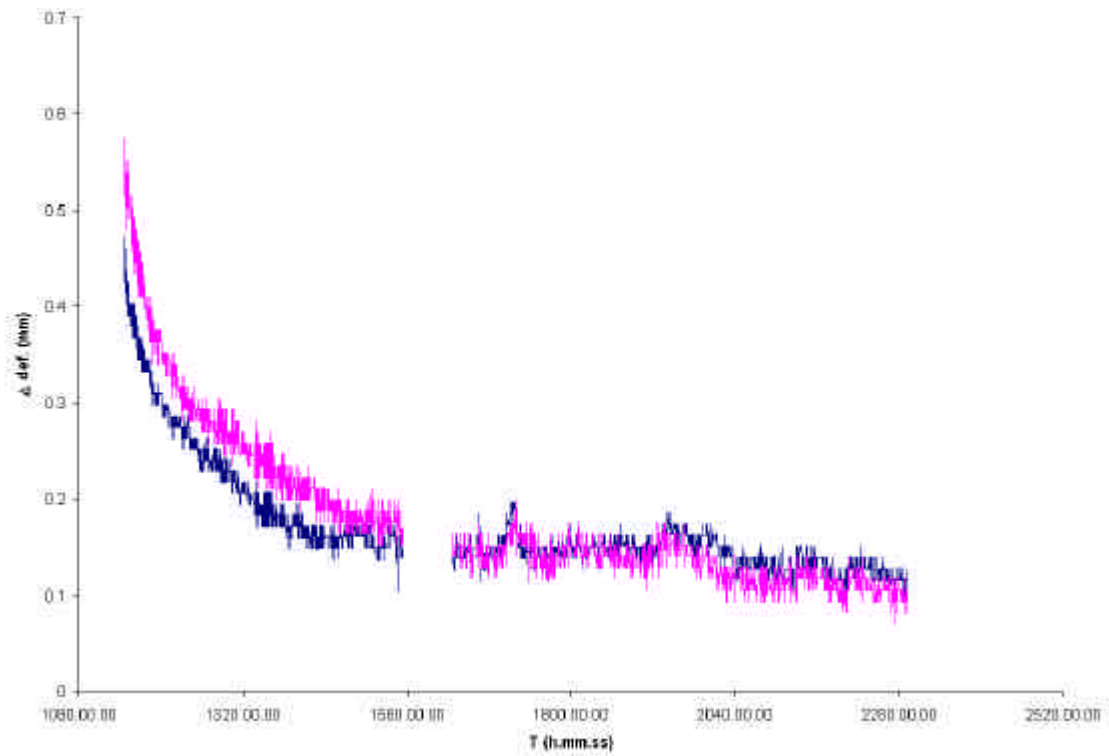


Graf. 17 Deformazioni comparate simulacro-testimone

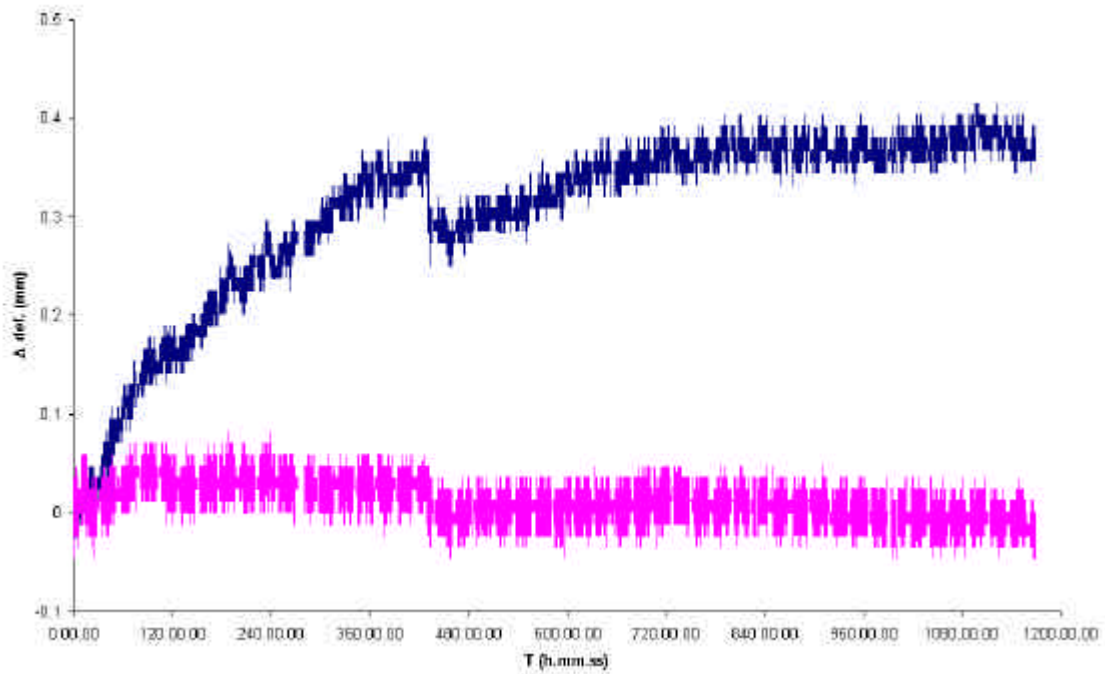
A completamento dell'esposizione dei dati grezzi ricavati dalle prove si allegano i risultati della prova collaterale di monitoraggio dell'imbarcamento secondo la metodologia che si definisce sinteticamente "Giotto".



