

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE  
SCUOLA DI DOTTORATO IN AGRARIA

Dottorato di ricerca in Gestione Sostenibile  
delle Risorse Agrarie e Forestali

Ciclo XXVI

**TECNICHE AVANZATE PER LO STUDIO  
DEL COMPORTAMENTO STRUTTURALE  
DEI DIPINTI SU TAVOLA**

**Dottoranda**

Dott. Linda Cocchi

---

*(firma)*

**Tutore**

Prof. Luca Uzielli

---

*(firma)*

**Coordinatore del Dottorato**

Prof. Leonardo Casini

---

*(firma)*

Anni 2011/2013



## **Dichiarazione**

Con la presente affermo che questa tesi è frutto del mio lavoro e che, per quanto io ne sia a conoscenza, non contiene materiale precedentemente pubblicato o scritto da un'altra persona né materiale che è stato utilizzato per l'ottenimento di qualunque altro titolo o diploma dell'Università o altro istituto di apprendimento, a eccezione del caso in cui ciò venga riconosciuto nel testo.

## **Declaration**

I hereby declare that this submission is my own work and that, to the best of my knowledge and belief, it contains no material previously published or written by another person nor material which to a substantial extent has been accepted for the award of any other degree or diploma of the university or other institute of higher learning, except where due acknowledgment has been made in the text.

Firenze, 18 Dicembre 2013

Linda Cocchi

---



## Sommario

Questa ricerca è stata svolta in collaborazione con l'Opificio delle Pietre Dure (OPD – Firenze) e si colloca nell'ambito del restauro di supporti lignei di dipinti su tavola, focalizzandosi su una particolare tecnica che consiste nell'applicazione di traverse munite di molle come limitatori di deformazione del tavolato.

La traversatura con molle è stata sviluppata e messa a punto presso l'OPD negli anni Ottanta; l'innovazione di tale sistema risiede nel fatto che le molle permettono una modulazione e una regolazione delle forze esercitate fra traversa e tavolato. Ad oggi il dimensionamento della traversatura con molle viene effettuato sulla base dell'esperienza del restauratore e su osservazioni qualitative circa lo stato conservativo delle opere in restauro, senza alcun supporto di dati scientifici.

Con il presente lavoro si individuano linee guida finalizzate al corretto dimensionamento della traversatura con molle; a tal fine si propone una dettagliata procedura volta a definire, caso per caso, caratteristiche meccaniche e comportamento del supporto ligneo in risposta alle variazioni termoigrometriche ambientali. L'obiettivo di tale procedura è fornire al restauratore uno strumento tecnico-scientifico che gli consenta di ricavare indicazioni quantitative sulle quali basare, congiuntamente alla sua esperienza e sensibilità, l'ottimale progettazione e regolazione del sistema molle-traverse, riferite ad uno specifico dipinto ed alle condizioni climatiche a cui esso è sottoposto.

Sono state pertanto definite metodologie e tecniche di indagine, e sviluppate le strumentazioni di monitoraggio atte a misurare con continuità sia le deformazioni e le forze esercitate nel tempo dalle molle, sia le deformazioni di traverse, tavolato e pittura, in relazione alle variazioni climatiche.

Queste apparecchiature sono state applicate ad un caso di studio: il dipinto su tavola *Deposizione dalla Croce* di Anonimo Abruzzese, XVI secolo. Quest'opera d'arte, il cui supporto è stato già sottoposto a restauro, è stata resa disponibile da OPD per un monitoraggio di circa due mesi. Sono state raccolte informazioni deformative e dinamometriche e sono state messe in relazione con temperatura e umidità relativa dell'aria della camera climatica in cui l'opera è stata collocata e sottoposta ad alcuni cicli climatici. A partire dai dati raccolti, attraverso una modellazione matematica, è stato possibile quantificare l'effetto delle traverse nel limitare la deformazione (di origine igroscopica) del supporto, e calcolare le conseguenti sollecitazioni cui il tavolato è sottoposto.

L'esempio applicativo della *Deposizione dalla Croce* mostra chiaramente il carattere innovativo di questa ricerca e svela un nuovo campo di cooperazione tra Restauratori e Ricercatori tecnologi del legno; cooperazione che lascia prevedere la possibilità di portare ad un significativo miglioramento e affinamento le tecniche già consolidate, ma non ancora sufficientemente approfondite, per il restauro dei supporti lignei di dipinti su tavola.

**Parole chiave:** *dipinti su tavola, beni culturali lignei, stati tensionali, fluttuazioni climatiche ambientali, deformazione, traversatura con molle, monitoraggio, restauro.*



## Abstract

This project was conducted in cooperation with the Opificio delle Pietre Dure (OPD - Florence), as one of the research activities concerning the restoration of the wooden support of panel paintings; it focuses on a particular technique consisting of the application of crossbars with springs as deformation limiters.

In the eighties, OPD designed and realized the crossbars with springs: the innovative aspect of such system is that it allows to prearrange and adjust the forces between the crossbars and the panel. Up to now the design of the crossbars with springs is based on the restorer's experience only and on his qualitative assessment of the conservation conditions of the panel, without any scientific support.

The present work provides guidelines for the design of crossbar with spring: a preliminary procedure is outlined for the detailed inspection of wooden supports, to provide information about their mechanical and hygroscopic properties, for each individual case inspected. This procedure aim to provide the restorer with a technical-scientific tool allowing him to work out quantitative information on which to base, together with his own experience and perception, an optimal design and setting of the crossbar-springs system, for each individual work of art, in its specific climatic conditions.

Methodologies, techniques and monitoring instrumentations have been designed and implemented, with the aim of continuously measuring both the deformations and forces of the springs, and the deformations of crossbars, wooden panel and painted layer, related to climatic variations.

These devices have been applied to a case study: *Deposizione dalla Croce* by Anonymous from the Abruzzi (XVI century). This already restored work of art has been made available by the OPD for a two months monitoring period; thus dynamometric and deformative measurements have been collected, together with air temperature and relative humidity of the test room in which the panel was kept and exposed to several climatic cycles.

The collected data have been processed through a finite-elements modelling; the action of the crossbars and of the springs were computed, thus providing 1) the reduction of the panel's deformation (produced by the variations of the climatic conditions), and 2) the corresponding stresses developed in the wooden support.

This case study of the *Deposizione dalla Croce* clearly shows the innovative character of this research and discloses a new field of cooperation between Restorers and Wood Scientists, which opens the way to a significant improvement and refinement of well-established, yet not sufficiently mastered techniques for the restoration of the wooden supports of panel paintings.

**Keywords:** *panel paintings, wooden cultural heritage, stress, environmental climatic fluctuations, deformation, crossbar with springs, monitoring, restoration.*



# INDICE

Introduzione	1
1. Cenni sulla tecnologia del legno	5
1.1. Relazioni legno-acqua	5
1.2. Comportamento reologico del legno	7
1.2.1. Anisotropia del comportamento meccanico	7
1.2.2. Sollecitazioni di breve durata	8
1.2.2.1. Flessione statica in direzione trasversale con carichi di breve durata	9
1.2.3. Sollecitazioni di lunga durata	10
1.3. Deformazioni dei supporti lignei	11
2. I dipinti su tavola	14
2.1. Tecniche costruttive dei supporti lignei	14
2.1.1. Il taglio e l'assemblaggio delle assi	14
2.1.2. Il sistema di traversatura	15
2.2. Tecniche di esecuzione dei dipinti su tavola	16
2.2.1. Preparazione del supporto per la tecnica a tempera	16
2.2.2. Il disegno, la doratura, la pittura a tempera e la verniciatura	17
2.3. Il degrado dei dipinti su tavola	17
2.3.1. Il degrado del supporto ligneo	17
2.3.2. Il degrado della pittura	18
2.4. Gli interventi di restauro dei supporti lignei nella storia recente	19
3. La traversatura con molle e le procedure di dimensionamento e valutazione	21
3.1. La traversatura con molle	21
3.2. La procedura di dimensionamento proposta	24
4. Caratterizzazione meccanica di un tavolato	27
4.1. La prova meccanica a flessione	27
4.1.1. Flessione di tavolato originale	29
4.1.2. Flessione di replica strutturale	30
5. Il monitoraggio e la valutazione della traversatura con molle	33
5.1. La metodologia di monitoraggio della traversatura con molle	33
5.2. Gli strumenti di monitoraggio della traversatura con molle	35
5.2.1. Il sistema di monitoraggio delle forze tra tavolato e traversa	35
5.2.1.1. Il principio costruttivo	35
5.2.1.2. Accorgimenti progettuali	35
5.2.1.3. Metodo di taratura adottato	36
5.2.1.4. Componenti del sistema	36
5.2.1.5. Modalità di funzionamento	36
5.2.2. Il sistema di monitoraggio delle deformazioni della traversa	37

5.2.2.1.	Il principio costruttivo	37
5.2.2.2.	Accorgimenti progettuali	37
5.2.2.3.	Componenti del sistema	37
5.3.	La metodologia di valutazione delle interazioni tra tavolato e pittura: un primo passo	65
5.3.1.	Il sistema di monitoraggio delle deformazioni del tavolato: il kit deformometrico	66
5.3.2.	Il sistema di monitoraggio delle deformazioni della pittura: la microprofilometria conoscopica a scansione	67
5.3.3.	Combinazione delle rilevazioni sul fronte e di quelle sul retro	68
6.	Caso di studio: procedura di valutazione della traversatura con molle del dipinto su tavola <i>Deposizione dalla Croce</i> di Anonimo Abruzzese XVI sec.	69
6.1.	Caratterizzazione meccanica delle traverse	73
6.2.	Caratterizzazione meccanica del tavolato originale	75
6.2.1.	Acquisizione dei dati	76
6.2.1.1.	Tavolato originale: flessione per tre punti lungo linee corrispondenti alle traverse	81
6.2.1.2.	Replica strutturale: flessione per tre punti lungo linee corrispondenti alle traverse	82
6.2.1.3.	Replica strutturale: flessione omogenea della lastra tramite due punti di ancoraggio e quattro appoggi	84
6.2.2.	Elaborazione dei dati tramite modellazione matematica	86
6.3.	Monitoraggio del comportamento del dipinto su tavola dopo il restauro in risposta alle variazioni di umidità	91
6.3.1.	Misura delle forze localizzate in corrispondenza delle molle	92
6.3.2.	Misura delle deformazioni delle traverse	103
6.3.3.	Misura delle deformazioni del tavolato in aree definite	107
6.3.4.	Misura delle deformazioni della pittura	111
6.4.	Elaborazione delle informazioni sul comportamento del dipinto su tavola in risposta alle variazioni di umidità	115
6.4.1.	Profilo della parte pittorica in ogni istante di interesse monitorato	115
6.4.2.	Sollecitazione e deformazione provocate dall'azione delle forze delle molle sul tavolato	116
6.4.3.	Tendenza al movimento del tavolato privo di sistema di traversatura	121
6.4.4.	Ripercussione dei movimenti del tavolato sui movimenti della pittura	123
6.5.	Valutazione della traversatura con molle adottata per la <i>Deposizione dalla Croce</i>	124
7.	Conclusioni e sviluppi futuri	127
	Bibliografia	129

# INTRODUZIONE

A partire dalla prima metà del Novecento con Gustavo Giovannoni (1873-1947), sino ai giorni nostri, alla figura del restauratore si affiancano con sempre maggiore frequenza professionalità tecnico-scientifiche, come concreto supporto per la realizzazione di un efficiente ed efficace restauro. I campi e le tematiche del restauro sono assai vasti e complessi e lentamente la scienza sta penetrando in modo capillare nei numerosi settori, come supporto all'abilità e all'esperienza di restauratori e conservatori.

Il presente lavoro di ricerca si propone come ponte tra il mondo del restauro e quello scientifico e si prefigge l'obiettivo di fornire un supporto tecnico-scientifico nel settore dei dipinti su tavola, e, più nello specifico, nel complesso campo dei sistemi di traversatura dei supporti lignei; il lavoro è stato svolto in stretta collaborazione con l'Opificio delle Pietre Dure (noto anche con la sigla OPD), Istituto autonomo del Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo (Segretariato generale), che opera nel campo del restauro delle opere d'arte con attività di ricerca scientifica, intervento diretto e didattica.

Come è noto, il legno è un materiale igroscopico, che ritira, rigonfia e cambia di geometria in risposta alle variazioni di umidità. Allo stesso modo le tavole dipinte sono naturalmente soggette a movimenti a causa dalle variazioni climatiche dell'ambiente. Nel corso della storia, artigiani e restauratori hanno sperimentato numerosi approcci ai supporti lignei, finalizzati al controllo e al contenimento dei movimenti, con l'obiettivo di preservare la pittura; d'altro canto però sistemi di traversatura di sostituzione alla traversatura originale molto rigidi e vincolanti hanno spesso indotto nel tempo dinamiche complesse nel tavolato, che si sono ripercosse con danni sulla pittura. Un radicale cambiamento nell'approccio si manifesta negli anni Ottanta con l'ideazione e lo sviluppo presso l'OPD di una particolare tipologia di sistema di traversatura, non più vincolante, non rigida, ma piuttosto elastica e regolabile: la traversatura con molle permette i movimenti del tavolato, ai quali risponde e si oppone con una forza regolabile in funzione delle necessità. Con l'introduzione di questo nuovo modello di traversa nell'ambito del restauro si assiste ad un radicale ribaltamento dei punti di vista: il tavolato non deve più essere vincolato, ma piuttosto deve essere lasciato libero di muoversi, affinché non siano indotte tensioni che potrebbero ripercuotersi in modo dannoso sulla pittura. Impiegando questo sistema si accetta quindi che entro certi limiti il tavolato ritiri, rigonfi e imbarchi, e il ruolo della traversa, oltre al dare robustezza alla composizione, diventa anche il fornire una forza di contrasto ai movimenti del tavolato che sia calibrata in funzione delle caratteristiche

dell'opera d'arte, dell'ambiente in cui essa è collocata e degli obiettivi di restauro. Un enorme passo avanti dunque: si introduce il concetto di *regolazione* delle forze esercitate sul tavolato in funzione delle *necessità* dell'opera.

Ma come si possono definire le *necessità* dell'opera? E una volta definite, quali caratteristiche deve avere la traversatura con molle affinché sia *regolato* in modo adeguato a queste necessità?

Queste due domande stanno alla base della progettazione della traversatura con molle. La definizione di quali siano le necessità di un'opera e quindi quali siano gli obiettivi di un restauro, è un lavoro che solo il restauratore può svolgere, servendosi di accurate ispezioni tecnologiche, supportate dalla propria esperienza e dalla letteratura; ad oggi non si dispone di supporti tecnico-scientifici in grado di supportare queste delicatissime scelte. Una volta definiti gli obiettivi che si vogliono raggiungere in un intervento di restauro che preveda l'impiego della traversatura con molle, è necessario realizzare il sistema di traversatura adeguato per le finalità prefisse. Il lavoro dello scientifico è dunque individuare i criteri secondo i quali dimensionare razionalmente il sistema di traversatura e produrre delle tecniche e degli strumenti che permettano di quantificare a priori e verificare a posteriori la relazione tra contributo di irrigidimento e caratteristiche costruttive di una traversatura elastica. Il presente lavoro di ricerca si propone pertanto di impostare e delineare delle conoscenze e delle procedure per effettuare un dimensionamento razionale della traversatura con molle.

### *La struttura del presente lavoro di tesi*

Dopo una rapida panoramica circa i dipinti su tavola e i sistemi di traversatura e alcuni cenni circa le caratteristiche tecnologiche del legno pertinenti, si descrivono le modalità deformative dei supporti lignei e gli effetti sulla pittura.

L'obiettivo di questa prima parte della tesi è fornire al lettore informazioni sufficienti per comprendere la stretta relazione del dipinto su tavola con il clima dell'ambiente circostante e il ruolo fondamentale di mediazione che hanno le traverse di cui il supporto è dotato: le traverse infatti, in caso di importanti variazioni climatiche possono indurre situazioni dannose nel supporto e nella pittura, qualora siano eccessivamente rigide; qualora invece siano elastiche e calibrate in modo razionale possono assecondare il movimento del supporto e preservare l'opera. L'impiego di una traversatura rigida o elastica può fare la differenza tra un dipinto conservato in buone condizioni e uno drammaticamente rovinato.

Nella seconda parte del presente scritto si descrive il lavoro di ricerca svolto. Si fornisce una dettagliata descrizione della classica modalità costruttiva della traversatura con molle, sottolineandone la grande versatilità in funzione delle necessità, e mettendo in evidenza quali sono state sino ad oggi le incognite e i punti carenti, ovvero le tematiche sulle quali il presente lavoro di ricerca si è concentrato, al fine di ottimizzarne le prestazioni.

Si procede dunque con la descrizione degli specifici obiettivi prefissi e con l'illustrazione del metodo sviluppato e della procedura adottata, nell'ottica di cominciare a colmare quelle lacune tecniche che i restauratori stessi percepiscono: si propongono le basi di un metodo per la quantificazione e la valutazione dell'effetto della traversatura con molle sul tavolato, con l'obiettivo di giungere 1) ad un dimensionamento ad hoc a priori e 2) ad una

valutazione tecnica a posteriori, in funzione delle esigenze specifiche delle singole opere; beninteso, opere sulle quali sia indispensabile intervenire.

Si descrivono quindi le tappe di indagine scientifica sul dipinto originale, in successione e con fasi talora diverse a seconda che si tratti di un dimensionamento a priori oppure di una valutazione a posteriori:

### PROCEDURA DI DIMENSIONAMENTO DELLA TRAVERSATURA CON MOLLE

- Definizione degli obiettivi
- Caratterizzazione meccanica del tavolato (tramite prove a flessione)
- Progettazione del sistema di traversatura (tramite modellazione matematica)
- Monitoraggio del comportamento (forze e deformazioni) del dipinto su tavola (supporto e pittura) e delle traverse in risposta alle variazioni di umidità ambientale
- Valutazione del sistema tavolato/traverse e eventuale correzione

### PROCEDURA DI VALUTAZIONE DELLA TRAVERSATURA CON MOLLE

- Definizione degli obiettivi
- Caratterizzazione meccanica del tavolato (tramite prove a flessione)
- Monitoraggio del comportamento (forze e deformazioni) del dipinto su tavola (supporto e pittura) e delle traverse in risposta alle variazioni di umidità ambientale
- Valutazione del sistema tavolato/traverse e eventuale correzione (tramite modellazione matematica)

In una terza parte della tesi si riporta il caso di studio *Deposizione dalla Croce*, di Anonimo Abruzzese del XXVI sec., dipinto su tavola già restaurato con traversatura con molle e disponibile presso OPD. Tale esempio applicativo permette di mettere a fuoco con chiarezza quali siano l'utilità e l'innovazione della presente ricerca, che non ha la pretesa di essere esaustiva circa un argomento assai ampio, ma che piuttosto ha inteso aprire un percorso di comunicazione relativamente alla traversatura con molle, tra mondo del restauro e mondo scientifico, al fine di migliorare le tecniche di intervento sui supporti lignei dei dipinti su tavola.

Il presente lavoro di ricerca ha visto una costante e costruttiva collaborazione tra l'Università di Firenze, dipartimento GESAAF, e l'Opificio delle Pietre Dure di Firenze, settore Dipinti su tavola; per una specifica indagine che ha interessato la parte pittorica della "Deposizione dalla Croce" il dipartimento GESAAF si è anche avvalso della strumentazione e della collaborazione dell'Istituto Nazionale di Ottica, afferente al CNR.



# 1. CENNI SULLA TECNOLOGIA DEL LEGNO

Le problematiche nell'ambito della conservazione delle opere lignee sono spesso strettamente connesse ai movimenti del legno in quanto supporto per la pittura. Tali movimenti derivano da proprietà intrinseche del materiale e dalle sue relazioni con l'ambiente. Il tentativo di immobilizzare completamente un dipinto su tavola è stato effettuato in occasione di alcuni restauri novecenteschi che hanno adottato il sistema della parchettatura [1], spesso associato ad un drastico assottigliamento del supporto, con il risultato di alterare irreversibilmente l'aspetto originale dell'opera e di provocare spesso ingenti danni alla pittura. Bloccare il movimento del legno si è dimostrata con il tempo essere una pratica dannosa, perciò negli ultimi anni i restauratori sono approdati ad una filosofia opposta, che vede il sistema di traversatura non come un metodo per limitare il più possibile i movimenti, ma piuttosto come uno strumento per consentire entro certi limiti i movimenti naturali di un tavolato, mantenendo l'unità strutturale del supporto.

Al fine di comprendere appieno le dinamiche che sono alla base dei movimenti di un tavolato e dell'eventuale verificarsi di danni al supporto o alla parte pittorica, è opportuno conoscere il comportamento del legno in relazione all'umidità e in risposta a sollecitazioni. Nel presente capitolo si intende fornire pertanto nozioni circa le dinamiche igroscopiche, meccaniche e reologiche del legno.

## 1.1. RELAZIONI LEGNO-ACQUA

Il legno è un materiale *igroscopico*, ovvero ha la capacità di scambiare la propria acqua di saturazione con l'atmosfera circostante: tende perciò ad equilibrarsi con l'umidità relativa dell'aria. Questa affinità determina molte delle peculiarità tecnologiche che distinguono il legno dagli altri materiali; è opportuno quindi considerare il “sistema legno-acqua” piuttosto che limitarsi alla trattazione del singolo costituente legno.

L'acqua può essere presente nel legno in forma di vapore che interagisce con la parete cellulare o in forma liquida che scorre nei lumi cellulari: soltanto la prima influenza significativamente le proprietà del legname. Il contenuto d'acqua del legno viene espresso come rapporto della differenza del peso del legno umido e del legno assolutamente secco, con il peso di legno secco:

$$U = (M_u - M_s) / M_s \quad .1.1$$

Il valore del contenuto di umidità del legno può quindi essere superiore al 100% qualora almeno metà del peso del campione sia dovuto all'acqua in esso contenuta.

L'acqua è presente nel legno in tre forme principali: libera, di costituzione e legata. Quest'ultima si trova all'interno della parete cellulare: dipende fundamentalmente dall'umidità relativa dell'aria e si lega con legami a idrogeno ai radicali ossidrilici liberi disponibili prevalentemente nelle zone amorfe delle microfibrille di cellulosa delle pareti cellulari; nel punto di saturazione (pari ad una umidità del legno di circa 30%) si individua la soglia al di sotto della quale il legno comincia a presentare sensibili variazioni nelle sue proprietà fisico-meccaniche in funzione delle variazioni dell'umidità ambientale. Le deformazioni pertanto insorgono quando l'umidità scende al di sotto del punto di saturazione delle pareti cellulari e tale valore è limitato e definito dal numero di gruppi – OH disponibili sulle microfibrille [2].

Il movimento dell'acqua all'interno del legno è governato dal principio generale che essa si muove con velocità finita, con la tendenza a fluire più o meno rapidamente dalle zone più umide a quelle meno umide. Il gradiente di umidità si definisce come il rapporto tra la differenza delle umidità del legno misurate su due punti e la loro distanza, esprimendo la variazione di umidità del legno per unità di lunghezza.

Il tempo necessario perché si verifichi l'equilibramento igroscopico dipende dalla superficie specifica libera per lo scambio di umidità tra l'oggetto in legno e l'ambiente. Il processo di equilibramento igroscopico del legno in seguito a variazioni di umidità si sviluppa secondo gradienti di umidità attraverso lo spessore (le zone più superficiali sono le prime a raggiungere la condizione di equilibrio, rispetto a quelle più interne), che tenderanno ad azzerarsi dopo un tempo sufficientemente lungo se le condizioni ambientali rimangono costanti; nel caso in cui invece l'umidità relativa vari continuamente, il legno non avrà mai il tempo di raggiungere il totale equilibrio igroscopico: gli strati superficiali seguono le variazioni più velocemente rispetto alle zone interne, il che comporta un andamento complesso e variabile nel tempo dei gradienti di umidità, con conseguenti tensioni interne e tendenze a distorsioni. Questo secondo caso è rappresentativo della dinamica maggiormente diffusa nelle opere lignee conservate in ambienti museali, il cui clima risente delle variazioni termoigrometriche sia stagionali che giornaliere.

I movimenti dell'acqua all'interno del legno incidono macroscopicamente su questo ultimo, comportando variazioni dimensionali: l'ingombro stesso della molecola di acqua implica, a seguito dei fenomeni di equilibramento igroscopico, un ritiro o un rigonfiamento. L'inclinazione delle microfibrille rispetto all'asse longitudinale contribuisce all'anisotropia del legno, facendo sì che la direzione trasversale sia la più interessata dal ritiro/rigonfiamento, rispetto a quella longitudinale: il ritiro longitudinale è tipicamente compreso tra 0,2-0,8% , il ritiro radiale è tipicamente compreso tra 3% e 6%, il ritiro tangenziale infine è tipicamente compreso tra 6% e 12%.