Graf. 18 Primo ciclo monitorato secondo il sistema Giotto



Graf. 19 Secondo ciclo



Graf.

20 Primo ciclo a deformazione impedita

## **14. Elaborazione dei dati sperimentali**

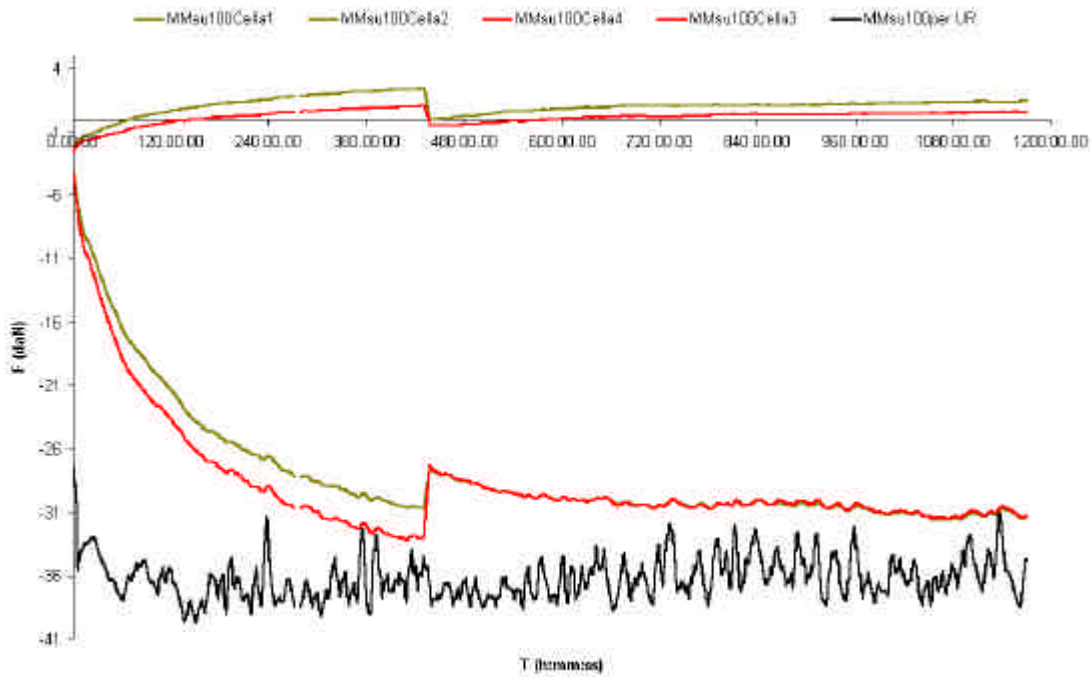
### **14.1 Smoothing**

L'effetto dei disturbi di carattere elettromagnetico che affliggono i segnali provenienti dai trasduttori impone un'elaborazione successiva per comprendere i comportamenti nel modo più corretto. Lo strumento statistico adottato è quello della media mobile, applicato in generale su cento campioni, che corrisponde ad un intervallo di mediazione di circa sette ore. Naturalmente, anche se la frequenza del fenomeno che si analizza è molto più bassa, data l'alta frequenza del disturbo, ciò non corrisponderebbe all'adozione di un *sampling rate* di un punto ogni sette ore: infatti, come spiegano le leggi del campionamento, una volta adottato un tasso molto lento non sarebbe più possibile effettuare un buon filtraggio del disturbo associato. Ecco perché l'adozione di un tasso di campionamento così veloce mostra innegabili vantaggi.

### **14.2 Correlazioni**

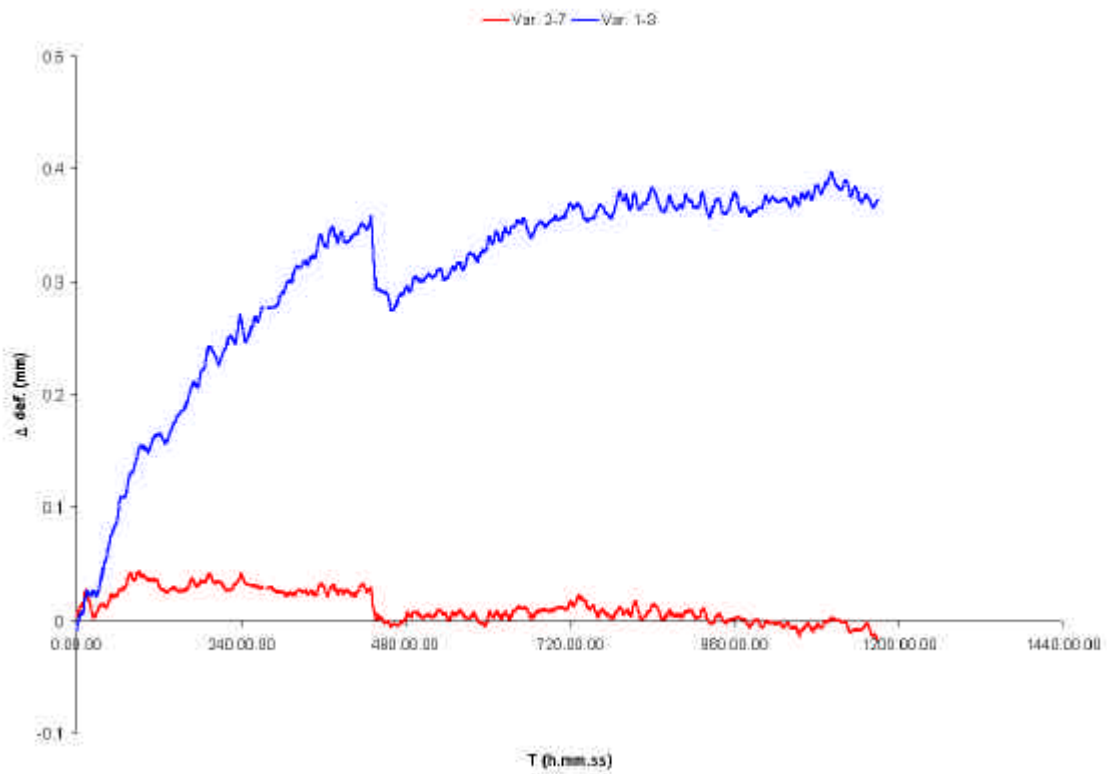
Una volta resi leggibili a livello di tendenze i dati acquisiti, sono state svolte alcune prime e semplici correlazioni, per verificare il buon funzionamento dell'apparato di misura.

Nella prova a deformazione impedita filtrata sono state associate le curve del segnale proveniente dalle celle di carico alla curva dell'andamento dell'UR, che mostrano una risposta molto pronta da parte della tavola anche alle variazioni rapide del clima della camera.



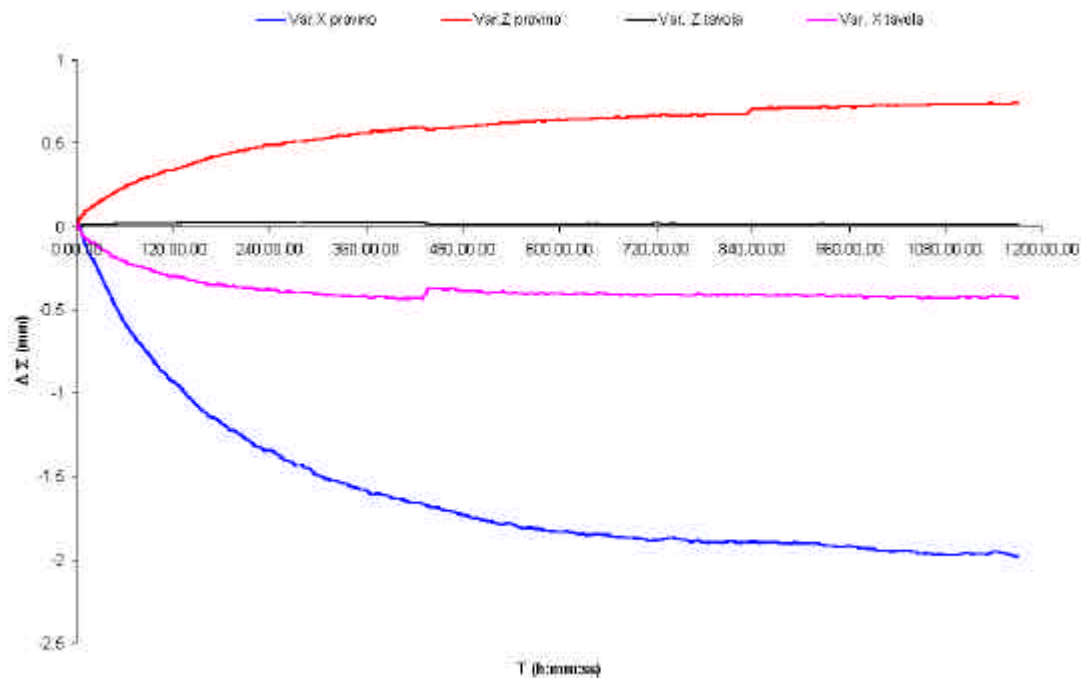
Graf.

21 Correlazione tra variazioni di UR e forze misurate sulle celle



Graf.