La diversa entità dei ritiri/rigonfiamenti nelle tre direzioni fondamentali impedisce il mantenimento di una forma geometrica simile a se stessa e provoca l'insorgere di *deformazioni*. Particolarmente importante è l'orientamento degli anelli di accrescimento all'interno della sezione trasversale, dato che questi determinano la deformazione della sezione trasversale; l'*imbarcamento* di una tavola non radiale è determinato dalla differenza di ritiro, in sezione trasversale, tra le due facce: la faccia esterna, più lontana dal midollo, essendo "più tangenziale" si ritira maggiormente rispetto a quella interna [3].

## 1.2. COMPORTAMENTO REOLOGICO DEL LEGNO

La reologia è la scienza che studia gli equilibri raggiunti nella materia deformata per effetto di sollecitazioni esterne. Nel legno la risposta deformativa varia in funzione dell'entità del carico a cui è sottoposto e della durata di applicazione. Nel caso di carichi di breve durata, si possono osservare comportamenti *elastici* o *plastici*, in funzione dell'entità del carico: nel campo elastico all'aumentare del carico aumenta la deformazione con una proporzionalità lineare; per sollecitazioni gradualmente maggiori, si assiste ad una variazione di pendenza della curva deformativa, che indica l'ingresso nel campo plastico, fino a rottura. Qualora il limite di elasticità non sia superato e il carico venga annullato, non si avranno deformazioni residue; se invece questo limite è superato, si manterrà la deformazione plastica nell'oggetto ligneo anche dopo l'eliminazione del carico.

A sollecitazioni di lungo periodo, il legno risponde con un comportamento *viscoso*, caratterizzato dallo *scorrimento* delle catene di cellulosa le une sulle altre, che si traduce in un progressivo aumento delle deformazioni nel tempo, che sarà maggiore quanto più sono elevate umidità e temperatura. Associato allo scorrimento è il *rilassamento*, fenomeno secondo il quale si ha una diminuzione della tensione nell'oggetto sottoposto a deformazione; il risultato di questo fenomeno nel legno è l'acquisizione di una deformazione residua dovuta essenzialmente all'azione del carico prolungata nel tempo, anche se esso non ha mai superato il limite di elasticità.

Si completa il quadro reologico con il comportamento *meccano-sorbitivo* che si manifesta quando il legno, sollecitato meccanicamente, subisce variazioni delle condizioni termoigrometriche: le deformazioni risultano significativamente maggiori e si ha rottura per carichi minori, rispetto allo stesso oggetto sottoposto alla stessa sollecitazione, ma in condizioni climatiche costanti.

### 1.2.1. ANISOTROPIA DEL COMPORTAMENTO MECCANICO

L'anisotropia del comportamento meccanico del legno è la manifestazione macroscopica della struttura molecolare e dell'organizzazione cellulare dello stesso. A livello molecolare le catene di cellulosa sono legate trasversalmente le une alle altre tramite ponti a idrogeno ed organizzate in microfibrille; a causa della differenza delle energie di legame nelle diverse direzioni (legame a idrogeno tra catene parallele e 1-4,βglicosidico lungo la catena) si manifesta una risposta anisotropa alle sollecitazioni meccaniche: a seconda che queste siano parallele o trasversali rispetto all'asse principale della fibratura si avrà una resistenza rispettivamente maggiore o minore. A livello cellulare inoltre le proprietà meccaniche derivano dall'orientamento delle microfibrille dello strato  $S_2$  parallelo all'asse longitudinale.

Entrambi questi contributi provocano una grande resistenza longitudinale alle sollecitazioni meccaniche (trazione/compressione) e alle variazioni dimensionali di origine igroscopica, a fronte di una minore resistenza trasversale a sollecitazioni di ogni natura.

Si osserva pertanto come il comportamento meccanico del tessuto legnoso rimanga coerente con quello delle singole cellule, la cui disposizione determina la direzione della *fibratura*; eventuali deviazioni di fibratura possono determinare anomalie nei comportamenti deformativi dei segati, quali *arcatura*, *falcatura* e *svergolamento*.

### 1.2.2. SOLLECITAZIONI DI BREVE DURATA

Le sollecitazioni di breve durata inducono nel materiale una deformazione esclusivamente causata dall'entità del carico e non dalla durata di applicazione del carico stesso. In funzione dell'entità del carico dunque, tali sollecitazioni possono provocare nell'oggetto ligneo una risposta elastica o plastica. All'interno del campo elastico, qualunque forza applicata ad un corpo può essere scomposta in una combinazione di *forze normali* e *forze di taglio*.

Le deformazioni ( $\Delta l$ ) che un corpo ligneo di lunghezza  $l$  subisce per azione di una forza  $P$  normale alla sezione  $A$  possono essere espresse dalla relazione:

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta l}{l} = k\sigma_n \quad .1.2$$

dove  $k$  è una costante specifica dell'oggetto sottoposto a sforzo e  $\sigma_n$  è la sollecitazione data da  $P/A$  [N/mm<sup>2</sup>]. Tale relazione esprime la legge di Hooke, che descrive una proporzionalità lineare tra deformazioni e *forze normali* applicate. Il valore di  $k$  esprime la deformazione elastica per unità di lunghezza e per unità di forza applicata ad ogni unità di sezione; l'inversa di  $k$  definisce il modulo di elasticità o *modulo di Young*  $E$  [N/mm<sup>2</sup>]:

$$E = \frac{\sigma_n}{\varepsilon_n} \quad .1.3$$

Qualora la forza applicata non sia normale alla superficie, bensì sia esercitata parallelamente alla sezione sollecitata, si parla di *forza di taglio*, e la deformazione corrispondente è la deformazione di taglio; la sollecitazione di taglio  $\sigma_t$  (data dal rapporto tra la forza di taglio  $F$  e la superficie  $A$ ) e la deformazione di taglio  $\gamma_t$  (data dal rapporto tra lo spostamento  $\Delta u$  e la lunghezza  $x$  della superficie sollecitata) sono legate proporzionalmente dalla costante di proporzionalità  $G$  [N/mm<sup>2</sup>] specifica dell'oggetto sottoposto a sforzo, chiamata *modulo di rigidezza*:

$$G = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \quad .1.4$$

Nella descrizione del comportamento deformativo di un oggetto sollecitato, nei casi sopra descritti si prende in considerazione la sola deformazione uniassiale, che si verifica nella stessa direzione della forza applicata. In realtà consistentemente con la deformazione in direzione parallela al carico (*deformazione attiva*  $\varepsilon_1$ ), si verifica anche una deformazione in direzione perpendicolare al carico (*deformazione passiva*  $\varepsilon_2$ ) che si sviluppa con verso opposto alla prima: qualora la deformazione attiva sia un allungamento, la deformazione passiva sarà una contrazione, e vice versa. Il rapporto di queste due deformazioni è costante e caratteristico dell'oggetto sollecitato e definisce il *coefficiente di Poisson*  $\nu_{12}$  [N/mm<sup>2</sup>]:

$$\nu_{12} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad .1.5$$

All'aumentare del carico applicato, le deformazioni cessano di essere elastiche, diventando plastiche e permanenti, fino a raggiungere la rottura, definita da una sollecitazione per unità di superficie che corrisponde al *carico di rottura*.

All'interno del campo elastico stesso si verificano delle deformazioni permanenti di entità talmente piccola da potersi considerare trascurabile; tali deformazioni però si manifestano in modo macroscopico in seguito a sollecitazioni di breve durata ripetute un grande numero di volte (contenute entro il limite elastico), ovvero quando l'oggetto ligneo è sottoposto a *fatica*.

### 1.2.2.1 Flessione statica in direzione trasversale con carichi di breve durata

Ai fini del presente lavoro si dedica un approfondimento dedicato alla descrizione del comportamento di una trave sottoposta a flessione statica. Un corpo è soggetto ad uno sforzo di flessione quando, per effetto dei carichi e dei vincoli cui è sottoposto, reagisce generando un momento flettente che provoca l'incurvatura dell'oggetto stesso. La freccia di inflessione è il parametro che si sceglie per caratterizzare il comportamento di una trave sotto carico. Il rapporto tra la lunghezza  $L$  della trave sottoposta a flessione e la freccia di inflessione  $f$  indica la rigidità, che evidentemente per una data trave cresce al diminuire della freccia.

Si definisce il modulo di elasticità  $[N/mm^2]$  di una trave sottoposta a flessione:

$$E_m = \frac{l^3(F_2 - F_1)}{4bt^3(a_2 - a_1)} \quad .1.6$$

Dove:	$l$	è la distanza tra i centri degli appoggi [mm]
	$b$	è la larghezza del provino [mm]
	$t$	è lo spessore del provino [mm]
	$F_2 - F_1$	è l'incremento di carico nel tratto rettilineo della curva carico-deformazione [N]
	$a_2 - a_1$	è l'incremento della freccia del provino

Portando a rottura una trave se ne definisce inoltre la resistenza a flessione  $[N/mm^2]$ :

$$f_m = \frac{3F_{max}l}{2bt^2} \quad .1.7$$

Dove:	$F_{max}$	è il carico massimo [N]
	$l, b, t$	come definiti nella 1.6

I valori di modulo elastico e di resistenza a flessione dipendono fondamentalmente dall'anisotropia del legno, dalla sua umidità e dalla temperatura. Si osserva una differenza di resistenza a flessione se lo sforzo è disposto tangenzialmente o radialmente rispetto agli

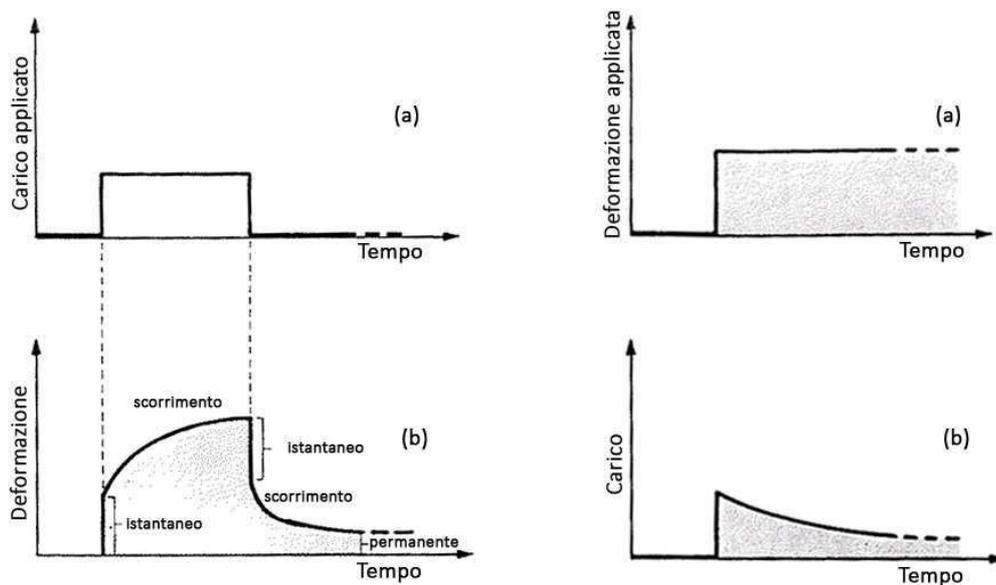
anelli: nello specifico,  $f_m$  è maggiore nel primo caso; nella pratica però, avendo a che fare con travi o lastre, non si avranno mai sollecitazioni esclusivamente radiali o tangenziali. L'umidità incide sulla resistenza a flessione, facendola diminuire al suo aumento, secondo una relazione lineare all'interno dei range 5-8% e 15-20%. Anche per la temperatura è valida la relazione secondo cui al suo aumento, la resistenza a flessione diminuisce [4].

### 1.2.3. SOLLECITAZIONI DI LUNGA DURATA

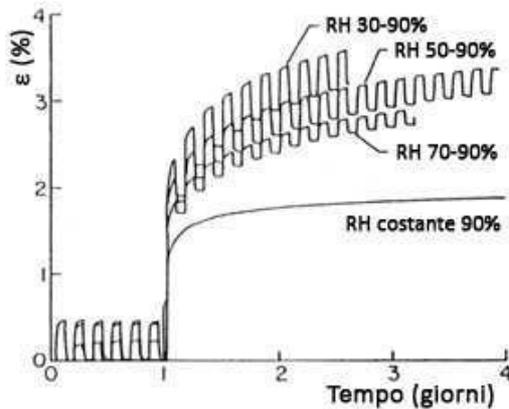
Nel legno, come nella maggior parte dei materiali, il contributo della durata del carico incide significativamente sulla risposta deformativa dell'oggetto studiato. Il comportamento deformativo del legno in risposta a carichi costanti di lunga durata è illustrato nell'immagine 1.1 ed è definito *viscoelastico* (*creep*, in inglese).

Descrivendo l'andamento mostrato nell'immagine 1.1 a sinistra, ad un carico imposto corrisponde una deformazione istantanea, che tende ad aumentare, in concomitanza con il mantenimento del carico costante nel tempo; tale aumento di deformazione è la manifestazione del fenomeno di *scorrimento*. In seguito alla rimozione del carico si assiste ad un recupero istantaneo della deformazione, cui segue un graduale recupero nel tempo fino ad una stabilizzazione che mantiene una deformazione permanente.

Associato al comportamento deformativo viscoso, si osserva una diminuzione delle tensioni nel tempo che prende il nome di *rilassamento*, il cui andamento è descritto nell'immagine 1.1, a destra: a parità di deformazione imposta, nel tempo si verifica una riorganizzazione interna delle fibre che comporta una diminuzione delle tensioni e pertanto del carico stesso. Se si associa ad un carico di lunga durata una variazione di umidità, si verifica una deformazione *meccano-sorbitiva*, risultato dell'interazione della componente igrometrica che induce una variazione dimensionale, con la componente reologica che provoca una deformazione viscosa.



**Immagine 1.1.** A sinistra è rappresentato il fenomeno di *scorrimento*, descritto dai due grafici: a) carico applicato/tempo e b) deformazione/tempo; a destra è rappresentato il fenomeno dello *rilassamento*, descritto dai due grafici: a) deformazione applicata/tempo e b) carico/tempo [2].



**Immagine 1.2.** Fenomeno meccano-sorbitivo descritto dalle curve di deformazione risultanti da cicli di umidità relativa (RH) a diversi valori di RH minima, in paragone con la deformazione ad umidità costante [2].

Si tratta di un fenomeno complesso in cui l'entità della deformazione varia in funzione del ciclo igrometrico applicato: in adsorbimento si registrerà un incremento della deformazione maggiore, mentre in desorbimento una diminuzione. Nell'immagine 1.2 si descrivono schematicamente queste deformazioni.

### 1.3. DEFORMAZIONI DEI SUPPORTI LIGNEI

Le dinamiche che incidono sulle deformazioni dei supporti lignei sono piuttosto complesse e articolate: più cause possono concorrere al verificarsi di una deformazione e diverse sono le tipologie di deformazione che possono essere indotte. Si è visto nei due paragrafi precedenti come possono incidere sulla forma del legno la variazione dell'umidità combinata con l'azione di carichi e vincoli esterni. Per analizzare il comportamento di un tavolato composto da più tavole vincolate le une alle altre tramite incollaggi lungo i bordi e/o traverse, è fondamentale distinguere i singoli contributi deformativi e individuare dei criteri di classificazione delle deformazioni che tengano conto sia del comportamento igroscopico, che di quello reologico. In accordo con Uzielli [5], si propone una classificazione secondo tre criteri fondamentali:

- 1) Causa immediata: la deformazione può essere provocata da una *sollecitazione meccanica* esterna, come l'applicazione di una forza per spianare un tavolato (es. azione delle traverse); oppure può essere indotta da una *variazione igroscopica* che provoca un effetto di ritiro/rigonfiamento sui singoli elementi; infine può essere generata dall'*interazione* tra i vari elementi che compongono il tavolato come conseguenza di singole variazioni igroscopiche.
- 2) Dipendenza da gradienti di umidità: in funzione del gradiente di umidità che si va a formare lungo la sezione del tavolato possono verificarsi deformazioni *a regime* (in assenza di gradienti, cioè quando il legno presenta una umidità uniforme secondo lo spessore), oppure deformazioni *transitorie* (qualora sia presente un gradiente di umidità lungo lo spessore).
- 3) Reversibilità: qualora un movimento sia provocato (da sollecitazione o umidità) o vincolato, la deformazione da esso scaturita può essere *elastica* (quindi istantaneamente reversibile), *viscosa* (recuperabile o parzialmente recuperabile nel tempo) o *permanente* (non reversibile).

La classificazione dei tre criteri di deformazione sopra descritta intende distinguere fattori che spesso sono strettamente connessi tra loro e concorrono insieme al risultato deformativo di un tavolato. La reversibilità di una deformazione è strettamente connessa alla libertà di movimento che viene concessa ad un tavolato in occasione di variazioni termoigrometriche ambientali: carichi o vincoli, interni o esterni, svolgono un ruolo di contrasto al movimento indotto dal gradiente di umidità e impediscono la libera deformazione (molto più accentuata in direzione trasversale piuttosto che in longitudinale), provocando nel legno uno stato tensionale interno che può indurre a deformazioni permanenti od anche a rottura. Elementi che possono agire da vincoli in un supporto ligneo sono gli incollaggi tra le tavole, gli incastri, i chiodi, gli ancoraggi, le traverse, le cornici... cioè tutti quegli elementi che tengono insieme il tavolato e che impongono (in modalità e entità variabile, in funzione della loro fattura) che la deformazione delle singole tavole sia congruente. Analizzando in sequenza la dinamica del processo di deformazione di un tavolato si individua la causa prima del movimento del supporto ligneo nelle variazioni di umidità ambientale: nel tavolato si formano variazioni e/o gradienti di umidità che darebbero naturalmente luogo a ritiri, rigonfiamenti e imbarcamenti. Queste deformazioni possono essere impedito in parte o del tutto da vincoli (esterni e/o interni): tale opposizione al movimento provoca l'insorgere di tensioni interne con possibile formazione di deformazioni permanenti. La deformazione più ampiamente riscontrata nei dipinti su tavola è l'imbarcamento del tavolato con la convessità verso la faccia dipinta. Si possono schematicamente distinguere le diverse cause di imbarcamento in funzione di: *anisotropia*, *asimmetria meccanica*, *asimmetria igroscopica* e *deformazioni permanenti* del tavolato; tali fattori possono intervenire sia separatamente sia congiuntamente e non sempre è facile individuarli singolarmente.

L'imbarcamento dovuto all'*anisotropia* del legno è inteso come deformazione a regime ed è proprio delle tavole tangenziali e subtangenziali, a causa della differenza di ritiro tra le direzioni tangenziale e radiale; questa differenza fa sì che in caso di diminuzione di umidità la convessità della tavola sia rivolta verso il midollo.

Per *asimmetria meccanica* si intende la diversa rigidità meccanica presente tra il retro e il fronte della tavola: il fronte è rivestito dalla preparazione pittorica a gesso e colla che penetra negli strati superficiali del legno e svolge una funzione di irrigidimento. Una diretta conseguenza di questo irrigidimento è la tendenza della faccia dipinta a divenire, a regime, convessa in risposta a diminuzione di umidità, concava in risposta ad un aumento di umidità.

La preparazione e gli strati pittorici, oltre che fornire un irrigidimento superficiale hanno un effetto di impermeabilizzazione di una superficie del tavolato: questo comporta una *asimmetria igroscopica* con conseguente insorgere di gradienti di umidità lungo lo spessore del legno, al variare dell'umidità ambientale. Tali gradienti producono deformazioni transitorie, la cui rilevanza dipende dall'entità del gradiente stesso, e dalla rapidità con cui varia l'umidità ambientale. L'associazione dei due fenomeni di asimmetria igroscopica e asimmetria meccanica può comportare l'insorgere di imbarcamento dovuto a *deformazioni permanenti* causate da un effetto di contenimento esercitato dagli strati non rigonfiati presso il fronte della tavola che vincolano il rigonfiamento del legno più umido [6]: tale effetto viene correntemente denominato *compression set*, anche se ricerche attualmente in corso sembrano evidenziare meccanismi diversi e più complessi [7].

## 2. I DIPINTI SU TAVOLA

I dipinti su tavola costituiscono una sezione importante della produzione artistica italiana: si individuano i primi esempi di pittura su tavola lignea nelle icone romane; nel Medioevo poi si assiste all'affermazione di questa modalità artistica, che giunge al massimo sviluppo nel Rinascimento.

### 2.1. TECNICHE COSTRUTTIVE DEI SUPPORTI LIGNEI

Fin dal Medioevo si assiste ad una organizzazione ben precisa del lavoro di realizzazione delle tavole lignee, con regole rigide per la costruzione dei manufatti, dettate dalle *Corporazioni delle Arti*, ossia associazioni di artigiani e professionisti divise in *Arti Maggiori* e *Arti Minori*.

Dal momento che il tavolato del supporto è, nei polittici italiani (ma soprattutto toscani), la struttura portante e la base sia degli strati preparatori alla stesura pittorica, sia degli elementi architettonici e decorativi, risulta di grande importanza effettuare ogni passaggio costruttivo con l'obiettivo di ottimizzare la stabilità di tale struttura.

L'attenzione è rivolta in primis alla *scelta del legno*: la disponibilità locale condiziona fortemente gli artisti, tanto che spesso è la tecnica pittorica ad adattarsi al tipo di supporto utilizzato. I fiamminghi impiegavano il rovere, legno duro, sul quale utilizzavano una preparazione sottilissima sulle porosità del legno, quasi una rasatura di stucco. In Italia e Spagna veniva utilizzato principalmente il Gattice (*Populus Alba* L.) [8], selezionato in quanto specie legnosa molto diffusa, oltre che per le sue caratteristiche fisiche: il legno poroso, privo di tannini, presenta un colore molto chiaro, è leggero e facilmente lavorabile.

#### 2.1.1. IL TAGLIO E L'ASSEMBLAGGIO DELLE ASSI

La lavorazione del legno "a regola d'arte" comincia dal taglio: la pianta era abbattuta in autunno –quando si interrompe il ciclo vegetativo–, il tronco era tagliato in assi longitudinalmente e, in seguito, sottoposto ad una lunga stagionatura. Si ottenevano tavole di diversa qualità: le tipologie di tavole che assicuravano una maggiore stabilità al supporto erano, coerentemente con l'anisotropia dei ritiri, le tavole radiali e sub-radiali le

quali, una volta in opera, rispondono al variare dell'umidità ambientale con il minimo imbarcamento, qualità che conduce alla massima stabilità del supporto e quindi dello strato pittorico.

Le assi erano refilate longitudinalmente per ottenere dei bordi diritti e facilitarne l'incollaggio; tale refilatura spesso non era parallela: è frequente infatti trovare tavole rastremate, con le rastremazioni disposte con verso opposto. Le tavole venivano poi lavorate in funzione dei metodi di assemblaggio e incastro desiderati: nel XII sec. le tavole erano assemblate semplicemente incollando i giunti vivi, in seguito si sviluppano metodi per garantire la complanarità e l'allineamento delle assi durante il montaggio. A partire dal XIII-XIV sec. si riscontra l'impiego di *perni ciechi* o *ranghette* con sezione poligonale o circolare, inseriti nello spessore delle assi adiacenti; in seguito, associato alla funzione di allineamento, si introduce talvolta anche un contributo di resistenza meccanica in corrispondenza dei giunti, attraverso le *doppie code di rondine*, tasselli di legno più duro, con fibratura orientata perpendicolarmente a quella delle assi, incassati in corrispondenza della commettitura nel retro della tavola, o sul fronte, al di sotto della preparazione.

Così come il taglio, anche l'orientamento delle tavole era scelto tenendo ben presente l'anisotropia del legno: molto spesso si sceglieva, come superficie da dipingere, la faccia più vicina al midollo (la faccia "interna", ovvero la meno tangenziale) proprio perché meno soggetta a ritiri e rigonfiamenti causati dalle variazioni di umidità ambientale, rispetto a quella "esterna" [9].

### 2.1.2. IL SISTEMA DI TRAVERSATURA

Una volta assemblate le tavole si applicava un sistema di traversatura, con funzione di rinforzo e sostegno: in base al territorio e alla scuola, variava la tipologia di legno impiegata nelle traverse e il loro spessore; generalmente comunque la modalità costruttiva delle traverse era volta ad ottenere una maggior rigidità del sistema di traversatura, rispetto al tavolato. Questa maggior rigidità deriva principalmente da due fattori: la maggior sezione della traversa rispetto a quella del tavolato, e la direzione longitudinale della traversa corrispondente a quella trasversale del tavolato. In Italia il legno solitamente utilizzato per le traverse era quercia, abete, o castagno (grazie alla forma regolare dei fusti ed alla ottima durabilità del durame) [8].