22 Andamento delle coppie di trasduttori "Giotto"



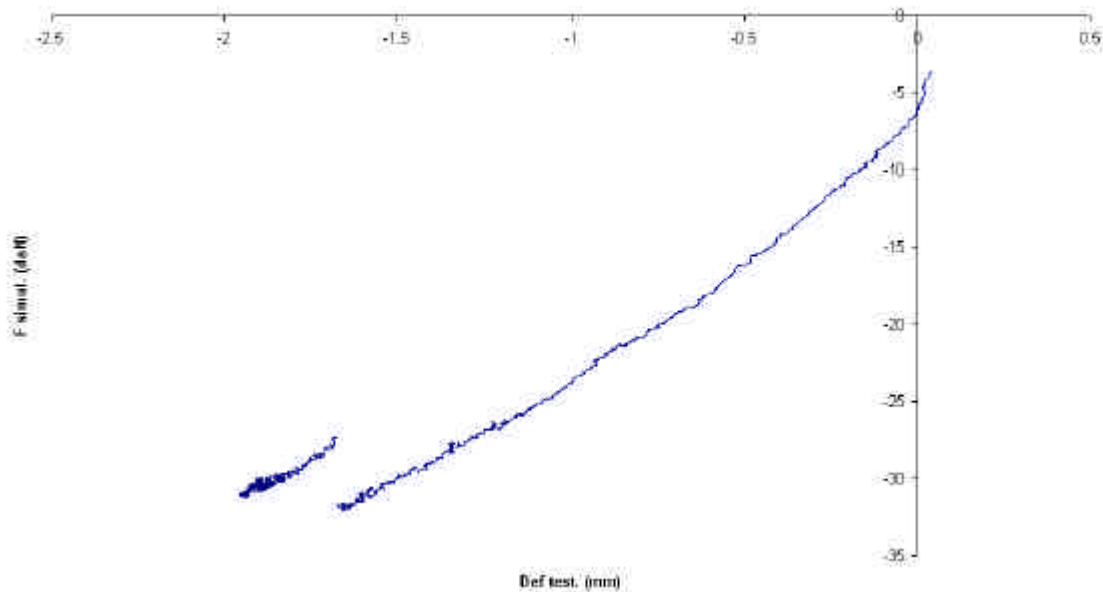
Graf.

23 Deformazioni filtrate dei trasduttori

I salti ben visibili nei grafici relativi al ciclo di desorbimento a deformazione impedita, sia per quanto riguarda le forze che per tutte le deformazioni della tavola, sono dovuti all'estrazione effettuata durante la prova delle barre passanti che si trovavano sulle piastre di collegamento del simulacro senza le boccole che si vedono nella fig. 23: come si può ben vedere il collegamento tramite quattro barre costituiva un fattore di eccessivo irrigidimento della zona di fissaggio, contrario a quello che doveva essere il principio di non interferenza strutturale della MCB con le forze esercitate dal simulacro. Ciò può servire comunque da esempio di quanto complessa è l'interazione del regime vincolare con le reazioni della tavola.

Una correlazione molto interessante è stata quella realizzata tra i dati di forza esercitata dal simulacro e i dati di deformazione misurati sul testimone libero: essa ha dimostrato che la comparabilità dei due sistemi è più che legittima.

Sebbene la deformazione totalmente impedita non si sia verificata, nel graf. 24 si può addirittura visualizzare l'effetto del rilassamento viscoso:



Graf.

24 Correlazione tra forza esercitata dal simulacro sull'asse X e deformazione del testimone nella stessa direzione

Non si può trascurare di notare l'utilità del sistema Giotto modificato di misurazione dell'imbarcamento: da esso si può analizzare in modo diretto come il simulacro abbia una deformazione molto complessa sia in fase di deformazione libera che, soprattutto, in fase di deformazione impedita. Infatti, in questa seconda prova l'irrigidimento costituito dalla MCB non ha impedito all'allineamento 1-3 di deformarsi di un ordine di grandezza paragonabile a quello della deformazione libera, diversamente dall'allineamento 2-7, praticamente immobile rispetto all'altra prova: ciò è causa di tensioni all'interno del simulacro, indispensabili per compensare le deformazioni non coerenti di parti del simulacro.

Questo tipo di comportamento era comunque in qualche modo atteso, visto per esempio l'articolo di TORATTI<sup>14</sup>, nel quale veniva proposto un modello di distribuzione delle tensioni nei fenomeni deformativi in clima variabile.

Un'analisi a parte richiede l'asimmetria di risposta delle celle sia sugli assi Z che su X (fino a quando non è stata cambiato lo stato dei vincoli): come detto nella parte riservata alla descrizione del possibile *cross-talk*, il bloccaggio dell'asse Z2 rispetto a X ha

---

<sup>14</sup> TORATTI T., SVENSSON S. *Experimental study on mechano-sorptive strains and internal stresses under fluctuations of humidity*, 1997, International Conference of COST Action E8



P. DIONISI VICI *Sviluppo di un apparato per la misurazione di forze e deformazioni indotte nei Dipinti su Tavola da variazioni climatiche: la Traversa Strumentata*

creato le condizioni perché si sviluppasse momenti che hanno disturbato la realizzazione della scomposizione delle forze esercitate dal simulacro su due assi ortogonali.

## **15. Discussione sui primi risultati riguardanti la funzionalità della MCB**

### **15.1 Funzionalità e limiti dello strumento**

Il lavoro di realizzazione e prima verifica della MCB mostra le potenzialità di questo strumento per quanto riguarda l'analisi delle interazioni tra tavolato ed elementi d'irrigidimento:

- a. la sensibilità dello strumento è molto elevata e, grazie al monitoraggio delle forze, ha permesso di rilevare con chiarezza quanto rapida sia la reazione del simulacro alle variazioni di breve periodo, con una visibilità del fenomeno che i trasduttori non avrebbero permesso;
- b. d'altra parte questa qualità impone una perfetta conoscenza del regime vincolare dell'insieme MCB-simulacro: in caso contrario si trarrebbero conclusioni errate, per esempio nel caso di letture asimmetriche dei valori di forza.