Le funzioni primarie del sistema di traversatura sono le seguenti:

- mantenere la planarità del tavolato
- garantire l'integrità del dipinto in caso di sconessioni e rotture nel supporto
- distribuire su tutta l'opera le forze localizzate dovute agli ancoraggi e agli elementi di appoggio
- limitare le deformazioni del tavolato dovute all'interazione del materiale ligneo e l'umidità dell'ambiente

La traversatura, le cui dimensioni dipendono inevitabilmente dal supporto su cui questa è applicata, è quindi da sempre stata concepita e realizzata per controllare e contenere le deformazioni che possono compromettere o alterare la leggibilità della pittura, sia che si realizzino sul piano del tavolato (ritiro/rigonfiamento lineare del legno) sia fuori dal piano (imbarcamento, dovuto all'anisotropia dei ritiri e/o alla presenza di gradienti).

Il sistema di traversatura poteva essere ancorato al supporto con svariati metodi, che sono mutati nel tempo: molto in generale si distinguono *sistemi di traversatura fissi* e *scorrevoli*.

Il fissaggio della traversa tramite chiodi è sicuramente il metodo più antico e vede l'inserimento di questi dal fronte della tavola grezza e il ripiegamento della punta sulla traversa; la testa del chiodo talvolta era protetta da dischi di tela, pergamena, cera o fogli di stagno, oppure era incassata nel tavolato e ricoperta con un tassello dello stesso legno del tavolato. Questo sistema di traversatura è generalmente classificato come fisso, ma l'ancoraggio ha diverse caratteristiche in funzione delle direzioni: l'allontanamento tra traversa e tavolato è effettivamente rigidamente impedito, per la sostanziale impossibilità di sfilare il chiodo ribattuto; d'altra parte, a causa del rifollamento del legno sotto la pressione laterale esercitata dal chiodo, è consentito un certo limitato movimento di scorrimento relativo nel piano, tra traversa e tavolato, secondo la direzione della traversa. Durante il Quattrocento si assiste al graduale abbandono della traversa fissa, a favore di una traversa scorrevole, ampiamente impiegata poi nel XVI secolo. Le metodologie adottate per realizzare una traversa scorrevole sono assai varie, ciascuna con differenti effetti sul tavolato. Uno dei primissimi esempi di traversa scorrevole lo si riscontra nella *Pala di San Marco* del Beato Angelico (1438), dove le traverse sono collegate alle tavole tramite un sistema di perni agganciati a dei cilindretti metallici ciechi –in sostituzione dei cavicchi o delle ranghette– inseriti all'interno del tavolato, attraversanti perpendicolarmente le committiture e accessibili tramite scassi rettangolari. In questo caso il tipo di controllo delle deformazioni è puntiforme, ed è esercitato in corrispondenza delle committiture fra le singole tavole. Nella *Santa Felicità e figli*, Neri di Bicci (1464) impiega una metodologia leggermente diversa: dei perni metallici inseriti dal fronte, dove sono realizzati degli scassi successivamente tassellati, attraversano lo spessore del tavolato e trattengono le traverse tramite zeppe inserite in occhielli posti all'estremità dei perni [3].

Da un punto di vista conservativo le due tipologie sopra descritte presentano delle differenze: il secondo sistema presenta dei rischi dovuti alla diversa dilatazione termica dell'elemento metallico posto sotto gli strati preparatori che possono essere forzati da dietro; questo può portare al danneggiamento dello strato pittorico, fino all'affioramento degli elementi metallici stessi. Ad ogni modo entrambi i sistemi presentano, rispetto al trecentesco metodo dell'inchiodatura, il grande vantaggio di permettere una notevole libertà di movimento del tavolato nel piano e la possibilità di asportare facilmente le traverse e intervenire con praticità sul meccanismo (eventuali sostituzioni di elementi...). Sempre secondo il concetto di permettere il movimento nel piano e limitare invece quello fuori dal piano, si assiste ad un'ulteriore evoluzione del meccanismo con lo sviluppo del sistema a *ponticello*, riscontrato in opere di artisti attivi nella seconda metà del Quattrocento, quali Scheggia, Domenico di Michelino, Botticelli e Filippino Lippi: sul tavolato sono inchiodate delle fasce metalliche modellate a ponte, sotto le quali è inserita la traversa, che limita quindi il solo imbarcamento, e consente al tavolato di dilatarsi lungo il piano.

Classiche traverse mobili cinquecentesche sono quelle con la sezione a *coda di rondine*, che scorrono grazie ad un incasso complementare sul retro del supporto, spesso rastremato. Bisogna aspettare fino al XVII secolo per trovare sostegni scorrevoli di tipologia sostanzialmente diversa come ad esempio quelli detti a *gattelli*, formati da una traversa mobile a forma di "T" e da una serie di ponticelli incollati al supporto [10].

## 2.2. TECNICHE DI ESECUZIONE DEI DIPINTI SU TAVOLA

Probabilmente il primo documento a noi pervenuto in cui siano trattati i dipinti su tavola è la *Naturalis historia* di Plinio (77 d.C.), dove sono descritte tecniche di esecuzione quali l'*encausto* e la *tempera* e si fanno rapidi cenni al trattamento che il supporto deve ricevere come preparazione alla pittura [11]. Intorno al decimo secolo risale invece lo scritto di Eraclio *De Coloribus et Artibus Romanorum* dove si trovano più dettagliate informazioni circa le modalità di costruzione dei supporti lignei. Il procedimento seguito per lavorare il supporto è descritto nel XXIV capitolo: il supporto era raschiato, levigato e poi strofinato con erba di asperella, per favorire l'adesione dello strato successivo; quindi veniva applicata la tela, o stesa una preparazione composta di bianco di piombo, cera d'api e polvere di mattone [12]. Ulteriori interessanti informazioni possono essere ricavate dalla *Diversarum artium schedula* del monaco Teofilo (XI-XII sec.), il quale dimostra una notevole conoscenza circa le tecniche in uso nella sua epoca: interessante risulta la descrizione dell'incollaggio delle varie assi con colla di caseina e calce (caseinato di calce) e di un'inconsueta incamottatura di cuoio [13].

Il *Libro dell'Arte* di Cennino d'Andrea Cennini, scritto tra il XIV e il XV secolo, rimane in ogni modo il più ricco e dettagliato ricettario delle tecniche artistiche medievali in Toscana, nella letteratura antica: Cennino realizza un trattato completo che documenta in maniera minuziosa le tecniche e le metodiche artistiche dei maestri tardo-giotteschi. Il trattamento del supporto ligneo è descritto nei particolari nel capitolo CXIII: la specie legnosa che il Cennini consiglia è il pioppo (per l'esattezza il Gattice, secondo l'attuale terminologia), il cui legno non deve essere difettoso o umido, ma, piuttosto, "*ben secco*" e il più possibile privo di nodi, eventualmente correggibili con segatura di legname e colla [14].

### 2.2.1. PREPARAZIONE DEL SUPPORTO PER LA TECNICA A TEMPERA

L'uso della tela come elemento ammortizzante per i movimenti del legno è documentato da Vasari, nel suo più famoso scritto *Le vite dei più eccellenti pittori, scultori e architetti* (1568), come una pratica adottata "*da Cimabue in dietro, e da lui in qua*"; Vasari spiega che "*nello ingessare delle tavole questi maestri vecchi, dubitando che quelle non s'aprissero in su le commettiture, mettere per tutto, con la colla carnicci, tela di lino e poi sopra quella ingessavano per lavorarvi sopra*" [15]. Si documenta poi un cambiamento riguardo l'impiego della tela con il trattato di Raffaello Borghini, *Il riposo* (1584): gradualmente l'utilizzo della tela è limitato a strisce sottili lungo le commettiture delle assi, fino a sparire del tutto dal supporto, sostituita con canapa e colla [16].

La realizzazione dell'imprimitura consisteva poi nella stesura di gesso grosso e colla animale (è spesso citata la colla carnicci, cioè una colla di scarti di pergamena bolliti); lasciata seccare per due o tre giorni, la si raschiava, ottenendo un piano molto levigato, e si proseguiva a stendere altre mani, sempre incrociate, di gesso macinato fino e colla, in almeno otto strati; l'imprimitura doveva infine essere accuratamente levigata "a modo d'avorio" con dei *raschietti*. Con scopo protettivo veniva stesa una preparazione anche sul retro della tavole, oppure in alcuni casi il polittico era dipinto da ambedue le parti, come ad esempio la *Maestà* di Duccio, ma di tale consuetudine si perde l'usanza nel corso del Quattrocento.

### 2.2.2. IL DISEGNO, LA DORATURA, LA PITTURA A TEMPERA E LA VERNICIATURA

Il disegno veniva realizzato sulla preparazione, secondo due metodologie ricorrenti: disegno a mano libera con carboni di salice, oppure riporto di un disegno precedentemente realizzato su cartone, tramite *spolvero* [14] o *ricalco* [15].

Il lavoro procedeva nella bottega del doratore, dove si distinguono due fasi principali: la preparazione (*a guazzo* o *a missione*), e l'applicazione delle foglie d'oro; la preparazione era di fondamentale importanza per ottenere un buon risultato della doratura [14].

I colori erano tritati finemente in grossi mortai e stemperati con rosso d'uovo. Le ricette erano diverse: il Cennini consiglia un rosso d'uovo con una uguale quantità in peso di pigmento diluito in acqua, il Vasari invece riprende un espediente già accennato da Plinio e suggerisce un uovo battuto con aggiunte di lattice di fico (succo ottenuto da rami di fico tritati, che conferisce alla tempera la proprietà di ritardare l'essiccazione dei colori).

Nella tradizione occidentale non era molto apprezzato l'uso di verniciature: infatti il Cennini afferma che la vernice "*annulla ogni altra tempera*" e che comunque bisogna aspettare molto tempo prima di stendere qualsiasi sostanza. Le sostanze componenti queste vernici non risultano descritte chiaramente dal Cennini, che accenna solamente ad una leggera mano di chiara d'uovo battuto, che non doveva essere stesa sopra l'oro [14].

### 2.3. IL DEGRADO DEI DIPINTI SU TAVOLA

Come si è visto nei paragrafi 2.1 e 2.2 un dipinto su tavola è costituito da una complessa stratigrafia di materiali, i quali subiscono singolarmente due tipologie di alterazioni: una prima strettamente legata alle caratteristiche chimico fisiche e meccaniche proprie del materiale in questione e alle sue interazioni con l'ambiente; una seconda derivante dalle interazioni dei materiali gli uni con gli altri. Le alterazioni divengono *danno* qualora si verificano effetti irreversibili e permanenti che modificano la leggibilità dell'opera, peggiorandola e/o ne alterano l'integrità fisica.

Nei sottoparagrafi che seguono si divide virtualmente un dipinto su tavola in due costituenti fondamentali: il supporto ligneo (costituito di tavolato e sistema di traversatura) e la parte pittorica (comprensiva di preparazione, pittura e vernice); si analizzano quindi i danni che possono verificarsi su ciascuna di queste porzioni e si individuano le relazioni.

#### 2.3.1. IL DEGRADO DEL SUPPORTO LIGNEO

Alla luce delle considerazioni fatte nel paragrafo 1.3 le due fondamentali cause abiotiche di danno nei supporti dei dipinti su tavola sono le *deformazioni di origine igroscopica* e le *sollecitazioni meccaniche conseguenti*: il tavolato ha la tendenza a ritiri/rigonfiamenti e imbarcamenti (sia per anisotropia dei ritiri, sia per gradiente igroscopico) in risposta alle variazioni di umidità ambientale, il sistema di traversatura invece agisce limitando questi movimenti, con maggiore o minore efficienza, in funzione della tipologia di sistema adottata.

Qualora le tensioni prodotte dalle reazioni vincolari superino la resistenza del materiale o delle committiture, possono prodursi danni strutturali, quali tipicamente fessurazioni longitudinali, apertura delle committiture e separazioni tra le tavole, sconnessioni tra tavolato e sistema di contenimento.

Dall'altra parte, la eccessiva libertà di movimento causata dalla assenza o eccessiva cedevolezza di traversature può condurre a due tipi di danno: 1) deformazioni permanenti che possono alterare la leggibilità dell'opera, 2) deformazioni temporanee e/o permanenti che possono portare a danni agli strati pittorici.

Appare quindi evidente come il sistema di traversatura svolga un ruolo di fondamentale importanza per la conservazione di un dipinto su tavola, in quanto deve esercitare sul tavolato una forza calibrata che mantenga congruenti le deformazioni delle singole tavole che compongono il tavolato, non concedendo un imbarcamento eccessivo, ma che permetta al tempo stesso ed entro certi limiti i movimenti di ritiro e rigonfiamento legati alle inevitabili variazioni climatiche ambientali.

Per completezza si citano infine i fattori biotici che causano il degrado del supporto ligneo: organismi xilofagi quali funghi e insetti rientrano tra le più diffuse cause di alterazione di un dipinto su tavola. I funghi che maggiormente interessano i dipinti su tavola sono i cosiddetti funghi cromogeni, che attaccano il legno solo superficialmente e si sviluppano solo in condizioni di umidità relativa molto elevata (>80%), e i funghi da carie, che degradano il legno al livello della parete cellulare, alterando profondamente le proprietà fisiche del legno. I danneggiamenti più gravi tuttavia sono rappresentati dagli attacchi di insetti appartenenti in particolare agli ordini dei Coleotteri (famiglie degli Anobidi e dei Cerambicidi) e degli Isotteri (famiglie dei Kalotermitidi e dei Rinotermitidi). Gli insetti xilofagi scavano gallerie (di dimensioni e forme caratteristiche) le quali possono provocare a seconda dell'entità e della localizzazione, danni quali: collasso degli strati pittorici, nel caso in cui si trovino in prossimità della faccia anteriore; diminuzione della resistenza meccanica, e aumento della porosità, in caso di ingente quantità di gallerie; presenza di fori di sfarfallamento sul retro o sulla faccia dipinta [17].

### 2.3.2. IL DEGRADO DELLA PITTURA

La parte pittorica intesa come insieme di strati preparatori, strati pittorici e vernice può presentare numerose tipologie di danno. Una corretta e consapevole lettura del pattern di microfessure e sollevamenti può fornire importanti indicazioni circa le dinamiche di degrado sviluppatesi nel passato o in corso. Studiosi come Buck [6], Elm [18], Keck [19], Karpowicz [20], Bucklow [21, 22] e più recentemente Ravaud [23], hanno approfondito il tema del degrado della pellicola pittorica tramite osservazioni dirette della pittura associate ad un accurato studio del comportamento del supporto.

In accordo con la classificazione di Rimaboschi [24] si descrivono i principali danni della pittura riscontrati sui dipinti su tavola, distinguendoli per causa, profondità e forma:

- *craquelure*: si tratta di microfessure dalla profondità variabile che interessano il film pittorico fino alla parte più superficiale degli strati preparatori. Generalmente si verifica *craquelure* durante la fase di asciugatura del colore, per evaporazione del solvente;
- *cretti* (in inglese *cracks*): differentemente dalla *craquelure*, la profondità di queste microfessure interessa anche gli strati preparatori o parte di essi. Per contro, come per la *craquelure*, l'origine dei *cretti* è l'evaporazione del solvente;
- *cretti da invecchiamento* (in inglese *age cracks*): si tratta di particolari *cretti* che hanno origine da un processo di irrigidimento della pittura innescato dall'evaporazione del solvente, in seguito al quale la pittura non è più in grado di seguire i movimenti del supporto [18]. Questi *cretti* si presentano sottili e disposti regolarmente e la

distanza tra di loro sembra essere in rapporto diretto con lo spessore della preparazione pittorica;

- *isole di colore* (in inglese *islands of colour*): sono aree di pittura separate da cretti lineari o curvi e sono associate a stress interni agli strati pittorici o a movimenti del legno;
- *scivolamento di colore* (in inglese *colour skidding*): si verifica poco dopo la stesura del colore, durante i primi periodi di asciugatura. È diffuso nella pittura a olio;
- *distacchi* (in inglese *detachments*): non visibili ad occhio nudo, si verificano in caso di perdita di adesione tra gli strati preparatori e il supporto, prodotta da forze di taglio tra gli strati che potrebbero essere causate da movimenti del supporto ligneo;
- *sollevamenti* (in inglese *lifts*): la pittura si solleva dal supporto producendo una sorta di cresta con direzione predominante parallela o perpendicolare alla fibratura; oppure assume una forma rotonda, come di una sbollatura, o di scaglia. Secondo Buck [6] i sollevamenti paralleli alla fibratura sono causati dal ritiro del tavolato, mentre quelli perpendicolari sono probabilmente associati ad una spessa preparazione pittorica e alla presenza di tela;
- *rigonfiamenti rotondi* (in inglese *bubble-shaped swelling*): si formano in caso di esposizione ad alte umidità o infiltrazioni di acqua;
- *fessura* (in inglese *split*): descrive un solco che interessa supporto ligneo preparazione e pittura.

Da questo elenco di possibili danni della pellicola pittorica emerge chiaramente la stretta connessione tra colore e supporto ligneo e come i movimenti del tavolato possano essere una delle maggiori cause di degrado di un dipinto su tavola. Al fine di limitare i danni sulla pittura, i movimenti del supporto devono essere controllati tramite il mantenimento di un clima di conservazione delle opere il più costante possibile; in associazione con un controllo climatico è opportuno che i sistemi di traversatura installati sulle opere esercitino sul tavolato una forza calibrata in funzione delle esigenze delle opere stesse.

### **2.4. GLI INTERVENTI DI RESTAURO DEI SUPPORTI LIGNEI NELLA STORIA RECENTE**

L'articolata evoluzione della storia del restauro ha visto nell'ultimo secolo sostanziali cambiamenti negli obiettivi e nelle tecniche adottate nel restauro dei dipinti su tavola.

Nell'Ottocento i restauratori si pongono come obiettivo lo spianamento dei supporti lignei, per recuperare la planarità originaria della pittura: numerosi sono i metodi adottati con il fine di ridurre se non addirittura eliminare l'imbarcamento dei tavolati.

Il raddrizzamento del tavolato era effettuato sfruttando il meccanismo del meccanosorbitivo, ovvero apportando umidità al legno tramite panni bagnati e imprimendo una pressione graduale fino alla completa spianatura della tavola. Il Bellafemmina [25] riferisce che dopo aver "sbassato" lo spessore del tavolato, si procedeva con una serie di tagli in direzione longitudinale profondi due terzi dello spessore: così indebolito il tavolato veniva manipolato e spianato grazie all'inserimento di cunei di legno più duro lungo i tagli. Questa planarità veniva mantenuta con l'applicazione di un sistema di traversatura rigido, come la parchettatura (*parquetage* in francese), che nella seconda metà dell'Ottocento si diffonde in Francia e Italia, realizzata secondo la tecnica descritta da Horsin Déon [26], simile a quella "fiorentina". Si tratta di

montanti incollati a distanze regolari lungo la direzione longitudinale, intagliati in maniera tale da poter ricevere le traverse infilte trasversalmente; tale sistema era pensato per concedere moderatamente i movimenti di ritiro/rigonfiamento del tavolato, ma impedire qualunque movimento fuori dal piano. Anche Ulisse Forni pochi anni più tardi (1866) descrive una struttura simile chiamandola “intelaiatura”, precisando però che essa viene applicata solo dopo aver piallato e assottigliato tutta la superficie della tavola [27]. Il Secco Suardo invece parla di “apparati per mantenere in piano le tavole” [28], descrivendone varie tipologie: dalle traverse applicate con viti e colla forte, alle classiche traverse a coda di rondine e incasso nello spessore del supporto.

Operazioni così energiche e invasive sul supporto si ripercuotevano sulla preparazione, causando consistenti danni alla pellicola pittorica; inoltre interventi come tagli e assottigliamenti dei supporti denotano la scarsa considerazione da parte dei restauratori Ottocenteschi nei riguardi del supporto: la concezione diffusa era che l’opera d’arte da tutelare risiedesse nella sola parte pittorica, mentre il tavolato fosse solo un supporto che può essere maneggiato e alterato liberamente, in funzione della pellicola pittorica. Nell’Ottocento infatti non si considera il supporto ligneo come un documento storico di pari importanza dell’opera pittorica, ma piuttosto una funzione di quest’ultima. Dimostrazione di questo pensiero sono i numerosi trasporti praticati da tavola a tela, come il trasporto del dipinto *Madonna col Bambino e San Giovannino* di Michele Ridolfo del Ghirlandaio, operato da Giovanni Secco Suardo [1]. Questi interventi che oggi definiremmo “brutali” comportano danni non solo *fisiologici*, legati cioè alla materia stessa, ma molto concretamente comportano per gli strati pittorici danni imprevisi, che spesso si sviluppano nel tempo.

Si dovrà giungere agli anni Sessanta-Settanta del Novecento per comprendere che il supporto ligneo ha pari dignità della pittura e merita di essere rispettato come parte integrante dell’opera e che pertanto l’imbarcamento non è altro che il risultato dell’azione della storia, un elemento che sottolinea il pregio e l’originalità dell’opera stessa.

Negli ultimi decenni quindi si è diffuso il rispetto per l’opera d’arte nel suo complesso: nella parte pittorica, nel supporto, e nelle deformazioni subite nel tempo; ad oggi non si lavora più per impedire le deformazioni fuori dal piano, ma al contrario, per concederle all’interno di un contesto di unità materica.

È proprio in questo contesto storico di acquisita consapevolezza dell’importanza storico-artistica del supporto e delle sue deformazioni che viene ideata e sviluppata la traversatura con molle.

### **3. LA TRAVERSATURA CON MOLLE E LE PROCEDURE DI DIMENSIONAMENTO E VALUTAZIONE**

Come visto nei paragrafi 1.3 e 2.3, il sistema di traversatura riveste un ruolo fondamentale per la conservazione di un dipinto su tavola: in funzione delle caratteristiche scelte, la tipologia di traversatura, associata alle variazioni climatiche dell'ambiente in cui l'opera è collocata, può contrastare i movimenti del supporto e indurre tensioni tali da provocare danno, oppure, al contrario, può assorbire i movimenti, eventualmente ammortizzandoli, assicurando una buona conservazione dell'opera.

Ogni scuola di restauro adotta scelte e metodologie differenti, ma l'obiettivo comune è che l'opera sia messa in condizioni di sicurezza –compatibilmente con le variazioni climatiche- attraverso un intervento minimamente invasivo che preveda il massimo mantenimento del materiale originale. Ad oggi nel Settore Dipinti su Tavola presso l'Opificio delle Pietre Dure, laddove si trovano traverse originali, la scelta è mantenere sempre l'originale, eventualmente lavorando sul sistema per adattarlo con piccole modifiche alle necessità del supporto. Nel caso in cui invece le traverse originali siano andate perdute o siano state sostituite da sistemi inadatti (se non addirittura dannosi), i restauratori dell'OPD generalmente adottano la scelta di rimuovere gli interventi posticci per sostituirli con un sistema comunemente chiamato *traversa con le molle*, ovvero sia più in generale *traversatura con molle*. Tale meccanismo è stato ideato alla fine degli anni Ottanta in OPD da un team di restauratori guidato da Ciro Castelli e negli anni si è diffuso con molto successo nel campo del restauro in Italia e in Europa. Nella prima pubblicazione che descrive la *traversa con le molle* [29] Castelli scrive “Lo scopo di tale sistema è [...] assorbire le deformazioni che si verificano con il variare dei valori ambientali, limitandole senza bloccarle con un sistema misurabile e regolabile che supera l'empirismo del metodo tradizionale basato sullo spessore della traversa”. Da questa affermazione si evincono due caratteristiche fondamentali di questo sistema: l'elasticità e la possibilità di regolazione delle forze applicate.

#### **3.1. LA TRAVERSATURA CON MOLLE**

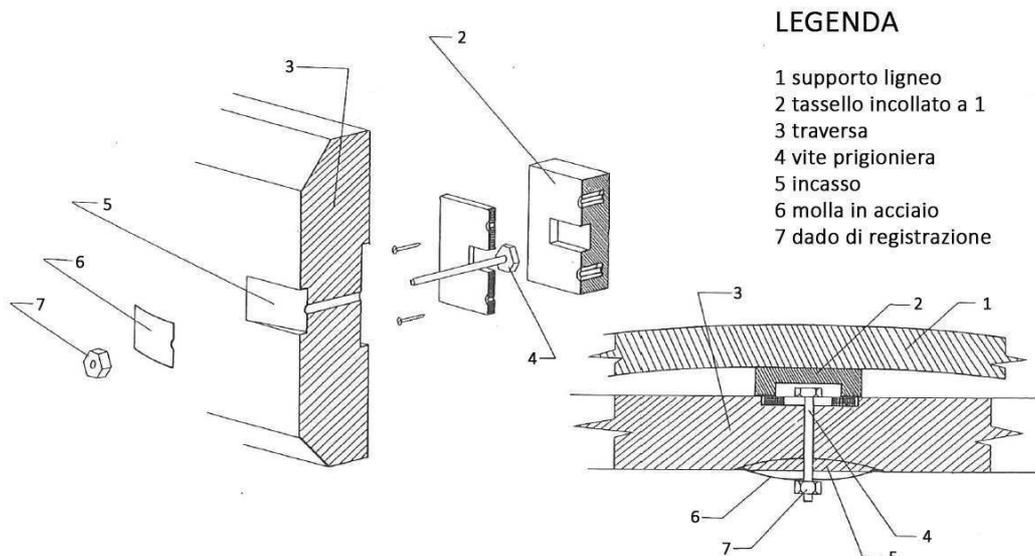
La traversatura con molle introduce tra traversa e tavolato degli ancoraggi con caratteristica di elasticità, in grado di rispondere con forza prefissata e variabile ai movimenti indotti nel tavolato dalle variazioni di umidità ambientale. Seguendo tale

intuizione, i restauratori hanno inteso realizzare un meccanismo che limitasse senza impedire i movimenti del supporto sia nel piano (ritiro/rigonfiamento) che fuori dal piano (imbarcamento): un sistema che consentisse al tavolato i movimenti di equilibramento con le variazioni igrometriche e che non inducesse eccessive tensioni interne. La seconda importante e innovativa caratteristica di questo sistema è la possibilità di regolazione della forza esercitata dall'elemento elastico: è possibile intervenire sul sistema con efficienza e rapidità variando le forze applicate, in funzione di eventuali cambiamenti di condizioni di conservazione.

Nel corso degli anni sono state effettuate numerose applicazioni della traversatura con molle, e in ciascuna applicazione il sistema è stato ripensato nei suoi dettagli e adattato alle necessità proprie dell'opera in restauro; anche se le geometrie e i materiali sono stati soggetti a modifiche e miglioramenti, è possibile comunque individuare gli elementi fondamentali che costituiscono il meccanismo ed elencarli, in riferimento all'immagine 3.1:

- un *tassello* (2), chiamato anche “piedino” o “bottone”, incollato al tavolato dal quale fuoriesce una *vite prigioniera* (4)
- una *traversa* in legno (3) nella quale è praticato un *incasso* (5)
- un *elemento elastico* (6) come una laminetta metallica o una molla a compressione
- un *dado di registrazione* (7)

Lungo la traversa sono praticati dei fori sagomati attraverso lo spessore in modo tale da accogliere da un lato la vite (a sua volta collegata al tavolato tramite il tassello) e dall'altro un elemento elastico, attraverso il quale passa la vite stessa. Il blocco del sistema è effettuato tramite un dado di registrazione, che viene opportunamente avvitato, in funzione del precarico che si intende imporre al collegamento tra tavolato e traversa. È proprio tramite questo ultimo elemento, il dado, che è possibile regolare la forza esercitata sul pannello sia al momento dell'assemblaggio, sia in seguito, in occasione di eventi che richiedano una variazione delle forze imposte (come ad esempio l'insorgere di consistenti cambiamenti climatici, o la necessità di trasporto dell'opera...).



**Immagine 3.1.** Disegno tecnico in cui sono riportati i singoli elementi costituenti la traversatura con molle e il loro assemblaggio, ai fini di un ancoraggio al supporto ligneo [20].

È da tener presente che l'elasticità del sistema di traversatura non è conferita solamente dalla tipologia e dalla regolazione degli elementi elastici, ma possono fornire un grande contributo di elasticità la sezione e la specie legnosa di cui è costituita la traversa stessa.

Si è quindi definito come la regolazione della forza esercitata e l'elasticità siano le due caratteristiche innovative della traversatura con molle, ma è importante menzionare un'ulteriore proprietà di cui si tiene conto nella progettazione di questo sistema, che – ripresa dalle traverse scorrevoli Cinquecentesche – consiste nella possibilità di scorrimento tra traversa e tavolato. Lo scorrimento è garantito dalla modalità di ancoraggio della vite al supporto: alla vite passante per il tassello viene lasciato un certo gioco, in modo che possa inclinarsi per assecondare i ritiri/rigonfiamenti del tavolato; una vite libera di ruotare o di traslare asseconda maggiormente il movimento del tavolato rispetto ad una vite prigioniera e incastrata nel tassello.

Numerosi sono i dettagli che incidono significativamente sulle caratteristiche meccaniche del sistema di traversatura e sulle libertà che esso permette ai movimenti del tavolato: le caratteristiche dell'elemento elastico, la geometria e la specie legnosa della traversa, il numero di ancoraggi, la modalità di ancoraggio delle viti, la lunghezza delle viti.

Fino ad oggi i restauratori hanno definito le caratteristiche delle traverse in funzione dell'esperienza raccolta nel corso dei restauri (propri ed altrui), delle conoscenze personali, della sensibilità e del buonsenso personali, senza che sia mai stata definita una procedura per un dimensionamento scientifico delle traverse, adeguato di volta in volta alle necessità del dipinto: evidentemente questo modo di procedere non fornisce certezze e può comportare esiti che possono talvolta richiedere la necessità di secondi interventi, con le conseguenti difficoltà tecniche e il costante rischio di non riuscire a raggiungere l'obiettivo prefisso.

A partire dal 2009 le dinamiche di funzionamento della traversatura con molle sono state studiate in occasione di una collaborazione tra il mondo del restauro e quello scientifico. Attraverso la ricerca di dottorato di Marcon [30, 31], per esigenza del restauratore pratese Daniele Piacenti, è stato sviluppato un modello matematico di simulazione del comportamento meccanico del sistema traversa elastica-tavolato di un dipinto di Andrea di Giusto, il cui restauro prevedeva appunto l'impiego di una traversatura con molle; questo studio è stato validato attraverso un simulacro fisico che posto in una camera climatica del GESAAF riproduceva fedelmente una porzione di supporto del dipinto in questione ed ha portato alla definizione delle sollecitazioni e delle deformazioni indotte nel tavolato dal sistema di traversatura in occasione di variazioni igrometriche ambientali. Il lavoro di Marcon risulta di notevole importanza per l'introduzione di un approccio scientifico in questo specifico settore di restauro: ha aperto una strada che deve continuare ad essere percorsa, per giungere alla definizione di un approccio matematico al dimensionamento della traversatura con molle.

È proprio su questa scia che nasce il progetto di collaborazione tra il Settore Dipinti su Tavola dell'OPD e il Gruppo di ricerca sulla Tecnologia del Legno applicata alle opere d'arte del GESAAF dell'Università di Firenze, al fine di fornire ai restauratori un supporto tecnico scientifico che procuri strumenti oggettivi di valutazione delle forze che si sviluppano tra tavolato e traverse, per calibrare con consapevolezza il sistema di traversatura.

### 3.2. LA PROCEDURA DI DIMENSIONAMENTO PROPOSTA

Ogni opera ha una propria identità, una propria storia e uno stato di conservazione. Ogni dipinto su tavola è costituito da un complesso estremamente variabile di materiali che interagiscono tra loro e che a loro volta si trovano in stati vari di conservazione. Questa elevata variabilità non permette una netta classificazione delle opere da un punto di vista conservativo, né permette di individuare una procedura adatta per determinate categorie. Delicato compito del restauratore è effettuare una approfondita analisi dello stato di conservazione delle opere in restauro e definire conseguentemente una strategia di intervento, valutando di caso in caso gli obiettivi che il sistema di traversatura deve raggiungere e definendo quindi la tipologia di lavoro che il sistema deve compiere.

A questo punto il Restauratore può essere affiancato dalla figura di un Tecnico specializzato nelle scienze del legno che, eseguite alcune prove di caratterizzazione meccanica del supporto, sarà in grado di dimensionare gli elementi del sistema di traversatura in funzione degli obiettivi proposti dal restauratore.

Seguendo questo iter è possibile definire una semplice procedura nella quale si definiscono le fasi di lavoro che possono essere seguite per un corretto dimensionamento della traversatura con molle:

#### PROCEDURA DI DIMENSIONAMENTO DELLA TRAVERSATURA CON MOLLE

I fase di lavoro:	Valutazione dello stato dell'opera e accurata ispezione	A cura del Restauratore
II fase di lavoro:	Definizione degli obiettivi (ovvero concedere/limitare l'imbarcamento, il rigonfiamento, il ritiro...)	A cura del Restauratore
III fase di lavoro:	Caratterizzazione meccanica del tavolato (tramite prove sperimentali non distruttive né invasive sul tavolato)	A cura del Tecnico specializzato
IV fase di lavoro:	Progettazione di un sistema di traversatura che risponda agli obiettivi prefissi, adattato alle caratteristiche di elasticità del tavolato (tramite modellazione matematica)	A cura del Tecnico specializzato
V fase di lavoro:	Assemblaggio del sistema e sua applicazione sul supporto	A cura del Restauratore
VI fase di lavoro:	Monitoraggio e verifica del corretto funzionamento del sistema, possibilmente in clima controllato e con variazioni igrometriche imposte	A cura del Tecnico specializzato
VII fase di lavoro:	Valutazione del funzionamento del sistema in funzione degli obiettivi prefissi	A cura del Tecnico specializzato e del Restauratore

VIII fase di lavoro:	Correzione (eventuale) del sistema in funzione del monitoraggio e di variabili esterne (tramite modellazione matematica)	A cura del Tecnico specializzato e del Restauratore
----------------------	--	---

Nel caso in cui la necessità di valutazione delle forze indotte tra traverse e tavolato sorga in seguito ad un intervento di restauro già effettuato, si propone una procedura leggermente diversa: non si progetta infatti un sistema di traversatura, bensì si valuta l'efficacia di un sistema già realizzato e montato; le fasi di lavoro restano fondamentalmente le stesse, ma ne risulta variato l'ordine:

#### PROCEDURA DI VALUTAZIONE DELLA TRAVERSATURA CON MOLLE

I fase di lavoro:	Definizione degli obiettivi (ovvero concedere/limitare l'imbarcamento, il rigonfiamento, il ritiro...)	A cura del Restauratore
II fase di lavoro:	Caratterizzazione meccanica del tavolato e delle traverse (tramite prove sperimentali non distruttive né invasive sul tavolato)	A cura del Tecnico specializzato
III fase di lavoro:	Monitoraggio e verifica del corretto funzionamento del sistema, possibilmente in clima controllato e con variazioni igrometriche imposte	A cura del Tecnico specializzato
IV fase di lavoro:	Valutazione del funzionamento del sistema in funzione degli obiettivi prefissi	A cura del Tecnico specializzato e del Restauratore

Nel corso della presente ricerca sono state definite e affrontate le fasi di lavoro II e III della procedura di valutazione della traversatura con molle. Le metodologie proposte sono state applicate sul caso di studio *Deposizione dalla Croce*, Anonimo Abruzzese XVI sec., dipinto su tavola attualmente in restauro presso OPD; nel capitolo 6. si descriveranno le metodologie applicate e i risultati ottenuti.



## **4. CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI UN TAVOLATO**

Ogni dipinto è un individuo a sé e dai punti di vista costruttivo, storico e conservativo presenta numerose variabili che fanno sì che ciascuna opera sia definita da caratteristiche uniche. Per questo motivo non è possibile definire un valore standard di elasticità, rigidità o qualunque altra caratteristica meccanica da attribuire all'intera categoria dei dipinti su tavola: ogni opera deve essere indagata e ogni tipologia di indagine deve essere adattata alle esigenze dell'opera stessa.

La metodologia qui proposta per la caratterizzazione meccanica di un supporto è stata pensata per tavolati che abbiano unità strutturale, privi di fessurazioni importanti o di scollamenti tra le committiture; tali condizioni possono verificarsi di partenza oppure in seguito ad un restauro strutturale del supporto: se il restauro prevede un consolidamento, un inserimento di cunei o interventi strutturali significativi, è opportuno che la caratterizzazione meccanica sia effettuata in seguito agli interventi sul supporto, in modo tale che la progettazione del sistema di traversatura sia idonea al tavolato su cui sarà applicata.

Nel caso di un dipinto su tavola il cui supporto sia da sottoporre a restauro, il primo passo quindi sarà effettuare una ispezione tecnologica del tavolato, attraverso la quale poter definire lo stato di conservazione del supporto e la tipologia di restauro da effettuare. Qualora il restauratore valuti la necessità di installare una traversatura con molle, un'indagine tecnica del supporto potrà definire le caratteristiche meccaniche di quello specifico tavolato; questo costituisce una informazione di base per una scelta consapevole del dimensionamento della traversa elastica.

### **4.1. LA PROVA MECCANICA A FLESSIONE**

Dando come condizione fondamentale che il tavolato debba presentarsi privo di discontinuità consistenti da un punto di vista strutturale, e che la pittura sia in un buono stato di adesione, se si pensa alle possibili operazioni di indagine da fare su un supporto ligneo, è opportuno valutare numerosi fattori pratici e di sicurezza che possono incidere sulla buona riuscita della prova: le dimensioni del tavolato, l'ambiente in cui è collocato, la possibilità di movimentazione (ruotandolo per esempio in orizzontale o verticale), la minima invasività sull'opera... sono tutti fattori da considerare nel momento in cui si sceglie la modalità di prova meccanica da effettuare. Lo scopo di tale prova è ottenere informazioni circa le caratteristiche di elasticità del tavolato, nel suo insieme e in modo

localizzato: in funzione degli scopi per cui si effettua la caratterizzazione meccanica, può risultare necessario definire caratteristiche meccaniche medie del tavolato, che non tengano conto delle specifiche disomogeneità localizzate, oppure caratteristiche meccaniche proprie di aree di interesse individuate.

Alla luce di tutte queste considerazioni la tipologia di prova meccanica più opportuna risulta essere la prova meccanica a flessione, lungo una o più linee corrispondenti all'ancoraggio delle traverse. Una prova a flessione infatti induce una sollecitazione sul tavolato di tipologia non molto lontana da quella esercitata da una traversa e, a differenza di una prova a trazione o compressione, è di semplice realizzazione e richiede una strumentazione facilmente trasportabile e di ingombro contenuto, effettuabile sia in verticale che in orizzontale (in funzione delle necessità). Inoltre attraverso questo tipo di prova, del tutto non invasiva, è possibile ricavare i parametri desiderati con buona accuratezza, pur imponendo sollecitazioni molto limitate. Queste motivazioni hanno orientato la scelta verso la prova meccanica a flessione, ma non si escludono a priori l'adeguatezza e l'efficacia di metodi alternativi.

L'obiettivo di queste indagini è ottenere un parametro meccanico che caratterizzi il comportamento del tavolato lungo le linee di interesse, ovvero lungo le linee corrispondenti all'ancoraggio delle traverse. Nel paragrafo 1.2 si è visto che per un elemento ligneo, di geometria e dimensioni opportune e netto da difetti, sottoposto a prova meccanica (sia essa compressione, trazione, o flessione) è possibile definire una serie di parametri, tra cui il modulo elastico  $E$  che lo caratterizza. Evidentemente avere determinate geometria e dimensioni ed essere netto da difetti sono caratteristiche proprie di un provino realizzato in laboratorio tramite una accurata selezione del materiale di partenza; ma certamente non sono caratteristiche che possono essere ritrovate su di un dipinto su tavola originale. In un dipinto originale le geometrie e le dimensioni possono essere le più varie, la presenza di commettiture tra le tavole e di difetti assicura una discontinuità di comportamento meccanico nel materiale. Pertanto non risulta corretto cercare di definire e determinare il *modulo elastico di un supporto ligneo*: è certamente più appropriato e adeguato all'obiettivo di dimensionamento del sistema di traversatura determinare mediante misurazioni e calcoli appropriati una *caratteristica meccanica di determinate linee di interesse di un supporto ligneo*.

Riassumendo, si propone di effettuare una prova meccanica a flessione lungo una o più linee del tavolato da caratterizzare, per ottenere una caratterizzazione meccanica del tavolato stesso sollecitato in corrispondenza di quelle linee di interesse.

In una estrema semplificazione, il parametro cercato, tale da caratterizzare il supporto ligneo assoggettato a flessione trasversale, sarebbe un modulo elastico trasversale del legno in questione: tale parametro trasversale è il risultato della media fra il modulo radiale e quello tangenziale, visto che nell'insieme di un tavolato tutte le direzioni trasversali sono presenti, e nessuna prevale.

Se il tavolato fosse molto basso in relazione alla sua larghezza ed al suo spessore, potrebbe essere assimilato a una striscia di legno da sollecitare a flessione trasversale, assimilabile a una trave snella appoggiata agli estremi e caricata al centro; ma dal momento che l'altezza del tavolato (secondo la direzione della fibratura) non è trascurabile, il funzionamento dell'insieme va considerato come una lastra, piuttosto che una trave, e la

risposta a flessione è articolata e comprende i contributi della linea di misura e dell'intero tavolato, contributi che variano in funzione della posizione della linea di misura.

Per poter elaborare ed interpretare correttamente i risultati ottenuti da una prova a flessione a tre punti (un punto di applicazione del carico allineato con due appoggi laterali) su di una lastra, è necessario studiare il comportamento di tutta la lastra. Questo studio può essere portato avanti con l'ausilio di un modello matematico calibrato sulla base di riscontri ottenuti da un simulacro fisico in laboratorio: in una situazione ottimale ci si può avvalere di una replica strutturale del tavolato per la validazione del modello matematico; in altre circostanze si potranno poi estendere i risultati al fine di ottenere ad esempio dei coefficienti correttivi relativi al funzionamento della lastra, basandosi sui casi precedenti.

In conclusione, l'iter proposto per definire la caratteristica meccanica di specifiche linee di interesse è stato sviluppato su tre fronti:

- 1) la misura diretta sul tavolato originale
- 2) la misura su di un simulacro fisico
- 3) il calcolo tramite modellazione matematica secondo il metodo degli elementi finiti

Di seguito si illustrano nel dettaglio le modalità di prova e le strumentazioni progettate.

##### **4.1.1. FLESSIONE DI TAVOLATO ORIGINALE**

Per la caratterizzazione di un supporto originale abbiamo scelto, per i motivi anzidetti, il metodo della flessione a tre punti. Si valuta che tale prova debba essere ripetuta per il numero di traverse elastiche che si intende applicare e localizzata in corrispondenza delle linee delle traverse, in modo da poter analizzare la diversa risposta elastica del tavolato per ciascuna area interessata dalle traverse. La distanza tra gli appoggi deve essere maggiore possibile, in modo da agire su tutta l'ampiezza del tavolato, e il punto di ancoraggio sul quale è esercitata la flessione deve essere localizzato lungo l'asse centrale verticale del supporto. Il tavolato può essere mantenuto orizzontale o verticale, in funzione delle necessità: probabilmente per un supporto di medie o grandi dimensioni può risultare più pratico effettuare la prova in verticale, mentre in caso di piccole dimensioni il tavolato può essere mantenuto orizzontale; in ciascuna di queste eventualità è importante individuare bene gli appoggi e i vincoli, in modo da assicurare libertà di movimento in conseguenza alla sollecitazione a flessione imposta.

Per effettuare la prova a flessione è stato progettato e realizzato uno strumento molto semplice, rappresentato nella tavola 4.1, a sinistra e composto di un profilato in alluminio industriale con sezione quadrata (1), strumentato alle estremità con due appoggi basculanti e regolabili nella distanza (2), e al centro con una cella di carico a taglio (3) dotata di una barra filettata passante attraverso il profilato stesso (4): l'estremità della barra filettata viene ancorata (5) all'oggetto da inflettere e costituisce l'elemento di trasmissione della forza al tavolato. Ancorato ad un sistema di riferimento esterno, un comparatore può essere posizionato in prossimità del punto di applicazione del carico. Attraverso la rotazione della vite si impone al tavolato una determinata freccia di inflessione, misurabile con accuratezza mediante il comparatore; attraverso una cella di carico si misura la forza necessaria per inflettere il tavolato della quantità misurata dal comparatore. Si ottengono in questo modo dei grafici carico/variazione di freccia specifici dell'oggetto misurato, lungo la linea sulla quale è stata effettuata la prova.

##### 4.1.2. FLESSIONE DI REPLICA STRUTTURALE

Allo scopo di verificare i risultati delle misurazioni effettuate sull'originale e di determinare dei coefficienti correttivi e dei parametri per il modello matematico, è stata realizzata una replica strutturale del dipinto originale di cui si vuol fare la caratterizzazione meccanica, composta dallo stesso numero di tavole, riportante la stessa geometria costruttiva in scala 1:1. Si sceglie di non replicare la curvatura, né le discontinuità del tavolato originale: la replica deve avere caratteristiche meccaniche il più omogenee possibile lungo la sua superficie, al fine di fornire risposte coerenti.

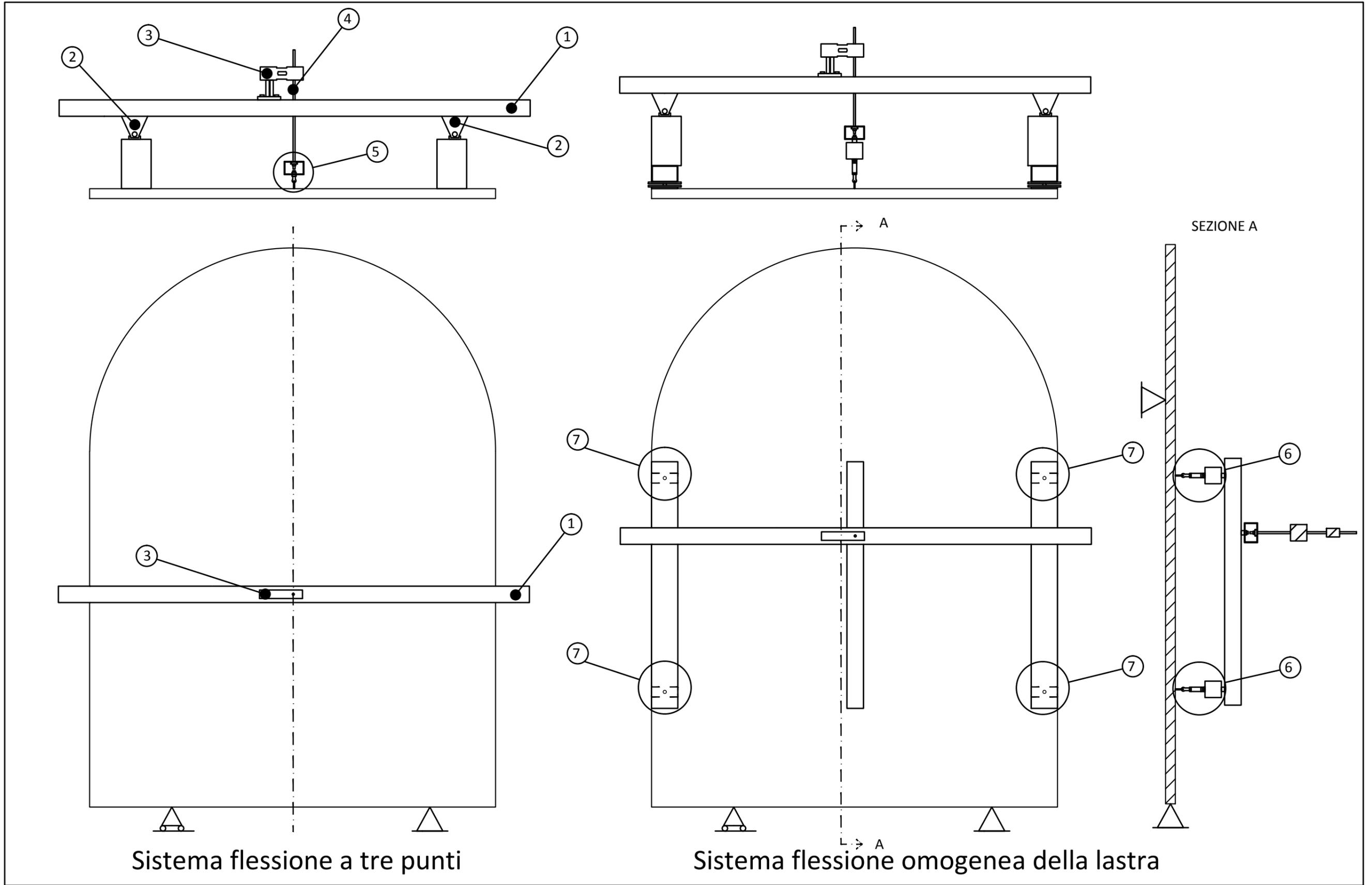
Sulla replica è possibile effettuare prove all'interno del laboratorio scientifico (difficilmente trasportabili in sede di restauro) che forniscano indicazioni circa il comportamento dell'intera lastra in risposta ad una sollecitazione di flessione localizzata lungo una linea. Sulla replica sono effettuate due diverse tipologie di prove a flessione: 1) una flessione uguale a quella effettuata sull'originale ed 2) un'altra che induce una deformazione omogenea su tutto il tavolato (o il più possibile omogenea); si va a produrre una deformazione cilindrica, agendo con una forza distribuita in due punti. Il sistema per questa seconda deformazione non è pratico ed è difficilmente trasportabile, pertanto la flessione omogenea può essere effettuata solo in laboratorio scientifico.