### **15.2 Ipotesi di miglioramento**

Una delle possibili strade da percorrere per ridurre il momento generato dalla non coplanarità degli assi è replicare l'asse X al di sopra degli assi Z (ved. fig. 26), così da annullare algebricamente le sollecitazioni lungo il piano YZ.

Data la sensibilità del sistema alla invasività del fissaggio della MCB al simulacro, vuoi per l'interferenza allo scambio, vuoi per le sollecitazioni anomale che induce sulla tavola, è necessaria la progettazione di vincoli che garantiscano la centralità dello snodo rispetto allo spessore: un'idea possibile (ma a tutt'oggi a livello di idea) prevede il fissaggio di cuscinetti reggispinta agli assi Z per mezzo della depressione esercitata da una pompa a vuoto pneumatico.

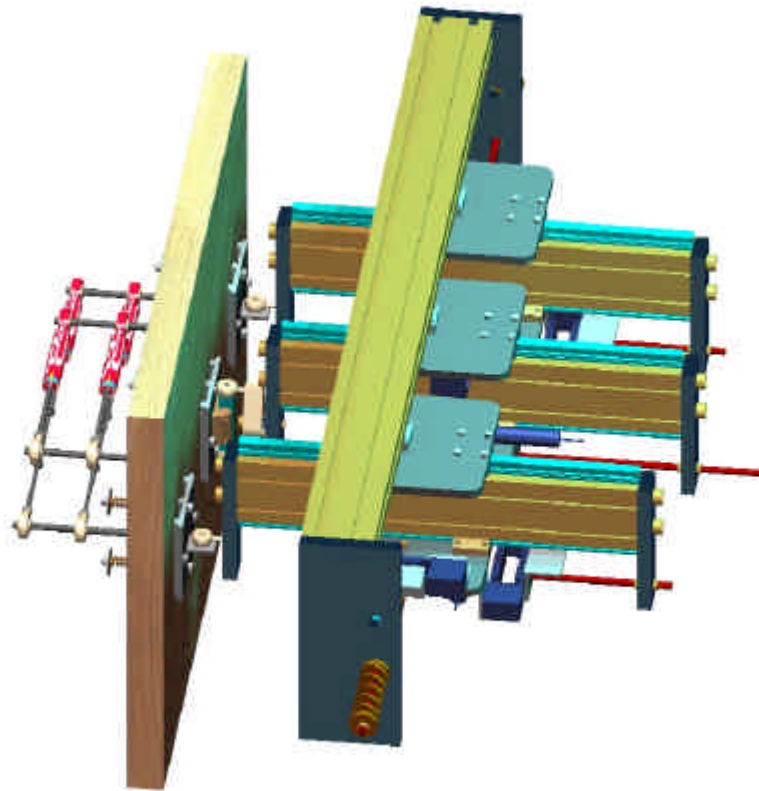


Fig. 26 Il raddoppio dell'asse X come soluzione dei problemi dati dai momenti

### 15.3 Cicli necessari per una migliore comprensione dei fenomeni

Data la sensibilità del sistema di misura rivestono grande interesse le possibilità di svolgere studi approfonditi su aspetti che, pur facendo parte delle problematiche riguardanti le interazioni tra tavole dipinte e traversatura, riguardano anche lo stato attuale della ricerca di base legata al comportamento mecano-sorbitivo.

Molto interessante sarebbe verificare qualitativamente gli effetti di cicli mecano-sorbitivi di varie intensità e frequenza tesi a simulare la situazione tipica di ambiente museale, ove la variazione di breve periodo interferisce in modo complesso con quella di lungo periodo: dalle curve del primo ciclo di desorbimento a deformazione bloccata si può notare come la tavola manifesti una buona capacità di rivelare sia l'una che l'altra, nonostante si ritenesse che lo spessore dovesse funzionare come un filtro passa-basso nei riguardi della risposta ai fenomeni rapidi.

I passi comunque già progettati riguarderanno l'innescare di fenomeni condizionati da diversi coefficienti di *diffusività* intervenendo su una delle facce con isolanti che creino asimmetrie sorbitive.

## **16. Conclusioni**

### **16.1 Primi risultati**

Dal lavoro finora svolto, seppure a livello d'impianto metodologico, si possono ricavare alcune indicazioni per successivi approfondimenti emerse dalle prove sperimentali:

- nelle prove a deformazione libera appare evidente che il modello deformativo secondo l'arco di circonferenza non è aderente ai dati forniti dai trasduttori potenziometrici; infatti, mentre nella prima prova di desorbimento libero la coppia di trasduttori 2-7, che rileva il tratto di tavola più interno, prosegue la sua deformazione quando quello 1-3 si è ormai stabilizzato, nelle prova successiva le due coppie hanno andamenti assolutamente coerenti. Ciò sembrerebbe indicare una plasticità di risposta del simulacro diversa a seconda del settore di tavola misurato;
- nella terza, invece, a deformazione totalmente bloccata, le misure della coppia 2-7 mostrano che il tratto centrale dell'allineamento non ha modificato il suo imbarcamento mentre quello totale misurato dalla coppia 1-3 ha ripetuto, in modo proporzionale al salto igrometrico imposto, l'andamento della prima prova.