La flessione omogenea della lastra viene effettuata impiegando lo stesso sistema della flessione a tre punti, a cui sono apportate delle modifiche che permettono l'applicazione del carico tramite due punti di ancoraggio lungo l'asse del tavolato (6) e l'appoggio su quattro punti localizzati il più esternamente possibile (7); nella tavola 4.1 si riporta a destra il disegno di tale sistema con i dettagli del metodo di ancoraggio e di appoggio.

Effettuare le due tipologie di prove a flessione sullo stesso oggetto aiuta a comprendere il comportamento della lastra e ad estrapolare informazioni più raffinate circa le caratteristiche di elasticità del supporto. La procedura prevede pertanto:

- a) Flessione lineare su originale
- b) Flessione lineare e planare su simulacro
- c) Individuazione di una relazione matematica tra flessione lineare e planare del simulacro, tramite modello matematico
- d) Deduzione della resistenza a flessione planare dell'originale, tramite modello matematico (che sarà descritto nel paragrafo 6.2.2 .

Le caratteristiche meccaniche del tavolato che sono calcolate a partire dalle prove a flessione sopra elencate saranno impiegate per il dimensionamento e la valutazione della traversatura con molle tramite il calcolo delle sollecitazioni a cui sottoporre/è sottoposto il tavolato (previa modello matematico Marcon).



Sistema flessione a tre punti

Sistema flessione omogenea della lastra



## **5. IL MONITORAGGIO E LA VALUTAZIONE DELLA TRAVERSATURA CON MOLLE**

Sia nel caso in cui si segua una procedura per il dimensionamento, che nel caso in cui si stia effettuando la valutazione di una traversatura con molle preesistente, la fase di monitoraggio svolge una funzione di verifica dell'efficacia del sistema ed è l'elemento che permette di definire se gli obiettivi del restauratore sono stati raggiunti in modo sufficientemente efficace. L'obiettivo del monitoraggio è fornire a restauratori e conservatori un metodo per quantificare le forze sviluppate tra traversatura elastica e tavolato, e le deformazioni di entrambi questi componenti in risposta alle variazioni climatiche. Con il monitoraggio è infatti possibile esplorare le dinamiche di deformazione e le sollecitazioni a cui è sottoposto il tavolato in conseguenza a determinate condizioni ambientali. Si tratta di una fase di lavoro ad oggi necessaria per verificare l'effettivo comportamento del sistema di traversatura, dimensionato secondo le inevitabili approssimazioni del modello matematico. È possibile ipotizzare che, una volta accumulata un'esperienza di applicazione del sistema di monitoraggio in più casi di studio, la procedura e la strumentazione qui proposta possa essere semplificata e ridotta.

### **5.1. LA METODOLOGIA DI MONITORAGGIO DELLA TRAVERSATURA CON MOLLE**

Una volta realizzata la traversa elastica in funzione di geometria e dimensioni suggerite dalla modellazione matematica o dall'esperienza del restauratore (a seconda del percorso seguito), è possibile strumentare la traversa e il tavolato con sistemi di monitoraggio finalizzati a quantificare le deformazioni e le forze che si sviluppano in risposta alle variazioni di umidità ambientale.

Data la stretta connessione dei movimenti del tavolato e delle conseguenti forze indotte con le condizioni climatiche dell'ambiente, è opportuno effettuare il monitoraggio in ambienti in cui avvengano variazioni ambientali significative e il più simili possibile a quelle che potranno verificarsi nell'ambiente di conservazione. Addirittura, se le condizioni lo consentono, sarebbe ottima norma svolgere il monitoraggio nell'effettivo ambiente espositivo del dipinto. In questa eventualità sarebbe possibile osservare il comportamento del supporto nelle sue effettive condizioni climatiche di conservazione, in un arco di tempo che potrebbe essere un anno: periodo scelto per esplorare tutte le

stagioni e quindi uno spettro piuttosto ampio delle combinazioni di umidità e temperatura.

Purtroppo però non sempre si ha la possibilità di effettuare un monitoraggio in ambiente espositivo: possono essere infatti numerosi i fattori che ne impediscono la realizzazione, come ad esempio questioni di ingombro della strumentazione sul retro del dipinto, o l'eventualità che il dipinto sia richiesto per una mostra temporanea e che debba subire un trasporto, oppure una eccessiva distanza del museo dal laboratorio di restauro, il che può comportare difficoltà di efficienza nell'intervento e costi elevati.

In alternativa è possibile mantenere il dipinto in un laboratorio o in una stanza climatizzata che potrebbe riprodurre le condizioni climatiche più significative che si verificano effettivamente nell'ambiente museale e riproporle in modo ciclico. L'obiettivo è sottoporre il tavolato a variazioni di umidità con tempistiche tali da indurre stati di ritiro/rigonfiamento in fase transitoria, senza che il tavolato raggiunga l'equilibrio con le condizioni climatiche imposte: ovvero riprodurre l'effettivo comportamento che si ha in ambiente museale, durante eventi particolarmente significativi, quali possono essere i picchi climatici raggiunti nel secco inverno e nell'umida estate, "ripuliti" dalle oscillazioni giornaliere. In questo modo infatti si riescono ad osservare le tendenze di movimento e sollecitazione nelle condizioni termigrometriche "invernali" ed "estive", con tempistiche relativamente rapide: è possibile osservare gli effetti deformativi degli eventi più significativi di un anno, simulati in laboratorio in uno/due mesi. I valori di umidità a cui sottoporre il dipinto sono scelti in funzione delle caratteristiche climatiche dell'ambiente di esposizione e devono comunque essere concordati con i restauratori e i conservatori responsabili, in modo da non rischiare in alcun modo di indurre danni al dipinto.

Dal momento che per effettuare una valutazione del sistema di traversatura non è necessario che il clima sia mantenuto stabile con una precisione particolarmente spinta, ma piuttosto che sia mantenuto un valore medio impostato, qualora non si disponga di una camera climatica è possibile realizzarne una in modo artigianale, strumentando un ambiente con un semplice impianto portatile di condizionamento dell'umidità (umidificatore e deumidificatore collegati ad un sistema di controllo), in modo tale da poter impostare le condizioni igrometriche con le modalità (tempi e valori) a cui di volta in volta si vuole sottoporre il dipinto; tale contenitore deve essere il più possibile isolato in temperatura e umidità, e deve avere dimensioni tali da accogliere il dipinto strumentato con il sistema di monitoraggio e da permettere l'accesso di operatori. Compatibilmente con le esigenze di ricerca si definisce che per l'umidità relativa si ammette un'oscillazione di  $\pm 4\%$  e per la temperatura  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Ai fini del presente lavoro di ricerca è stato climatizzato un piccolo ambiente presso l'OPD, all'interno del quale si è riusciti a mantenere il clima contenuto all'interno dei range prefissi.

Nel corso delle variazioni di umidità controllate, gli strumenti di misura effettuano automaticamente un campionamento (con frequenza definibile in funzione delle necessità) delle due variabili oggetto di monitoraggio: forze tra tavolato e traversa e deformazioni del tavolato.

## **5.2. GLI STRUMENTI DI MONITORAGGIO DELLA TRAVERSATURA CON MOLLE**

La valutazione dell'efficacia del sistema di traversatura passa attraverso la quantificazione delle forze e delle deformazioni. È stato pertanto progettato e realizzato un sistema di monitoraggio dedicato a tale fine, ancorabile sulla traversa elastica e adattabile in funzione delle dimensioni dell'opera.

Ogni volta che nell'ambiente circostante il dipinto su tavola avviene una variazione di umidità relativa, si produce o si modifica il preesistente gradiente di umidità lungo lo spessore del tavolato; la variazione del gradiente provoca variazioni dimensionali e deformazioni del tavolato stesso. In genere tali deformazioni risultano parzialmente impedito dal sistema di traversatura. L'azione della traversatura sul tavolato viene esercitata mediante forze che si trasmettono attraverso gli elementi che li collegano; forze che contemporaneamente riducono la deformazione del tavolato e incrementano quella della traversatura. Per poter rilevare e correttamente quantificare l'azione della traversa occorre misurare contemporaneamente le forze suddette e la deformazione della traversa.

Il sistema di monitoraggio qui descritto è stato progettato dunque per misurare grandezze fisiche di due tipi: forze e deformazioni (tavola 5.1).

### **5.2.1. IL SISTEMA DI MONITORAGGIO DELLE FORZE TRA TAVOLATO E TRAVERSA**

Il sistema di monitoraggio delle forze tra tavolato e traversa sfrutta la caratteristica di elasticità delle molle stesse e si basa sulla misurazione dell'accorciamento e allungamento delle molle della traversa: misurando la lunghezza della molla, è possibile conoscere la forza esercitata.

#### **5.2.1.1. Il principio costruttivo**

La posizione dell'estremo di ciascuna molla viene misurata con un trasduttore di spostamento, montato in asse con la molla stessa, poggiante sulla vite assiale che trasmette la forza della molla, e fissato alla traversa mediante scatolato metallico di alluminio.

#### **5.2.1.2. Accorgimenti progettuali**

Per compensare i piccoli inevitabili disassamenti della vite rispetto al trasduttore si realizza un appoggio sfera-piano, in modo da minimizzare gli errori geometrico-cinematici: il dado di registrazione viene pertanto sostituito con un dado cieco con superficie sferica sulla quale tocca l'estremità del nucleo scorrevole del trasduttore, strumentata a sua volta con un tastatore piatto.

Una volta installato il sistema e lanciata l'acquisizione dati, l'ultima accortezza che il Tecnico specializzato deve avere è misurare l'altezza delle molle nella configurazione assunta (arbitrariamente) come iniziale. La questione è piuttosto delicata, dal momento che le molle, come si è visto, rappresentano il cuore del sistema di misura delle forze tra traversa e tavolato: per tarare il sistema molla-trasduttore, è necessario associare ad una altezza nota di ciascuna molla il valore di estensione del nucleo del trasduttore corrispondente. Pertanto, dopo il montaggio del sistema di monitoraggio si deve misurare manualmente con la maggior precisione possibile l'altezza effettiva delle molle e contemporaneamente si deve prendere nota del valore di estensione del nucleo del

trasduttore associato. Questi valori al “momento zero” forniscono il riferimento di base per una corretta elaborazione dei valori dei trasduttori.

### 5.2.1.3. Metodo di taratura adottato

Dal momento che le molle stesse della traversatura con molle sono parte integrante del sistema di misura è di fondamentale importanza tarare ogni molla su cui si va ad impostare il sistema di monitoraggio. La taratura può essere effettuata attraverso una cella di carico che misura la forza e uno strumento di misura lineare, che quantifichi la lunghezza della molla. Con questo sistema è opportuno effettuare più ripetizioni delle tarature, in modo da limitare il più possibile gli errori legati all'eventuale imprecisione dell'operatore e della strumentazione di taratura stessa. Si ricavano in questo modo dei grafici che mettono in relazione la lunghezza della molla con la forza che essa esercita.

### 5.2.1.4. Componenti del sistema

Localizzati nel disegno di insieme riportato in tavola 5.2, si elencano di seguito gli elementi che compongono il *sistema di monitoraggio delle forze* (per ciascuno è riportato tra parentesi il riferimento alla tavola di dettaglio):

- 1) Scatolato per trasduttore in alluminio (tavola 5.5)
  - 2) Portatrasduttore in alluminio (tavola 5.6)
  - 3) Collarino per alloggiamento della molla del trasduttore in ottone (tavola 5.7)
  - 4) Tastatore in ottone (tavola 5.7)
  - 5) + 6) Dado di registrazione in ottone con calotta sferica (tavola 5.8)
- + Trasduttore  
+ Molla a compressione per trasduttore

### 5.2.1.5. Modalità di funzionamento

Osservando la simulazione di movimento rappresentata in tavola 5.13 infine è possibile comprendere in dettaglio la modalità di funzionamento della traversatura con molle e contemporaneamente del sistema di monitoraggio delle forze delle molle: sono riportati due casi limite e una situazione intermedia relativi ai movimenti concessi dalla traversatura con molle tra traversa e tavolato. Nel punto in cui la traversa è a contatto con il tavolato (immagine di sinistra), la molla ha la sua massima estensione possibile, data dal precarico impostato dal restauratore, alla quale corrisponde la minima forza esercitata; a questa configurazione corrisponde la minima estensione del nucleo del trasduttore del sistema di monitoraggio. Nell'immagine di centro si rappresenta una configurazione intermedia, nella quale la traversa si è allontanata dal tavolato, la molla è stata compressa e la forza esercitata in quel punto è aumentata rispetto alla configurazione di sinistra ed è proporzionale alla lunghezza della molla; contemporaneamente il nucleo del trasduttore ha aumentato la sua estensione esattamente della stessa quantità di cui la molla è stata compressa. Si raggiunge infine un allontanamento massimo tra traversa e tavolato nella configurazione di destra, nella quale è rappresentata la molla totalmente schiacciata e il nucleo del trasduttore alla sua massima estensione raggiungibile per motivi di montaggio; in questo caso non è possibile quantificare la forza che si sviluppa tra traversa e tavolato: è possibile solamente affermare che la forza in gioco è maggiore o uguale alla forza massima esercitabile dalla molla quando completamente compressa.

### 5.2.2. IL SISTEMA DI MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI DELLA TRAVERSA

Il sistema di monitoraggio delle deformazioni della traversa misura la distanza tra la superficie della traversa (approssimabile ad un arco di circonferenza) e un riferimento rettilineo esterno (assimilabile geometricamente ad una corda). Tramite semplici relazioni geometriche, dalla combinazione di misure fisse e misure variabili, si risale alle variazioni di curvatura della traversa.

#### 5.2.2.1. Il principio costruttivo

Per la misura delle distanze della traversa è stato progettato un ponticello da posizionare parallelamente alla traversa, strumentato con un numero di trasduttori variabile, montati perpendicolarmente al ponticello stesso e orientati con l'estremità del nucleo scorrevole che va a toccare sulla superficie della traversa.

#### 5.2.2.2. Accorgimenti progettuali

Il ponticello parallelo alla traversa è ancorato ad essa tramite due collegamenti: uno centrale e uno laterale. L'ancoraggio centrale è costituito da una colonna avvitata alla traversa e collegata perpendicolarmente al ponticello tramite un perno; l'ancoraggio laterale è effettuato tramite una biella. Questo metodo di collegamento è studiato per non irrigidire in alcun modo la traversa e consentire tutti i movimenti di flessione in risposta a variazioni di curvatura di imbarcamento del tavolato, e allo stesso tempo mantenere un sistema di riferimento rigido, posizionato ad una distanza nota dalla traversa.

Il numero di trasduttori da montare sul ponticello dipende dalla geometria di partenza della traversa: qualora la traversa risulti approssimabile ad un arco di circonferenza, è sufficiente inserire un solo trasduttore, ovvero un terzo punto di misura dopo i due ancoraggi noti; nel caso in cui invece la geometria si discosti significativamente da un arco di circonferenza, quanto più se ne allontana, tanto maggiore è il numero di trasduttori da posizionare lungo la traversa, per avere una descrizione delle sue deformazioni il più rappresentativa possibile.

#### 5.2.2.3. Componenti del sistema

Localizzati nel disegno di insieme riportato nella tavola 5.3, si elencano di seguito gli elementi che compongono il *sistema di monitoraggio della deformazione della traversa* (per ciascuno è riportato tra parentesi il riferimento alla tavola di dettaglio):

- 7) Ponticello in alluminio (tavola 5.9)
- 8) Traversina per ponticello in alluminio (tavola 5.10)
- 2) Portatrasduttore in alluminio (tavola 5.6)
- 3) Collarino per alloggiamento della molla del trasduttore in ottone (tavola 5.7)
- 9) Tastatore sferico in ottone (tavola 5.7)
- + Trasduttore
- + Molla a compressione per trasduttore

Localizzati nel disegno di insieme riportato nella tavola 5.4, si elencano di seguito gli elementi che compongono il *sistema di sostegno del ponticello* (per ciascuno è riportato tra parentesi il riferimento alla tavola di dettaglio):

- 10) Traversina per biella in alluminio (tavola 5.11)

- + 2 snodo sferici
- + 1 barra filettata
- 11) Ancoraggio per biella in alluminio (tavola 5.11)
- 12) Traversina laterale in alluminio (tavola 5.11)
- 13) Portaponticello in alluminio (tavola 5.12)
- 14) Ancoraggi (tavola 5.12)

Entrambi i sistemi di monitoraggio delle deformazioni e delle forze sono montati in aggetto sulla traversa, ancorati ad essa tramite viti a legno; in questo modo la traversa viene notevolmente appesantita e il suo baricentro viene allontanato dal tavolato, inducendo un movimento ribaltante che necessita di essere controbilanciato. Per ovviare a questo sbilanciamento è opportuno individuare il nuovo baricentro della traversa così strumentata e collegare questo punto ad un ancoraggio in alto, scelto lungo l'asse verticale del baricentro, tramite una semplice molla a trazione di lunghezza adeguatamente scelta per sostenere quello specifico carico. In questo modo il peso del sistema di monitoraggio non incide in alcun modo sulla traversa elastica e sul tavolato e non ne altera le dinamiche.

A partire da questo tipo di monitoraggio è possibile riuscire a calcolare le sollecitazioni a cui è sottoposto il tavolato e le sue deformazioni.