Ciò significa che le misure fornite dalla MCB sono valide in assoluto per quanto riguarda i dati di deformazione rispetto agli assi X e Z dei punti di misura ma che le successive elaborazioni potrebbero portare a risultati non corretti. Prove ulteriori devono chiarire se ciò dipenda dal tipo di geometria di vincolo applicata o dalla tendenza deformativa della tavola sottoposta a prova.

## **16.2 Sviluppi futuri**

L'approccio al problema della stabilità dimensionale in ambiente climaticamente variabile per mezzo dello studio delle tensioni che si generano nel simulacro si può rivelare come uno strumento più sensibile rispetto a quello deformativo per la prontezza nel manifestarsi e per l'entità delle forze che il legno sviluppa.

Perché questo strumento d'indagine permetta la comprensione dei fenomeni verificatisi è indispensabile determinare le reazioni vincolari tra esso e il simulacro; questo approfondimento fornirà anche utili parametri per la modellizzazione dei diversi tipi di fissaggio tra traversa e quadro: si pensi al riguardo alle diverse interazioni che si possono manifestare tra il dipinto e una traversatura bloccata o scorrevole. Nella situazione attuale le misure ottenute sono frutto di una media tra le forze generate dalla tavola e gli eventuali cedimenti a rifollamento verificatisi in prossimità delle barre di vincolo, non verificabili direttamente durante lo svolgimento delle prove ma solo a posteriori, staccando il simulacro dalla MCB.

Dato che la maggior parte di questo lavoro è stato svolto nell'ambito della progettazione e realizzazione del prototipo, non è naturalmente possibile fornire in questa fase risultati generalizzabili ma solo indicazioni sul buon funzionamento della MCB e sulle risposte da parte del simulacro che si potranno rivelare utili per tracciare la strada di futuri cicli deformativi: sotto questo punto di vista la MCB si è rivelato uno strumento capace di interagire con il simulacro in modo sufficientemente versatile ed oggettivo per poterne ricavare in futuro i dati che costituiscono l'obiettivo di questa ricerca.

Si ribadisce la necessità di rendere i vincoli meno invasivi, in modo da ridurre le *zone d'ombra* non misurabili che in quelli in uso attualmente esistono.

La complessità strutturale della MCB non permette di ottenere dati di immediata applicabilità pratica: ognuna delle prove richiederà una mole notevole di elaborazioni successive che però partiranno dal presupposto innovativo di avere un elemento dalle caratteristiche di rigidità note e calibrate a priori.

## **Bibliografia**

ALLEGRETTI O., *Stabilità dimensionale del supporto ligneo di un dipinto medioevale: ricerche sperimentali sull'influenza della traversatura*, 1994, Tesi di Laurea

ALLEGRETTI O., *Sviluppo e caratterizzazione di metodologie per la misurazione delle variazioni dimensionali dei dipinti su tavola*, 1998, Tesi per il conseguimento del titolo di Dottore di Ricerca

ARMSTRONG L. D., KINGSTON R. S. T., *Effect of Moisture changes on creep in wood*, 1960, Nature

BUCK R. D., *Some applications of mechanics to the treatment of panel paintings*, 1962, in "Recent advances in Conservation", Butterworths, London

BUCK R. D., *Some applications of rheology to the treatment of panel paintings*, 1972, Studies in Conservation, n° 17

GIORDANO G., *Tecnologia del Legno*, 1988, UTET Torino

GRIL J., *Principles of mechano-sorption*, 1996, Stuttgart, International COST 508 Wood Mechanics Conference

GROSSMAN P. U. A., *Requirements for a model that exhibits Mechanosorptive behaviour*, 1976, Wood Sci. Technol.

HEARMAN R. F. S., PATON J. M., *Moisture content changes and creep of wood*, 1964, Forest Products J.

SKAAR C., *Water in Wood*, 1972, Syracuse University Press

- P. DIONISI VICI *Sviluppo di un apparato per la misurazione di forze e deformazioni indotte nei Dipinti su Tavola da variazioni climatiche: la Traversa Strumentata*
- TORATTI T., SVENSSON S. *Experimental study on mechano-sorptive strains and internal stresses under fluctuations of humidity*, 1997, International Conference of COST Action E8
- UZIELLI L., FIORAVANTI M., CASAZZA O., PERUCCA G., *A technique for monitoring on both faces the deformations of the wooden support of panel paintings: the Giotto's "Maestà di Ognissanti" experience*, 1992
- UZIELLI L., *Danni causati ai dipinti su tavola da variazioni termoigrometriche, e loro prevenzione*, in "Conservazione dei dipinti su tavola", 1994 Nardini editore
- UZIELLI L., *The Structural Conservation of Panel Paintings*, 1995, Proceedings of a symposium at the J. Paul Getty Museum