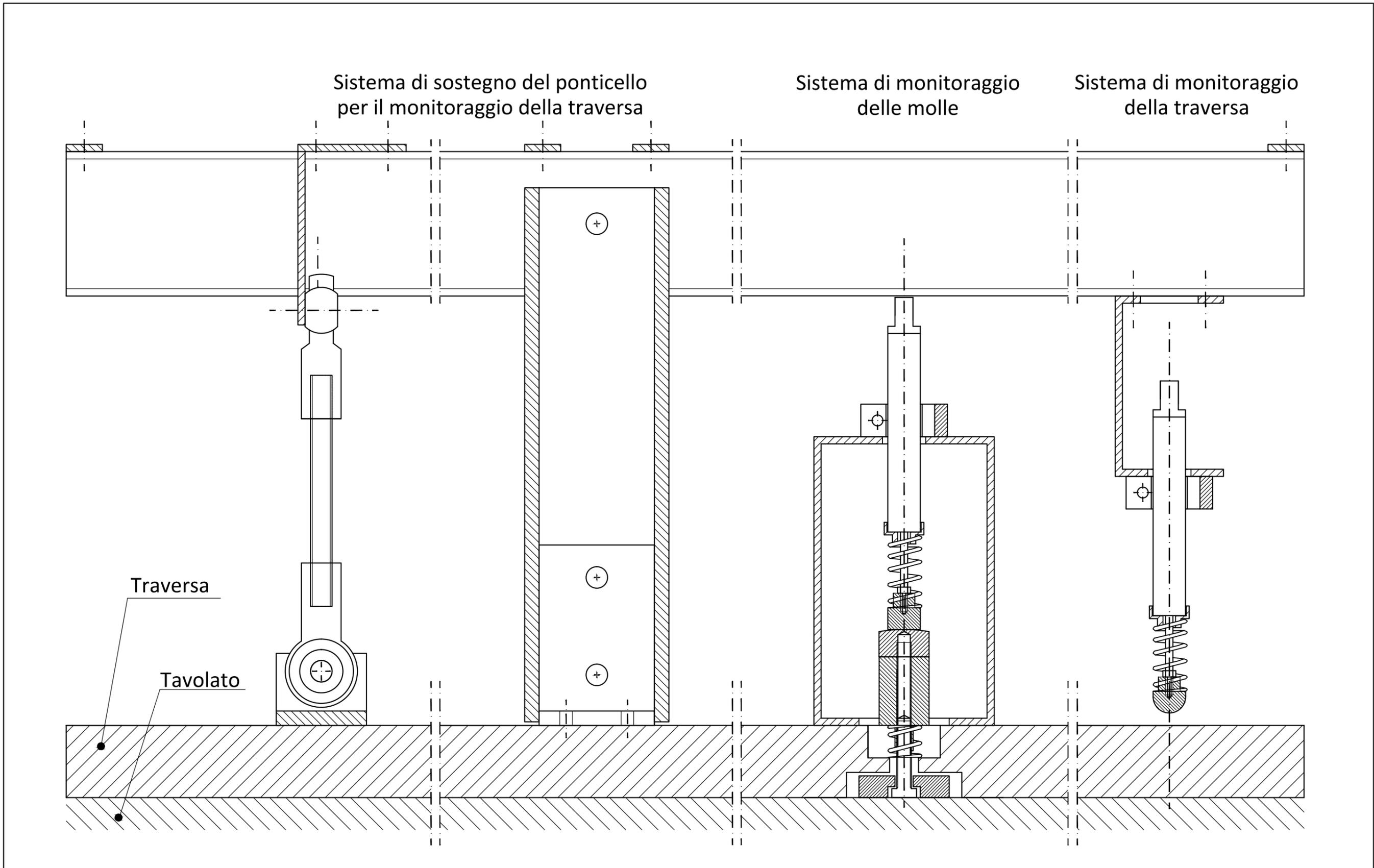


TAVOLA 5.1

Scala 1:1

Visione di insieme del sistema di monitoraggio



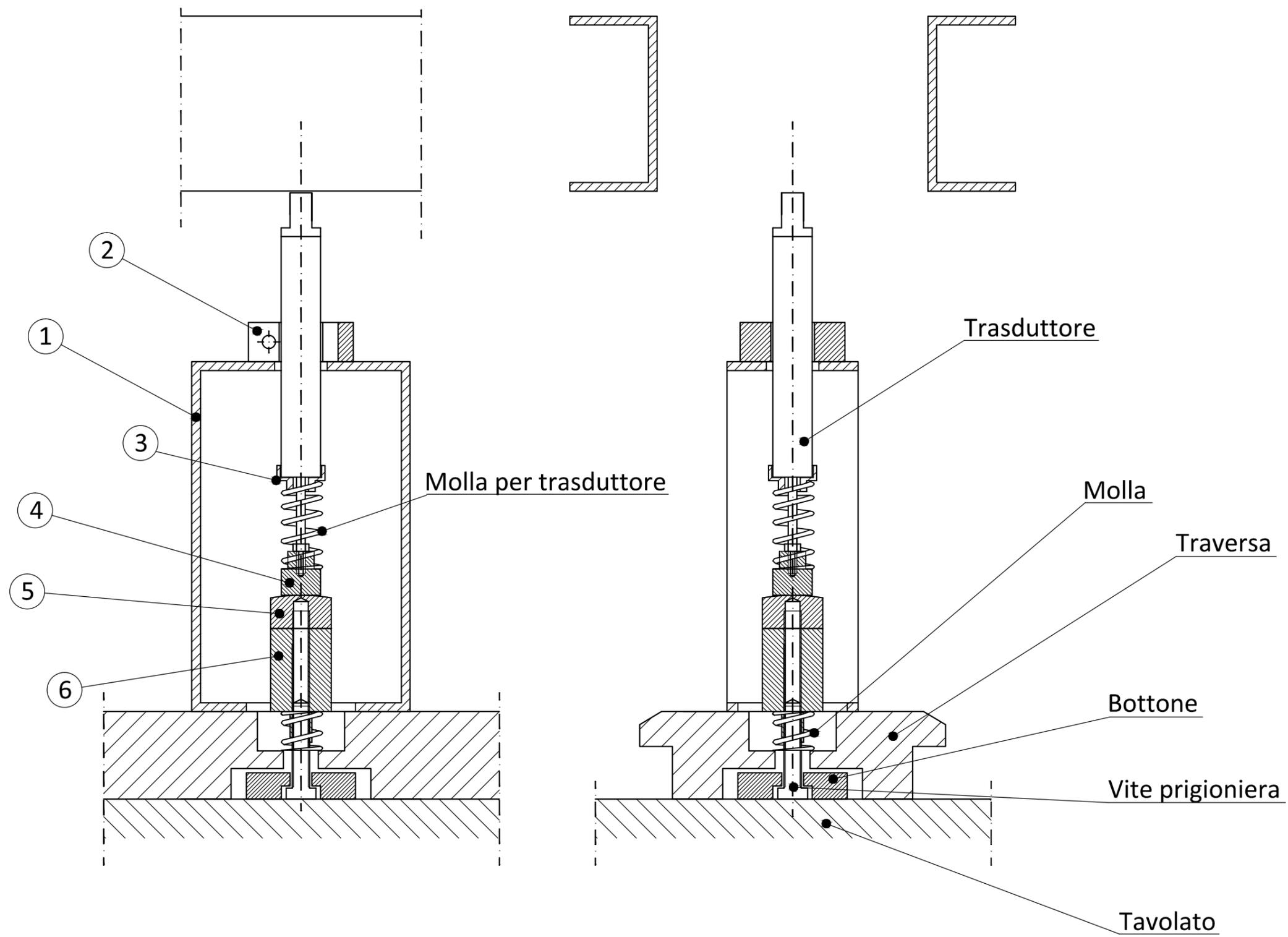


TAVOLA 5.2

Scala 1:1

Sistema di monitoraggio delle molle - assemblaggio



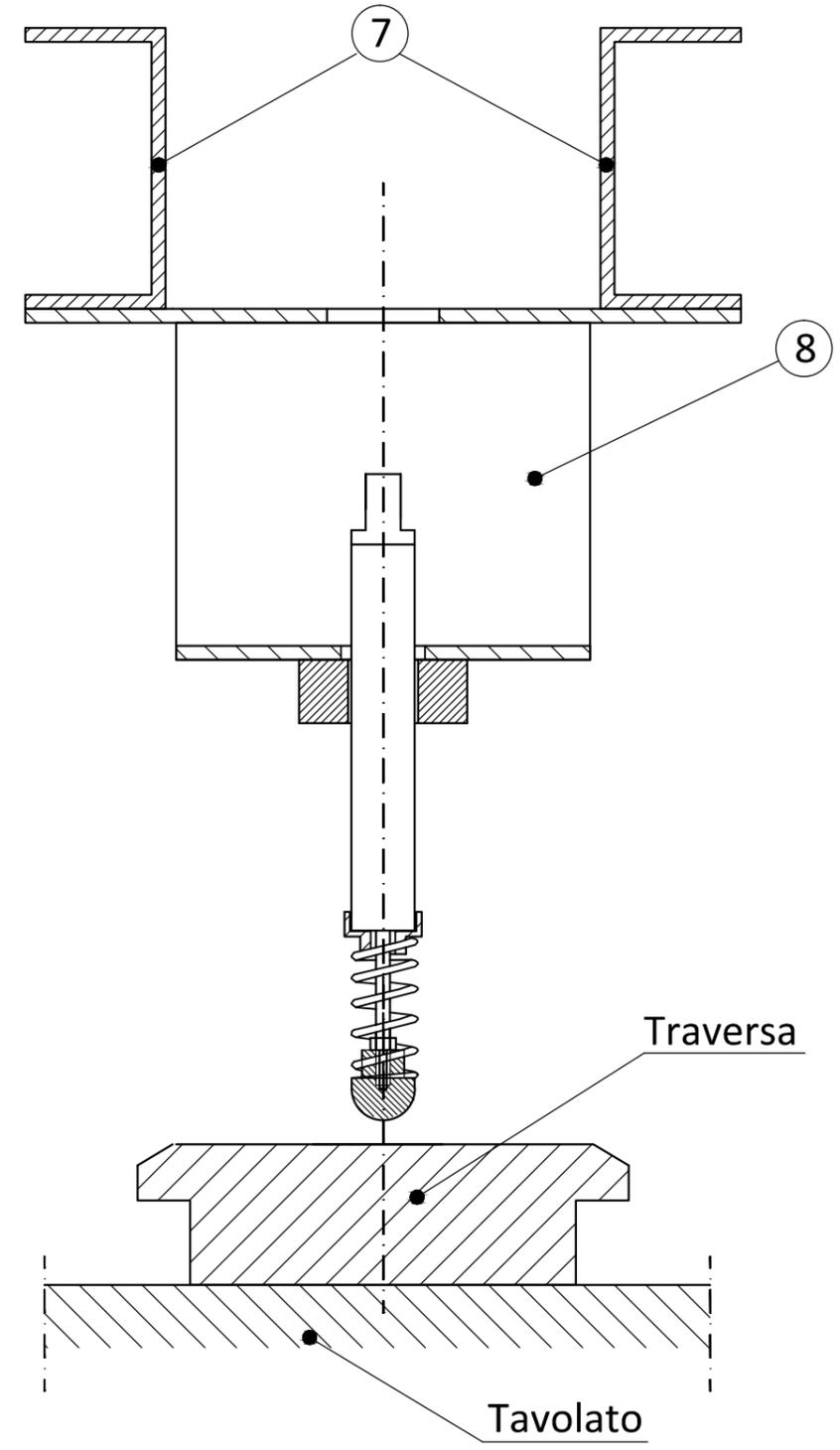
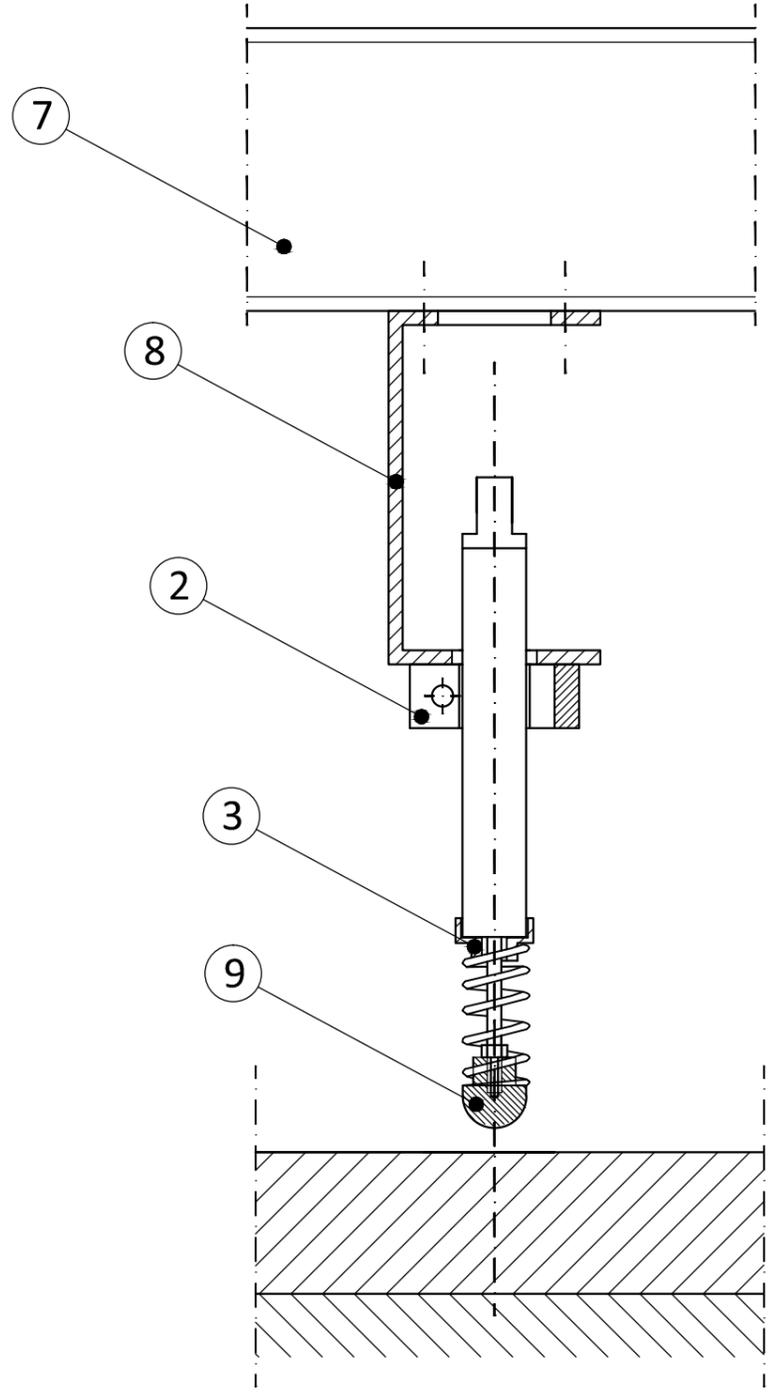


TAVOLA 5.3

Scala 1:1

Sistema di monitoraggio della traversa - assemblaggio



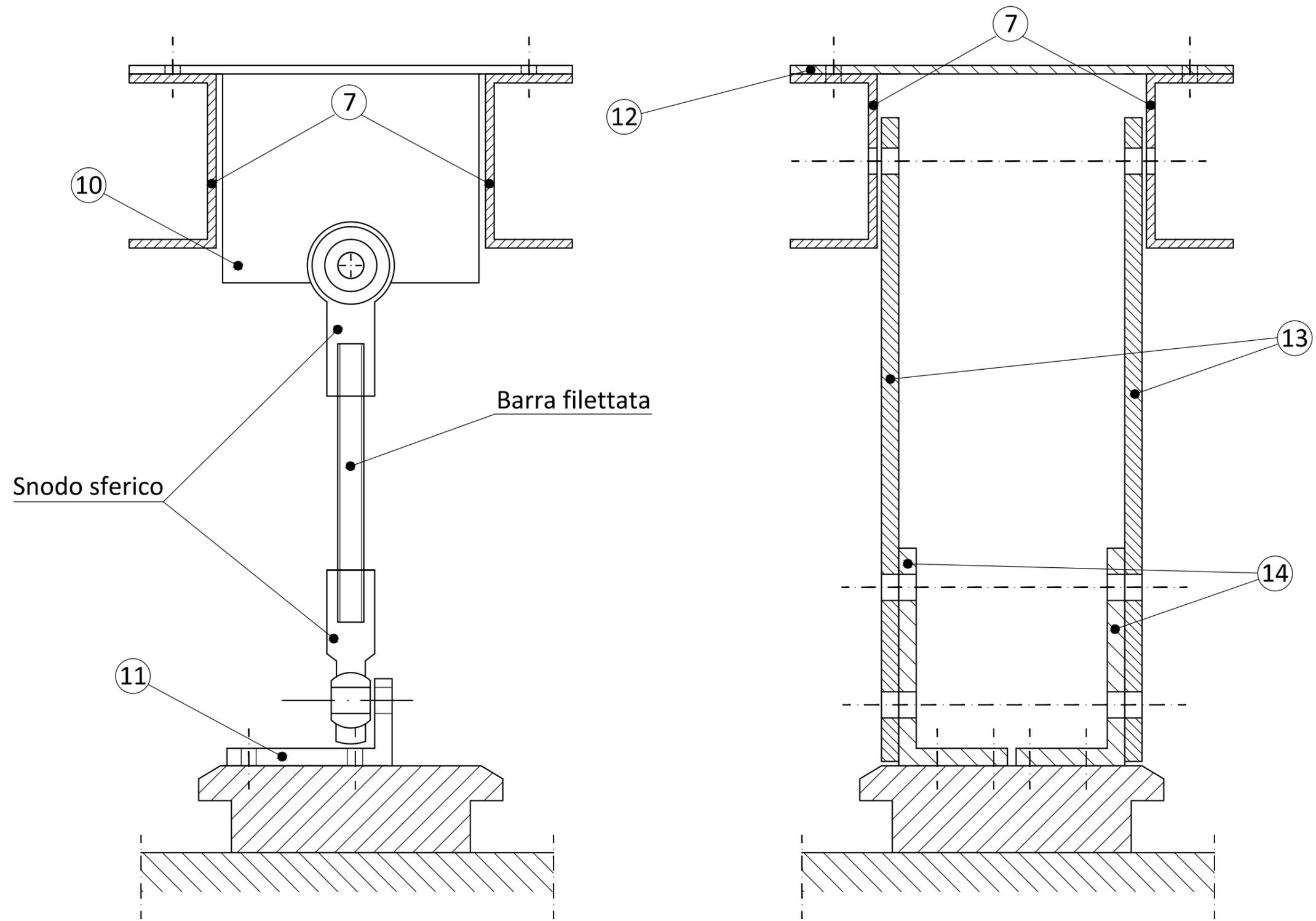


TAVOLA 5.4

Scala 1:1

Sistema di sostegno del ponticello

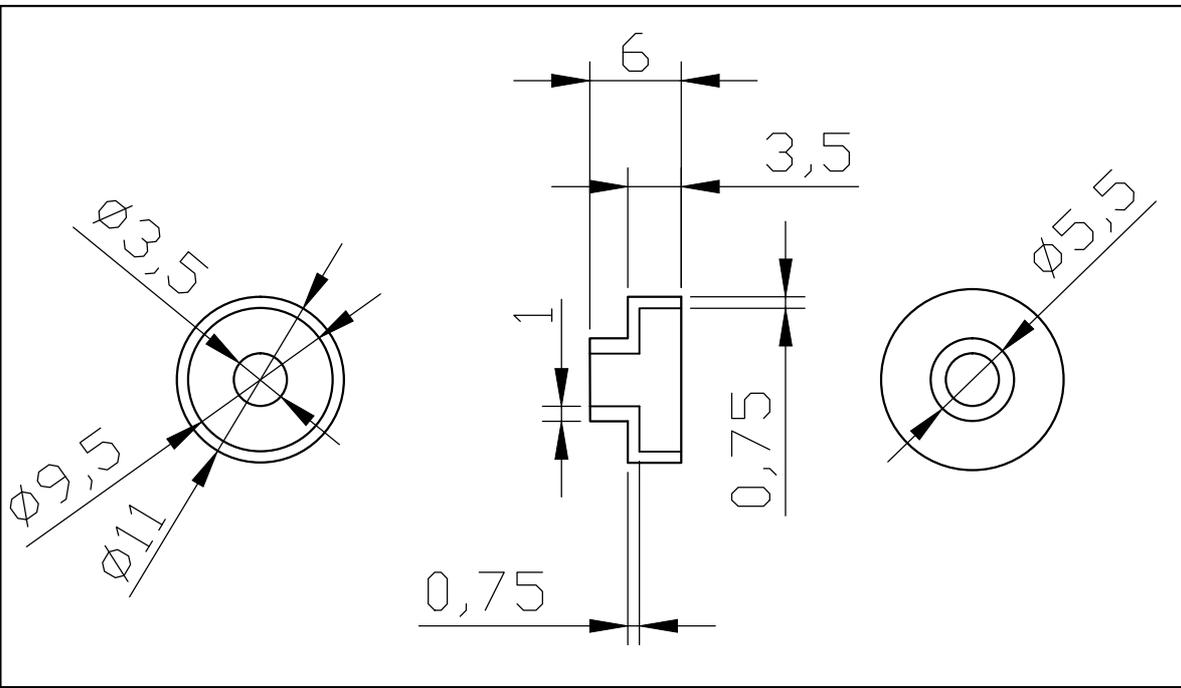




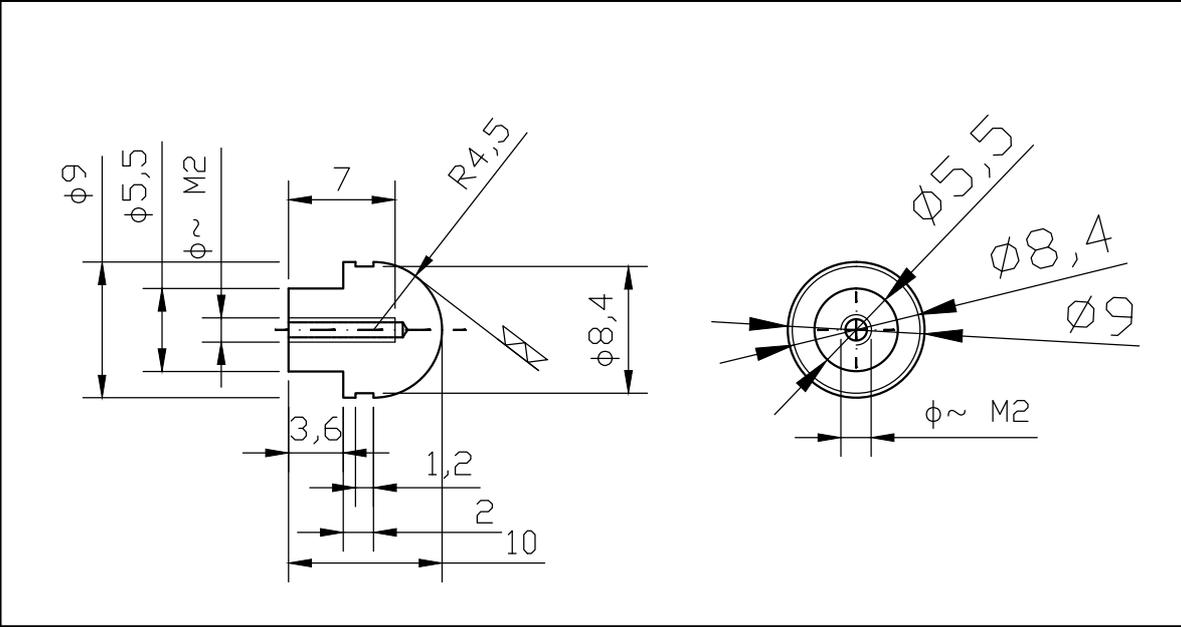




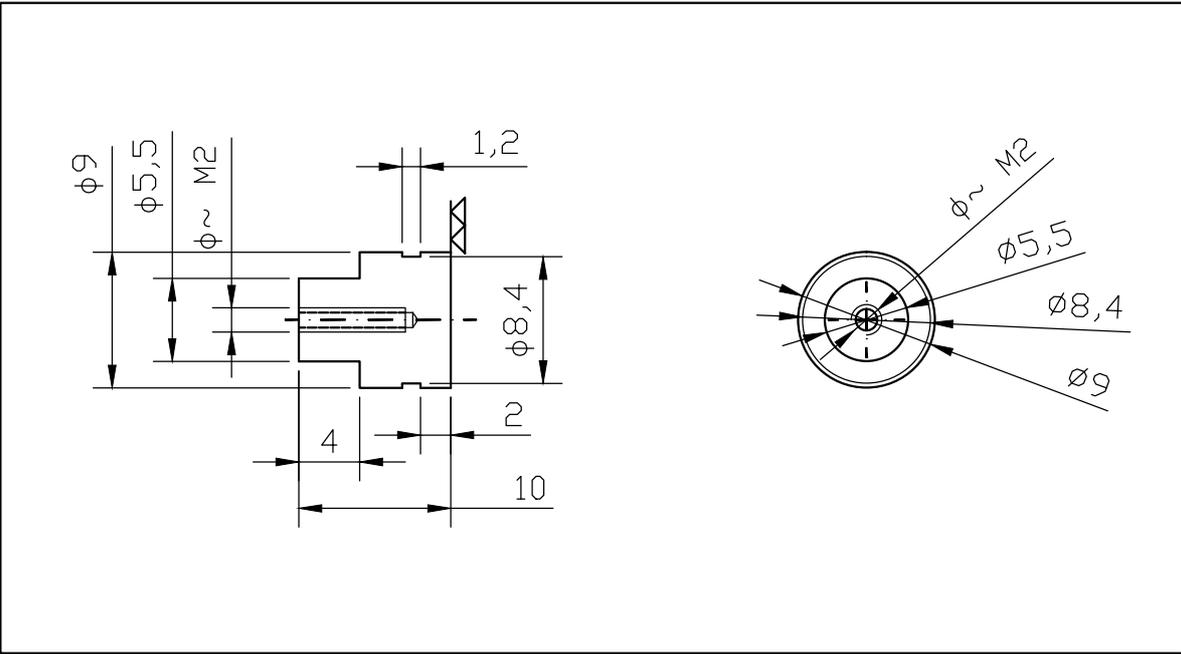




3. Collarino

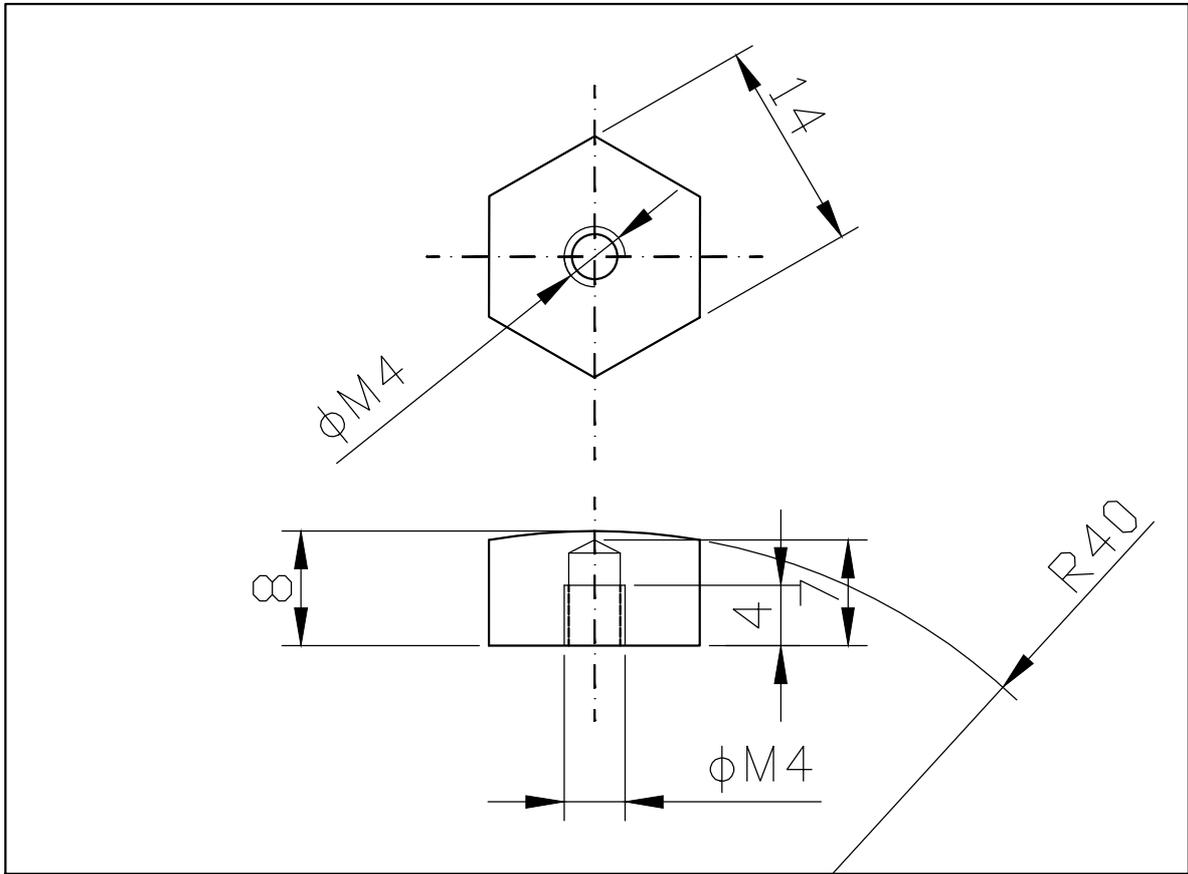


9. Tastatore sferico

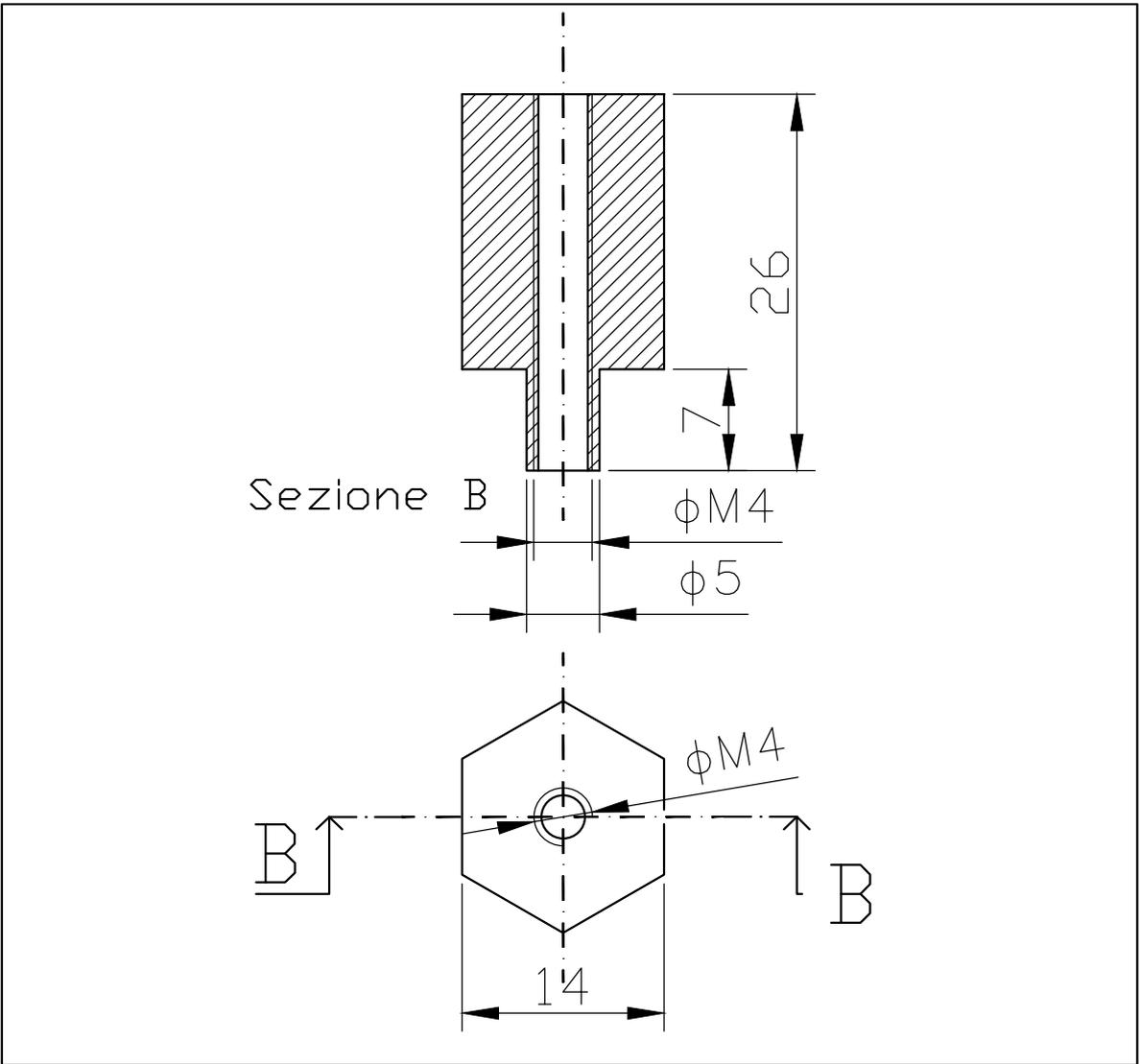


4. Tastatore





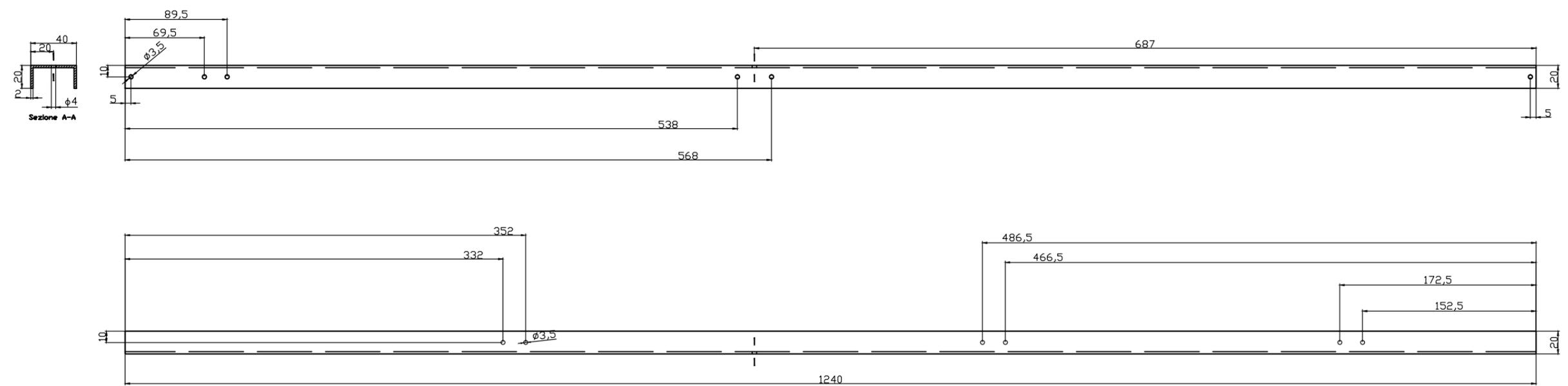
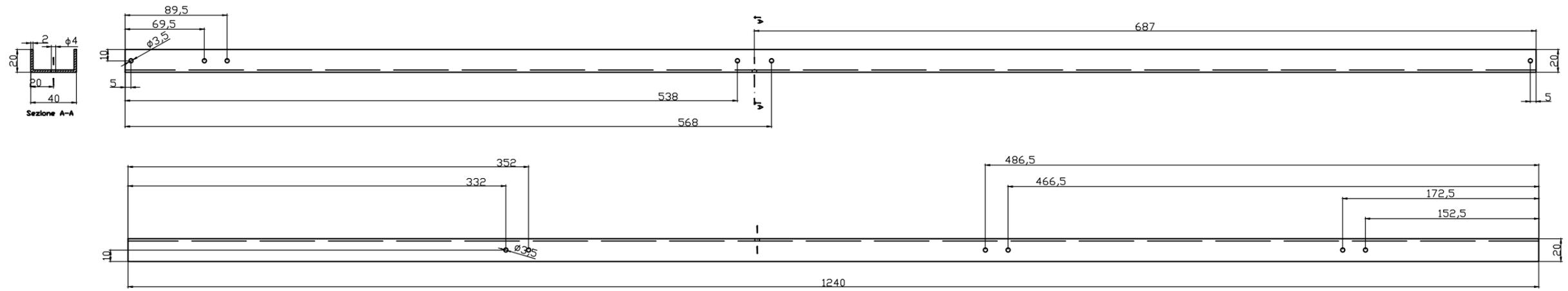
5. Calotta sferica per Dado



6. Dado

Scala 1:2





Alluminio

TAVOLA 5.9

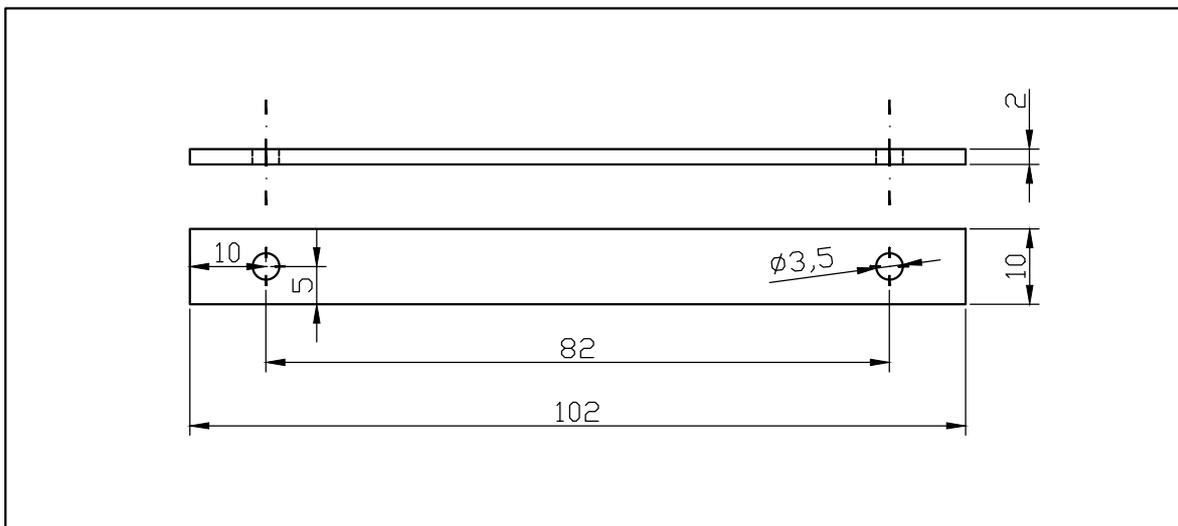
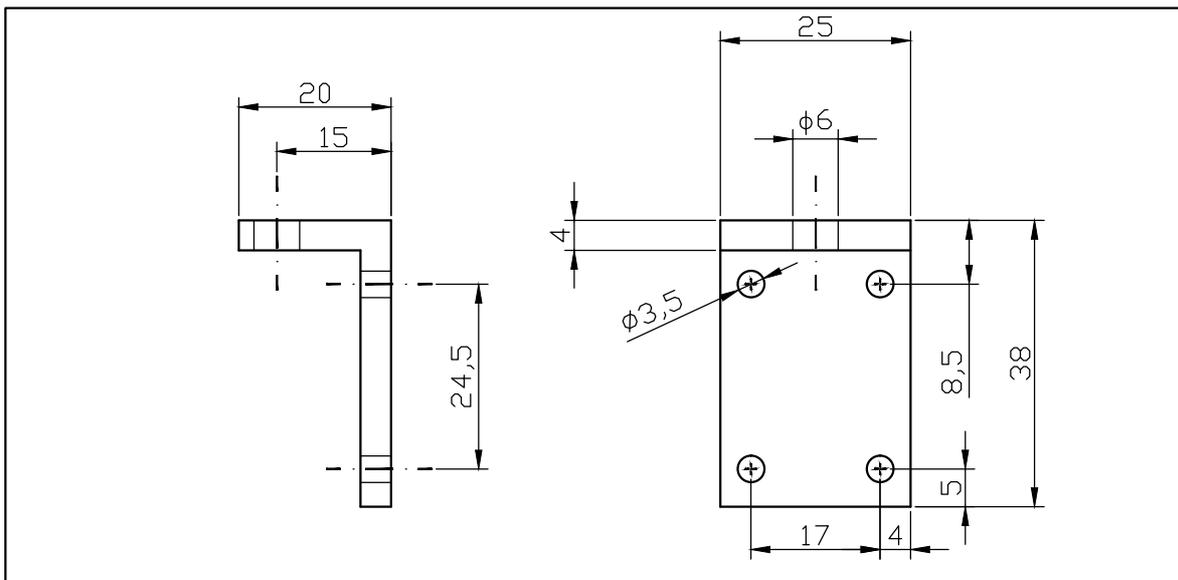
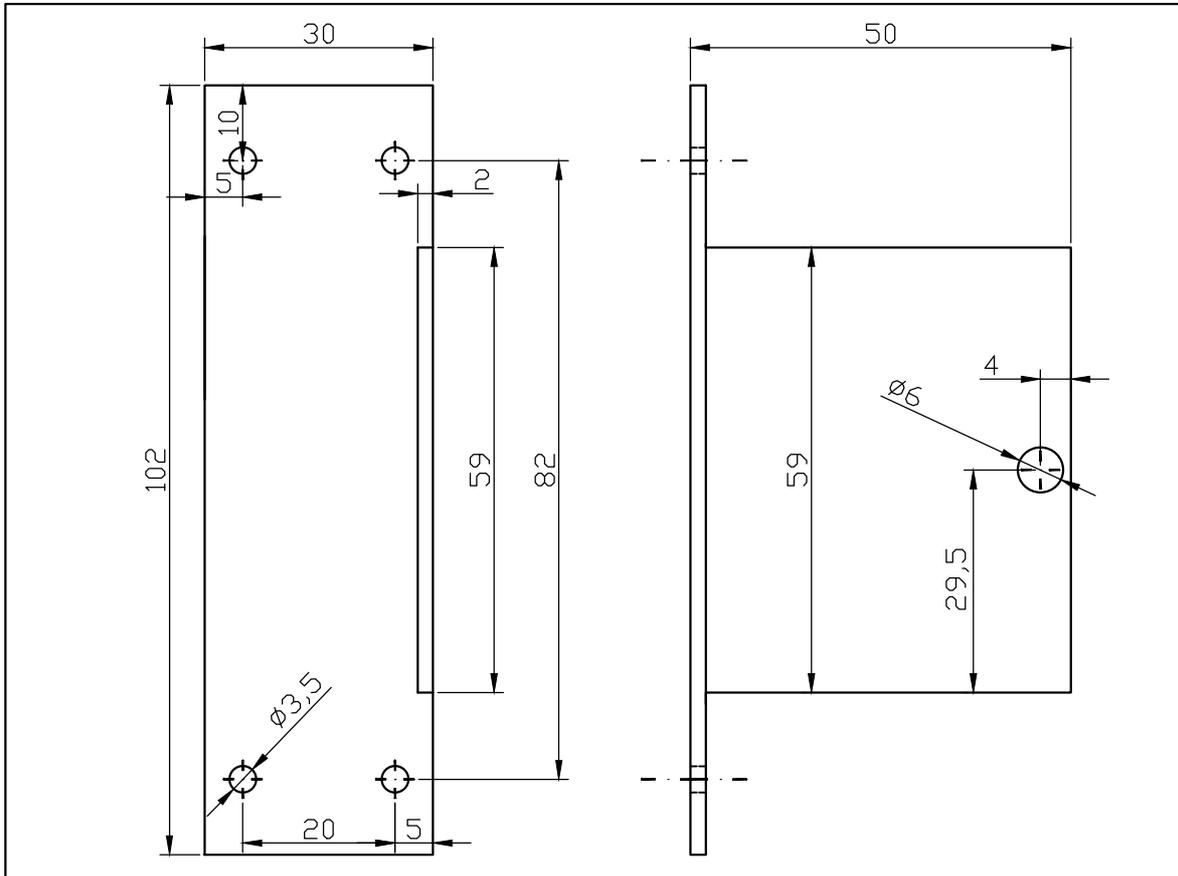
7. Ponticello

Scala 1:0,25









Alluminio

TAVOLA 5.11

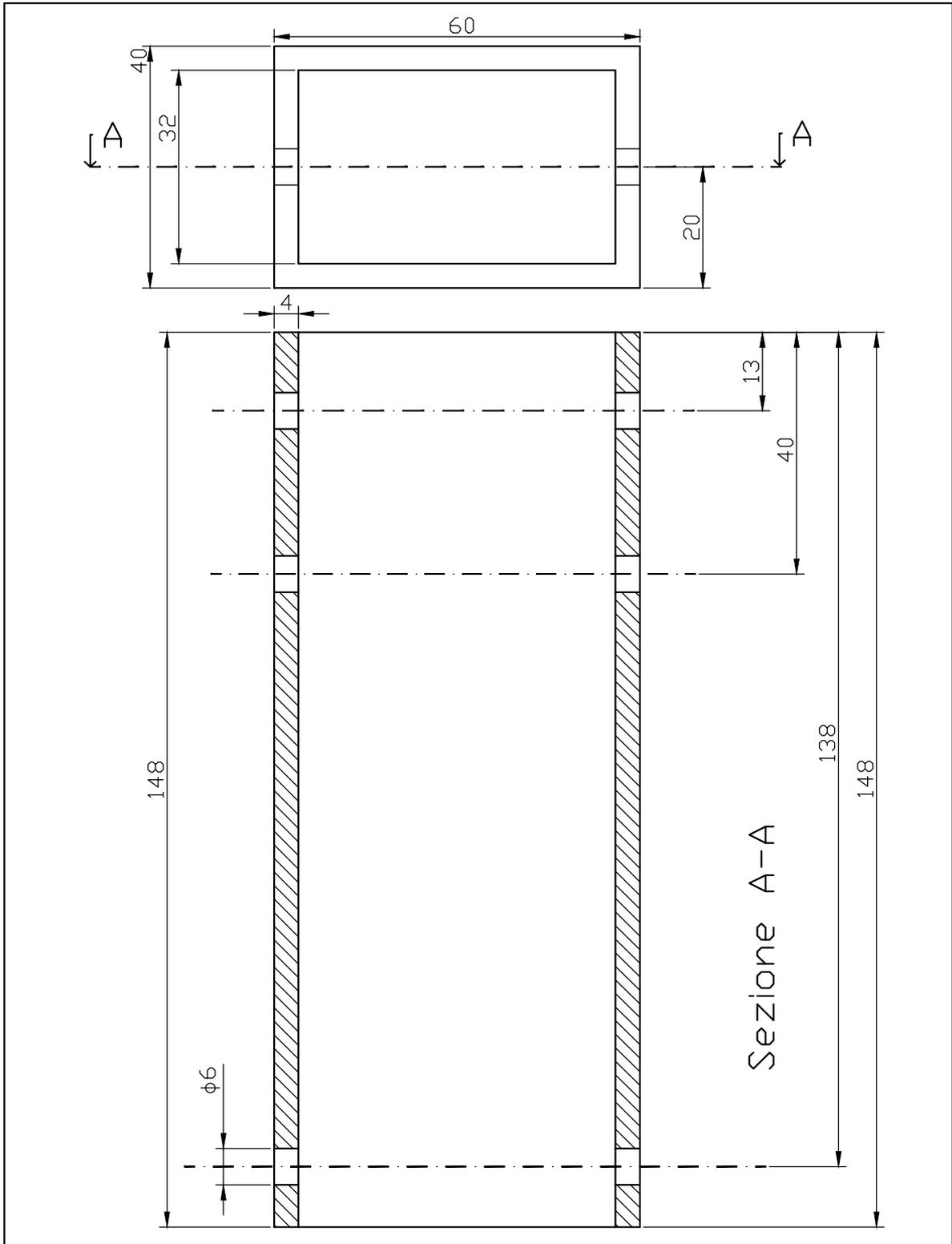
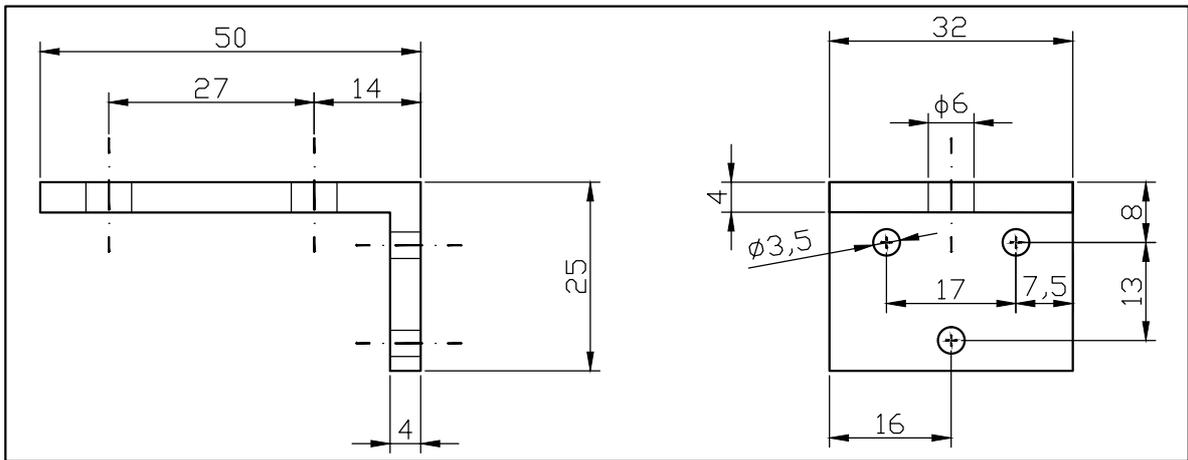
10. Traversina per biella

11. Ancoraggio per biella

12. Traversina laterale

Scala 1:1





Alluminio

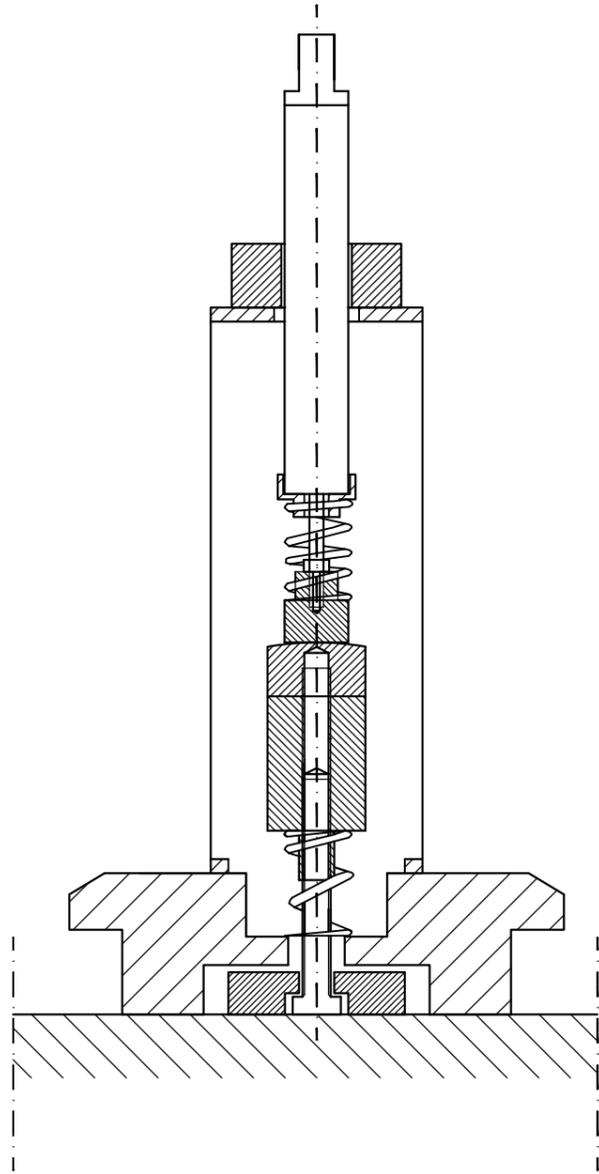
TAVOLA 5.12

Scala 1:1

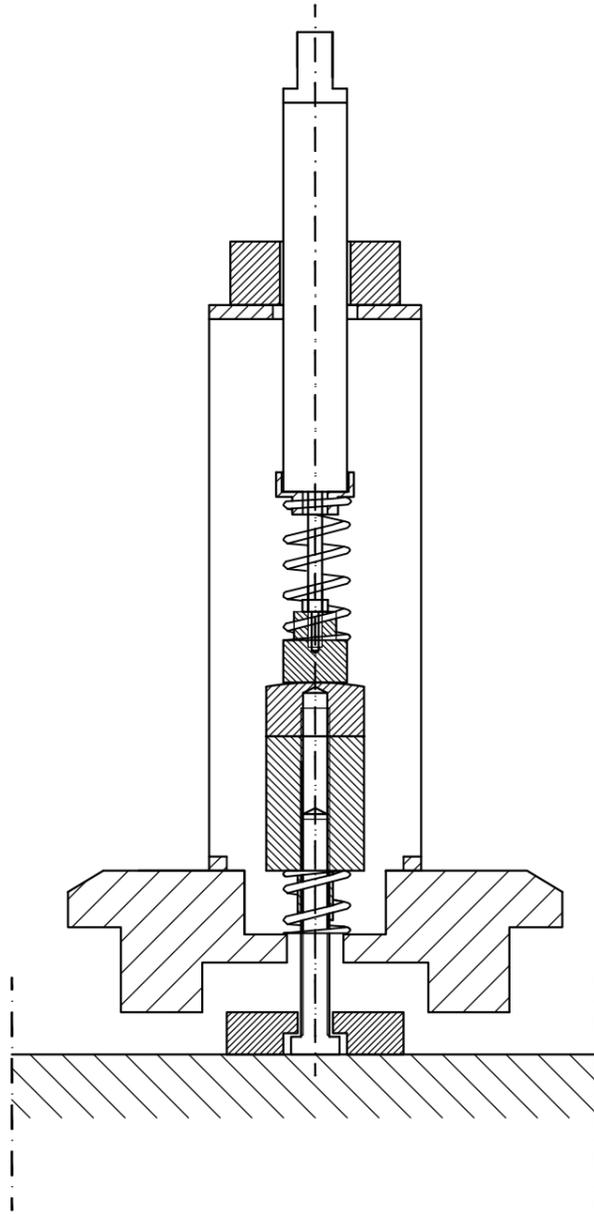
14. Ancoraggi

13. Portaponticello

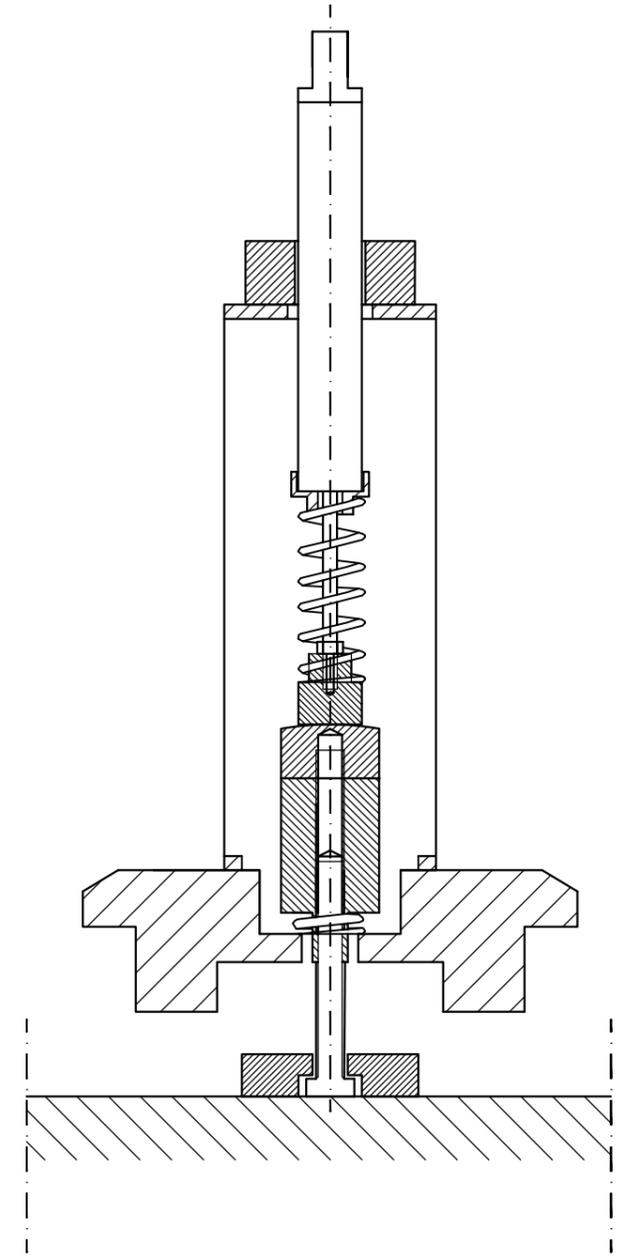




La traversa è a contatto con il tavolato.  
La molla è alla sua massima estensione e la forza esercitata è pari al precarico impostato.