## **Allegati**

### **Allegato 1 Nomenclatura adottata per trasduttori e celle di carico di MCB e testimone**

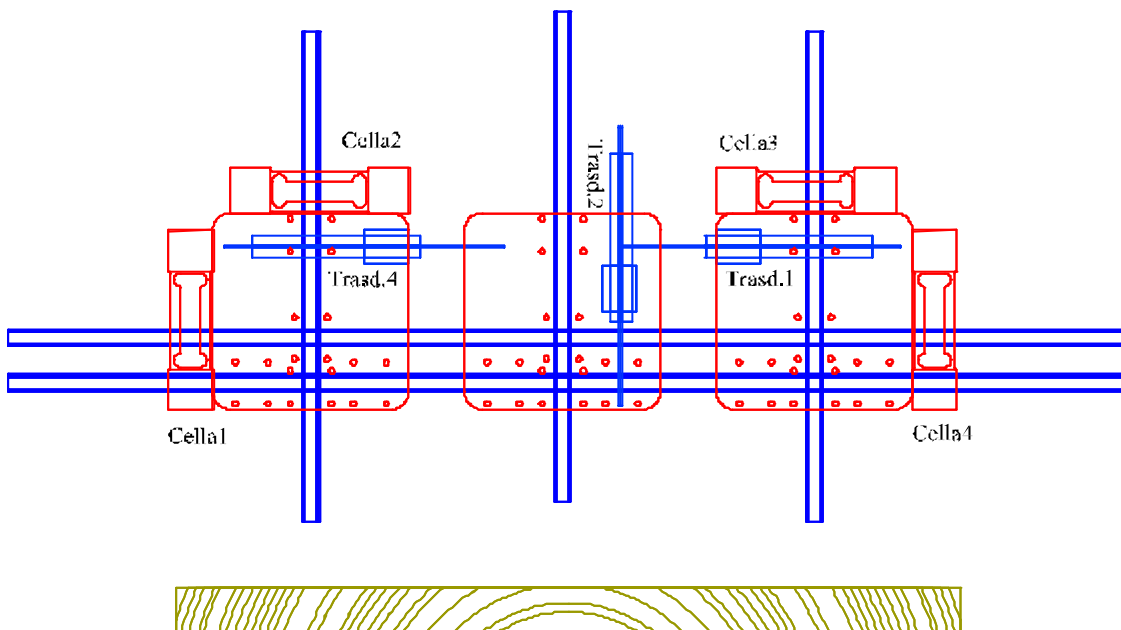
I criteri di denominazione dei singoli strumenti di misura sono i seguenti:

a) per i trasduttori LVDT:

- quelli da  $\pm 5$  mm sono denominati Trasd. 1, 2 e 5;
- quelli da  $\pm 25$  mm sono denominati Trasd. 3 e 4;

come si può vedere nella sottostante pianta della disposizione sulla MCB, le deformazioni sull'asse X vengono lette come somma delle deformazioni dei Trasd. 1+4, le deformazioni lungo l'asse Z vengono lette dal Trasd. 2;

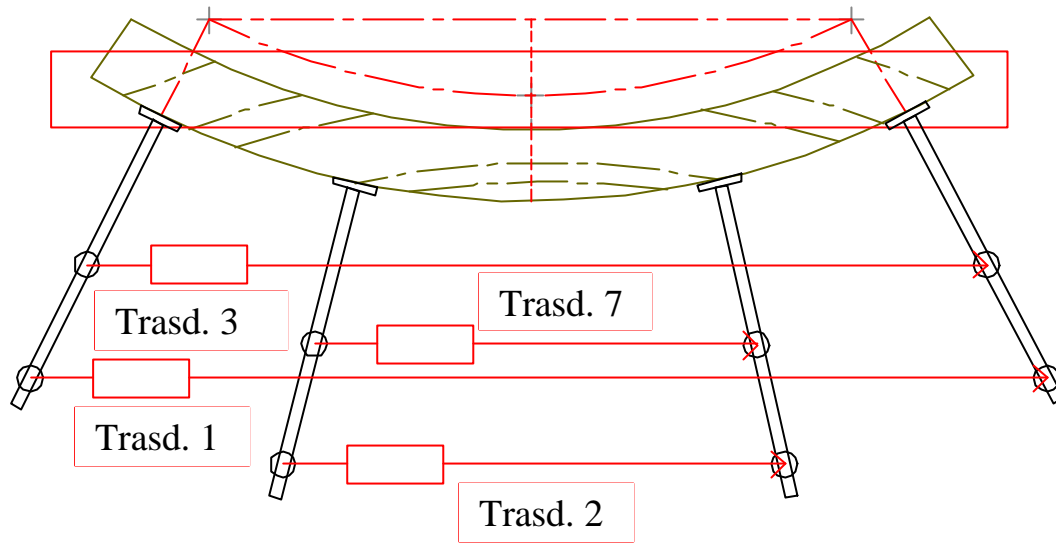
le deformazioni dell'asse X del testimone vengono lette dal Trasd. 3 e quelle dell'asse Z dal Trasd. 5.



Per quanto riguarda la disposizione dei trasduttori potenziometrici, gli allineamenti sono denominati 1-3 e 2-7, come da sottostante figura:



P. DIONISI VICI Sviluppo di un apparato per la misurazione di forze e deformazioni indotte nei Dipinti su  
Tavola da variazioni climatiche: la Traversa Strumentata



## **Allegato 2 Materiali e componenti equipaggiati sulla MCB e sul testimone a deformazione libera**

- 6 anelli interni per cuscinetti a rullini TORRINGTON, in acciaio temprato;  $d = 5\text{mm}$ ,  $D = 8\text{mm}$ ,  $h = 8\text{mm}$
- 6 anelli interni per cuscinetti a rullini TORRINGTON, in acciaio temprato;  $d = 8\text{mm}$ ,  $D = 12\text{mm}$ ,  $h = 12,5\text{mm}$ 

Dato che la tenuta fra i due anelli ha un accoppiamento forzato è stato necessario molarli di 0,1 mm per permettere, oltre all'inserimento, anche una riduzione dell'attrito di scorrimento delle barre filettate dentro la tavola in direzione Z.
- 6 molle per stampi in acciaio al cromo-vanadio PSE, S 20x32 (assi Z), spina 10mm, lunghezza libera 32mm, rigidità (Rg) 9,32 Kg/mm, lunghezza a blocco (lunghezza minima della molla con tutte le spire a contatto) di 21,00mm. Con una freccia dell'62% di 6,8 mm il carico è = 63,6Kg
- 2 molle per stampi in acciaio al cromo-vanadio PSE, S 32x127 (asse X), spina 16 mm, lunghezza libera 127mm, rigidità (Rg) 5,87 Kg/mm, lunghezza a blocco (lunghezza minima della molla con tutte le spire a contatto) di 75,00 mm. Con una freccia dell'62% di 32,2 mm il carico è = 189,2Kg
- Snodi sferici o teste a snodo TESCUBAL SERIE K:
  - 8 per potenziometrici tipo femmina filettatura M5
  - 2 per le piastre laterali di ancoraggio alla tavola tipo femmina filettatura M6
  - 2 per snodo cardanico tipo maschio filettatura M6
  - 2 per celle asse X tipo maschio filettatura M8
  - 2 per celle asse Z tipo maschio filettatura M6
  - 3 per provino tipo femmina filettatura M6
- 17 pattini in lega di alluminio ad alta resistenza a ricircolo di sfere STAR standard 1631, grandezza 15, classe di precisione N.
  - 5 per ciascuna piastra, 1 per snodo centrale, 1 per il testimone.

P. DIONISI VICI *Sviluppo di un apparato per la misurazione di forze e deformazioni indotte nei Dipinti su Tavola da variazioni climatiche: la Traversa Strumentata*

- 2 rotaie Star con fori filettati M6x20 su ambedue le testate, lunghezza = 1076mm
- 3 rotaie Star con fori filettati M6x20 su ambedue le testate, lunghezza = 356mm
- 3 profilati in alluminio STAR 40x80, lunghezza 356mm
- 3 listelli con fori filettati M4-17, lunghezza 356mm
- 1 listello con fori filettati M4-17, lunghezza 1076mm
- 1 profilato in alluminio STAR 40x80, lunghezza 1076mm
- 1 cuscinetto volvente radiale a sfere ad una corona SKF con dimensioni d'ingombro  $d = 10 \text{ mm}$ ,  $D = 30 \text{ mm}$ ,  $B = 9 \text{ mm}$  per snodo centrale
- 1 cuscinetto volvente radiale a sfere ad una corona HIN con dimensioni d'ingombro  $d = 4 \text{ mm}$ ,  $D = 13 \text{ mm}$ ,  $B = 5 \text{ mm}$  per provino
- 3 trasformatori differenziali di spostamento LVDT Monitran, modello MTN/DLSC5
- 2 trasformatori differenziali di spostamento LVDT Monitran, modello MTN/DLSC25
- 4 celle di carico "off center" *Shinkoh* NMB C2G1 con portata nominale 100 daN
- 4 trasduttori potenziometrici di spostamento Penny + Giles, modello HLP 190/5A1/25/1K

P. DIONISI VICI *Sviluppo di un apparato per la misurazione di forze e deformazioni indotte nei Dipinti su Tavola da variazioni climatiche: la Traversa Strumentata*

**Allegato 3 Galleria di immagini della MCB e del testimone libero durante i cicli di acquisizione**

1)

2)

Fot. 1 La MCB nella configurazione di prova

Fot. 2 Il testimone libero e la sonda di UR e T *Hygroclip*®

P. DIONISI VICI *Sviluppo di un apparato per la misurazione di forze e deformazioni indotte nei Dipinti su Tavola da variazioni climatiche: la Traversa Strumentata*

3)

4)

Fot. 3-4 Viste del sistema *Giotto* posizionato sul fronte della tavola

5)

6)

Fot. 5 Particolare del trasduttore di spostamento sull'asse Z2

Fot. 6 Particolare dello snodo centrale

#### Allegato 4 Elaborazione dei dati ottenuti dalla prima prova a deformazione impedita affetti da *cross-talk*

Come detto nel paragrafo 5.6, il bloccaggio del punto centrale dell'asse Z2 rispetto all'asse X ha introdotto le condizioni per l'instaurarsi del *cross-talk* tra le celle di carico. Applicando le formule descritte nel paragrafo 5.6 si ottengono i valori di FX2 e il valore  $[FZ2 - (FZ1 + FZ3)] \neq 0$ , altrimenti non misurabili.