La traversa si allontana dal tavolato.  
La molla si comprime e il nucleo del trasduttore si allunga.



La traversa è al massimo allontanamento dal tavolato.  
La molla è totalmente compressa e la forza esercitata dal sistema è maggiore o uguale al limite massimo della molla.

TAVOLA 5.13

Scala 1:1

Simulazione della dinamica tra traversa elastica e tavolato



### **5.3. LA METODOLOGIA DI VALUTAZIONE DELLE INTERAZIONI TRA TAVOLATO E PITTURA: UN PRIMO PASSO**

Per un restauro consapevole è indispensabile osservare un'opera a 360°, studiandone i singoli materiali e l'interazione tra essi: compito dei restauratori è individuare queste connessioni e operare su supporto e parte pittorica in modo integrato ed efficiente. Le metodologie di misura che finora sono state descritte sono finalizzate ad indagare il supporto e forniscono delle informazioni circa le relazioni tra tavolato e sistema di traversatura, quantificando le forze in gioco tra tavolato e traverse.

Un ultimo step di indagine, che completa le informazioni sul comportamento meccanico dell'opera studiata, consiste nell'individuare le relazioni tra i movimenti del supporto e quelli della pellicola pittorica. Benché negli ultimi anni il concetto di opera d'arte da tutelare si sia esteso anche al materiale e alla tecnica di realizzazione del supporto, il restauro della parte lignea deve comunque essere finalizzato ad una buona conservazione e fruizione della pittura stesa su di esso. Il monitoraggio del sistema di traversatura e la valutazione degli effetti di questo sul tavolato devono essere pertanto finalizzati all'individuazione di quali siano le condizioni in cui il tavolato possa costituire un supporto adeguato per una buona conservazione degli strati preparatori e pittorici, ovvero in quali condizioni il tavolato non induce movimenti dannosi nella parte pittorica. Un obiettivo che deve quindi essere raggiunto è l'individuazione di un metodo per definire e quantificare la connessione tra i movimenti del supporto e i danni che possono verificarsi sulla pellicola pittorica come conseguenza di questi movimenti.

Nel presente lavoro di ricerca si tenta un approccio a questa tematica, da un lato con la piena consapevolezza di non poter esaurire in questo primo passo l'ampiezza della problematica, dall'altro lato però con la forte intenzione di stabilire un punto di partenza per questa tipologia di indagini che studino e valutino le connessioni tra legno e pittura.

Si sceglie pertanto di adottare due metodologie consolidate di osservazione rispettivamente del supporto e della pellicola pittorica, e di associarle in corrispondenza della stessa area dell'opera, al fine di ricavare dati di deformazione sulle due superfici del dipinto, che possano essere comparabili. L'apporto innovativo di questa ricerca risiede nell'associazione di due tecnologie esistenti e nella loro modalità di impiego, finalizzata all'integrazione delle informazioni che si possono raccogliere su supporto ligneo e pittura di un dipinto su tavola.

Queste due tecnologie sono qui proposte come sistemi di monitoraggio rispettivamente di tavolato e di pittura e possono essere utilizzati a singolarmente, per raccogliere informazioni circa la modalità di risposta alle variazioni climatiche ambientali, oppure associati, in modo tale da mettere in relazione la ripercussione delle deformazioni del supporto sulla pittura. In entrambi i casi deve essere scelto il numero di aree da monitorare e la tipologia di osservazioni che si intende effettuare. Ad esempio, nel caso in cui si verificano eventi di danno sulla pellicola pittorica che si suppongono essere provocati da un movimento del supporto (come sollevamenti o crolli che interessino la preparazione), oppure, viceversa, qualora si presentino discontinuità o eventi di danneggiamento sul supporto che potrebbero ripercuotersi sul fronte, può essere opportuno monitorare in corrispondenza di queste aree contemporaneamente il movimento della pittura e il movimento del supporto. Il monitoraggio su due fronti è un primo passo per l'associazione delle dinamiche di movimento dei diversi materiali.

### 5.3.1. IL SISTEMA DI MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI DEL TAVOLATO: IL KIT DEFORMOMETRICO

Le deformazioni locali del tavolato possono essere monitorate con l'impiego di DK, ovvero "kit deformometrici" [32], semplici strumenti concepiti e realizzati presso il Dipartimento GESAAF dell'Università di Firenze, che vengono installati in modo totalmente non invasivo e reversibile direttamente sul retro del tavolato e che sono in grado di fornire i valori di ritiro/rigonfiamento e di angolo di imbarcamento di definite aree del supporto.

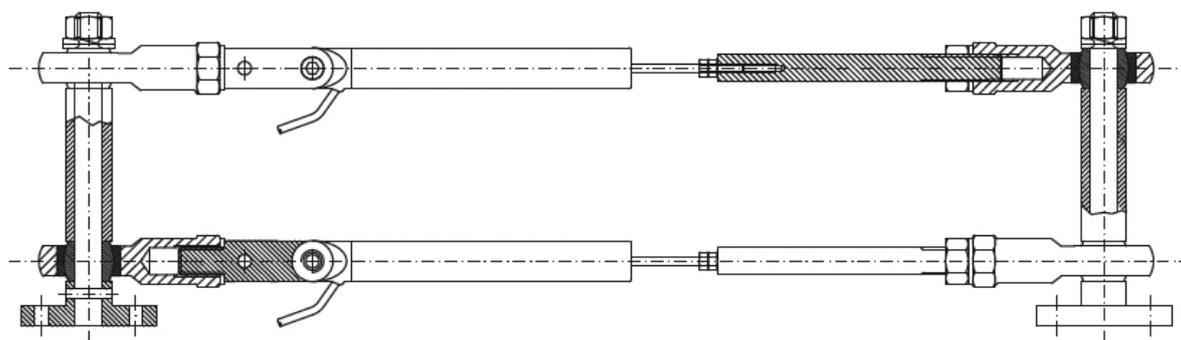
Il DK è costituito da due trasduttori di spostamento montati su due colonnine di alluminio in posizioni tali che la loro congiungente risulti in direzione perpendicolare alla fibratura delle tavole: i movimenti del tavolato sono trasmessi ai trasduttori tramite le due colonne che si avvicinano/allontanano in caso di ritiro/rigonfiamento e si inclinano in caso di imbarcamento (immagine 5.1). La combinazione dei segnali dei due trasduttori può fornire molti parametri, tramite semplici relazioni geometriche che si basano sulle seguenti ipotesi:

- l'imbarcamento locale delle tavole è approssimabile ad un arco di circonferenza,
- lo spessore del tavolato non varia in modo significativo in seguito a variazioni igrometriche,
- lungo lo spessore del tavolato le sezioni rimangono piane e perpendicolari alle superfici.

I parametri generalmente più interessanti che è possibile calcolare e monitorare con la frequenza e la durata volute (tipicamente ogni 15-30 minuti, per settimane, mesi o anche anni) con un DK sono i valori di angolo di imbarcamento e di ritiro/rigonfiamento delle superfici lignee sia sul retro sia immediatamente sotto la preparazione pittorica.

I DK possono essere progettati e realizzati con diverse lunghezze, a seconda delle dimensioni dell'area che si intende monitorare. Come dimensione di riferimento, la configurazione standard consente la misura delle deformazioni che si verificano lungo una linea di 25-30cm trasversalmente alla fibratura; questa lunghezza spesso può essere idonea sia per ottenere misure rappresentative del comportamento di gran parte del tavolato, sia per raccogliere informazioni circa un'area specifica che presenti caratteristiche notevoli.

In funzione delle dimensioni scelte variano le caratteristiche tecniche di risoluzione e accuratezza, calcolate per ciascun parametro dedotto dal DK.



**Immagine 5.1.** Disegno tecnico di un kit deformometrico [32].

### 5.3.2. IL SISTEMA DI MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI DELLA PITTURA: LA MICROPROFILOMETRIA CONOSCOPICA A SCANSIONE

I movimenti della parte pittorica possono essere monitorati tramite una sequenza di acquisizioni ottiche effettuate in tempi definiti e significativi da un punto di vista dei movimenti lineari: è consigliabile procedere con acquisizioni ottiche quando l'opera ha raggiunto la maggiore deformazione in conseguenza ad una variazione climatica significativa. Le immagini acquisite secondo questo criterio possono essere confrontate: da questo confronto è possibile quantificare la ripercussione del movimento del supporto ligneo sullo strato pittorico più esterno, ovvero sia l'unico strato visibile.

La metodologia che si è scelto di adottare per questo tipo di acquisizioni è la microprofilometria conoscopica a scansione, ovvero una tecnica interferometrica per il rilievo tridimensionale [33]. L'immagine tridimensionale è fornita dal percorso compiuto da un raggio di luce laser attraverso un cristallo birifrangente uniaassiale posto tra due polarizzatori circolari: un diodo laser proietta un sottile fascio di luce sull'oggetto, la radiazione da esso diffusa incide sul cristallo che dà origine a due fasci (ordinario e straordinario) che percorrendo due cammini ottici differenti generano la figura d'interferenza, le cui caratteristiche dipendono dall'angolo di apertura del fascio diffuso e quindi dalla distanza tra sonda e campione (immagine 5.2). La tridimensionalità è quindi fornita dal ritardo registrato tra i due fasci: dall'analisi di queste frange d'interferenza, ovvero dalla misura del loro passo, è possibile risalire con precisione alla distanza del punto sotto indagine.

La strumentazione adottata per il presente lavoro di ricerca è stata realizzata dal Gruppo Beni Culturali (GBC) dell'Istituto Nazionale di Ottica (INO) ed è costituito da una sonda conoscopica commerciale (Conoprobe, Optimet) montata su due traslatori motorizzati ad alta precisione (0,1micron) che permettono di effettuare scansioni di area massima 280x280mm<sup>2</sup>.

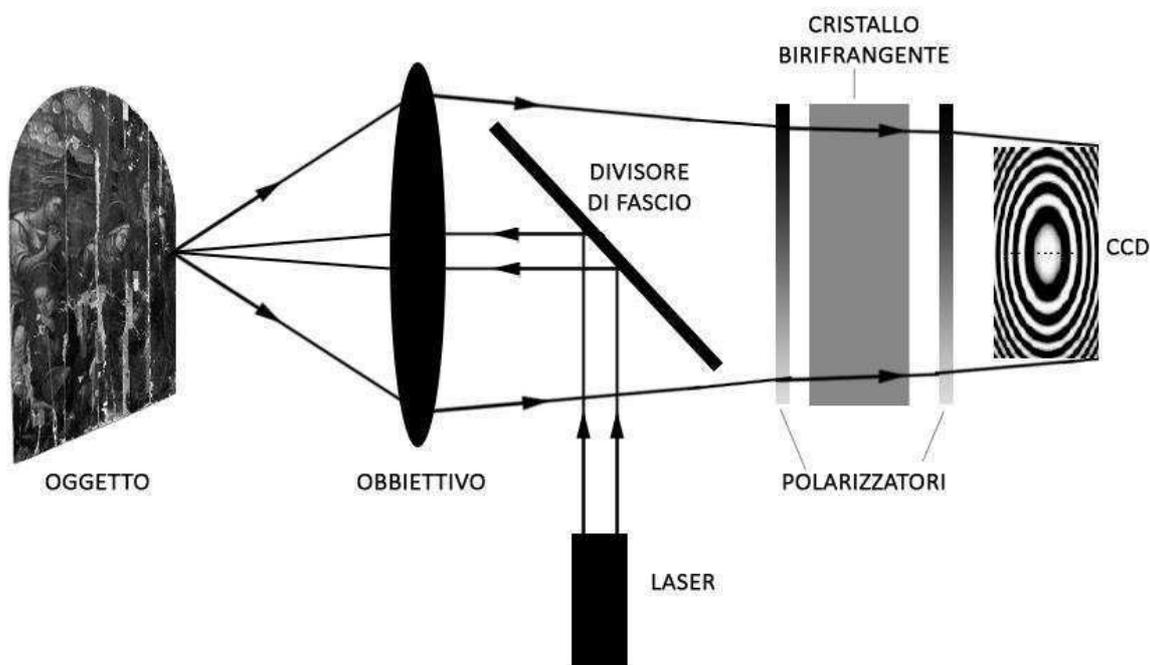


Immagine 5.2. Schema di funzionamento della sonda conoscopica [33].

L'accuratezza dello strumento è di circa 6micron, la risoluzione in quota circa 1micron, mentre quella trasversale è circa 20micron; la distanza di lavoro è circa 40mm e l'intervallo utile di ripresa circa 8mm. In funzione dei parametri di scansione la velocità di acquisizione varia da 100 a 400 punti al secondo. Il dispositivo infine è in grado di rilevare oggetti con superfici praticamente di qualsiasi riflettività fino ad un angolo d'incidenza quasi radente.

### **5.3.3. COMBINAZIONE DELLE RILEVAZIONI SUL FRONTE E DI QUELLE SUL RETRO**

I due sistemi sopra descritti forniscono informazioni circa i movimenti della superficie lignea immediatamente sotto gli strati preparatori e i movimenti dello strato pittorico più esterno. L'eventuale discrepanza registrata tra queste due misurazioni potrebbe fornire indicazioni riguardo a ciò che accade nello spessore non indagato direttamente, compreso tra le due superfici monitorate, ovvero gli strati preparatori.

La preparazione pittorica svolge un ruolo di interfaccia tra il supporto ligneo e la pittura, con la funzione di smorzare i movimenti del tavolato in risposta alle variazioni di umidità dell'ambiente e ridurre lo stress a cui è sottoposta la pellicola pittorica; d'altro canto la preparazione stessa, essendo composta di materiali igroscopici (gesso e colla), subisce a sua volta ritiri e rigonfiamenti in funzione delle variazioni di umidità dell'ambiente [34].

Tali comportamenti della preparazione pittorica possono dipendere dallo spessore, dalla modalità di stesura, dalla composizione e dallo stato di conservazione e variano di opera in opera. Il movimento della pellicola pittorica che viene letto tramite il paragone di due immagini acquisite con sonda conoscopica è il risultato della somma dei contributi del movimento del supporto ligneo e del movimento della preparazione pittorica. Al fine di comprendere le dinamiche di movimento ai diversi livelli stratigrafici, può essere opportuno cercare di distinguere e quantificare le origini dei movimenti, con un'approssimazione legata alla sensibilità dello strumento utilizzato. I due contributi di movimento possono essere distinti basandosi sull'anisotropia del legno: come visto nel capitolo 1 il ritiro del legno in direzione longitudinale può essere considerata praticamente nullo, se paragonata all'entità di risposta in direzione trasversale. Il movimento della pellicola pittorica che si può leggere in direzione longitudinale può pertanto essere in prima approssimazione interamente attribuito alla risposta igroscopica della preparazione; per le acquisizioni sul fronte quindi, sottraendo il movimento in direzione longitudinale da quello in direzione trasversale si dovrebbe ritrovare il solo effetto di ritiro/rigonfiamento del supporto ligneo.

In conclusione, se i due sistemi di monitoraggio - del legno e della pittura - sono applicati ad una stessa zona di interesse, osservata dal retro e dal fronte, è possibile mettere a confronto i movimenti del supporto e della pittura misurati in determinati istanti, per quantificare l'entità della ripercussione del movimento del tavolato sulla parte pittorica e dedurre se il filtro della preparazione pittorica ha eventuali effetti di smorzamento o di amplificazione dei movimenti sulla pittura.

## 6. CASO DI STUDIO: PROCEDURA DI VALUTAZIONE DELLA TRAVERSATURA CON MOLLE DEL DIPINTO SU TAVOLA

*Deposizione dalla Croce* di Anonimo Abruzzese XVI sec.

La procedura di valutazione proposta nel presente lavoro di ricerca è stata applicata su di un caso di studio, allo scopo di validare la sequenza e verificare la praticità delle fasi di lavoro, in un contesto di restauro appena effettuato.

Il dipinto su tavola su cui sono state effettuate le misure fisico-meccaniche raffigura una *Deposizione dalla Croce* ed è attribuito ad un Anonimo Abruzzese del XVI sec. (tavola 6.1). Tale dipinto proviene dal Museo Nazionale de L'Aquila e fu notevolmente danneggiato dal terremoto che colpì la città nel 2009: l'opera cadde a terra, staccandosi dai suoi agganci e fu colpita e sepolta da pietre e calcinacci; fu ritrovata scomposta in nove parti, in alcune zone il tavolato si era separato lungo le committiture, in altre le assi si erano spezzate trasversalmente alla fibratura. Prima di procedere con l'intervento di restauro, i frammenti sono stati lasciati separati per circa 3 anni, conservati in magazzino, totalmente liberi di muoversi in risposta alle variazioni termoigrometriche ambientali. Nel contesto del *Progetto Sisma* organizzato dal Ministero per i Beni e le Attività Culturali, il dipinto è stato restaurato presso OPD di Firenze: dopo una opportuna fermatura del colore, sono stati ricongiunti i singoli frammenti tramite incollaggio di tasselli di pioppo invecchiato con collante vinilico lungo le linee da riconnettere. Dal momento che le traverse originali erano andate perdute durante il sisma, i restauratori hanno scelto di realizzare tre nuove traverse, ognuna delle quali composta da tre listelli di legno di rovere incollati con epossidica, lavorate con la stessa curvatura della tavola e ancorate al tavolato con un sistema elastico regolabile [35].

In seguito all'installazione delle tre traverse è stata richiesta una consulenza scientifica al fine di quantificare e valutare le forze esercitate sul tavolato dal sistema di traversatura. È in questo contesto che è stata applicata la procedura di valutazione della traversatura con molle, descritta nel capitolo 3. Di seguito si illustra in dettaglio ogni fase di lavoro di valutazione affrontata sulla *Deposizione dalla Croce* dell'Anonimo Abruzzese.



## L'intervento sul supporto ligneo della *Deposizione dalla Croce* di Anonimo abruzzese proveniente dal Museo Nazionale dell'Aquila



Prima immagine da sinistra: La tavola recuperata a pezzi immediatamente dopo il sisma nei primi giorni di aprile 2009.

Seconda immagine da sinistra: Il retro del tavolato con gli ancoraggi delle traverse e gli spessori messi a colmare gli spazi vuoti; sul tavolato sono appoggiate le tre traverse girate con la faccia interna a vista.

Prima immagine da sinistra: il retro del tavolato dopo la ricongiunzione dei frammenti: sono visibili le zone ricostruite con tassellatura e risanate con cunei stretti.

Seconda immagine da sinistra: il retro del tavolato al termine del restauro del supporto: sono visibili i tre sistemi di traversatura elastici. Il colorito è dovuto alla stesura di permetrina e cera microcristallina.

Terza immagine da sinistra: la tavola assemblata vista dal fronte.



Fotografie estratte da: Ciani Passeri F., Orata L., Rossi Scarzanella C., Santacesaria A. (2012). Il recupero della tavola dipinta distrutta dal terremoto dell'Aquila. L'intervento sul supporto ligneo della Deposizione di Anonimo abruzzese proveniente dal Museo Nazionale dell'Aquila. OPD RESTAURO n.24, pag. 139-148



## 6.1. CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DELLE TRAVERSE

Impiegando la metodologia e la strumentazione illustrata nel sottoparagrafo 4.1.1 sono state effettuate prove a flessione sulle tre traverse. Le traverse sono state sollecitate a flessione secondo la metodologia:

- Prova a flessione a tre punti
- Carico massimo imposto di circa 100N, misurato con cella di carico a taglio e acquisito con scheda National Instruments
- Interasse tra gli appoggi pari a 1114mm per le traverse centrale e inferiore e 940mm per la traversa superiore (più corta delle altre due).

In queste prove la freccia di inflessione è stata misurata attraverso il numero di giri effettuato dalla barra filettata attraverso la quale si impone la deformazione: il passo della vite di diametro  $\varphi 6\text{mm}$  corrisponde a 1mm, il che significa che un giro della barra impone una freccia di 1mm. È da tener presente però che tale barra è passante per la cella di carico a taglio, la quale a sua volta subisce una deflessione provocata dalla forza che sta misurando: i valori di freccia misurati sono pertanto stati opportunamente corretti in funzione della deflessione della cella di carico per i corrispondenti carichi applicati.

Sono stati acquisiti dati in fase di carico e in fase di scarico e sono state effettuate più ripetizioni per ciascun oggetto caratterizzato. Sono stati quindi elaborati dei grafici carico/freccia dai quali è stato possibile estrapolare un coefficiente angolare medio  $m$  caratteristico di ciascun oggetto sollecitato.

La prova a flessione effettuata sulle traverse è correttamente associabile all'inflessione di una trave: è possibile pertanto applicare all'elaborazione dei dati acquisiti sulle traverse, le relazioni che descrivono il comportamento meccanico di una trave.

Data la formula:

$$E * I = \frac{m * l^3}{48} \quad .6.1$$

Con  $E$ : modulo di elasticità [N/mm<sup>2</sup>]

$I$ : momento di inerzia [mm<sup>4</sup>]

$l$ : distanza tra i centri degli appoggi [mm]

$m$ : coefficiente angolare della retta carico/freccia [N/mm]

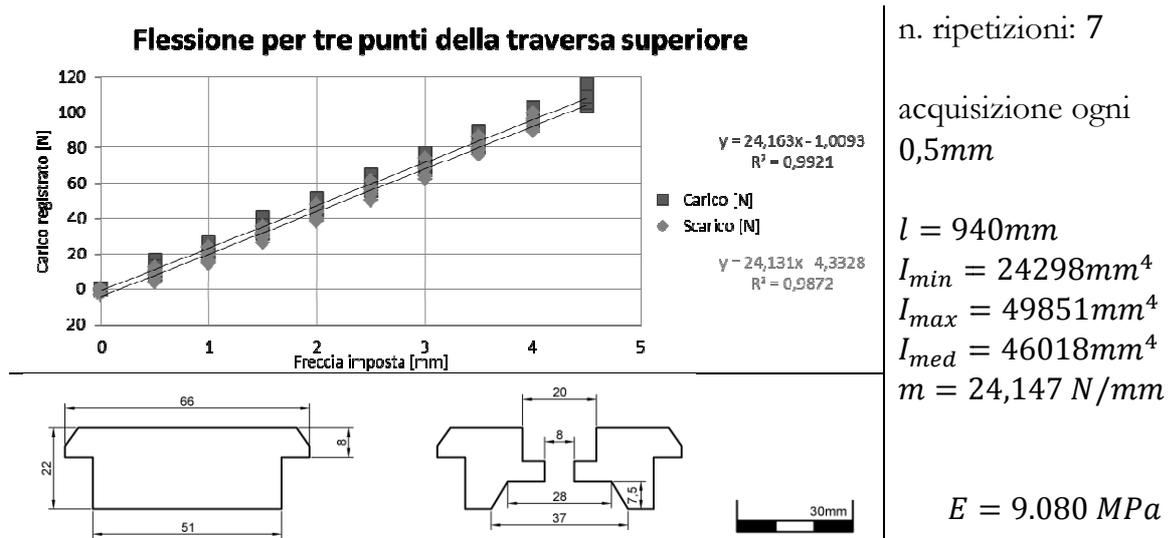
Il modulo di elasticità  $E$  di una trave è dato da:

$$E = \frac{m * l^3}{I * 48} \quad .6.2$$

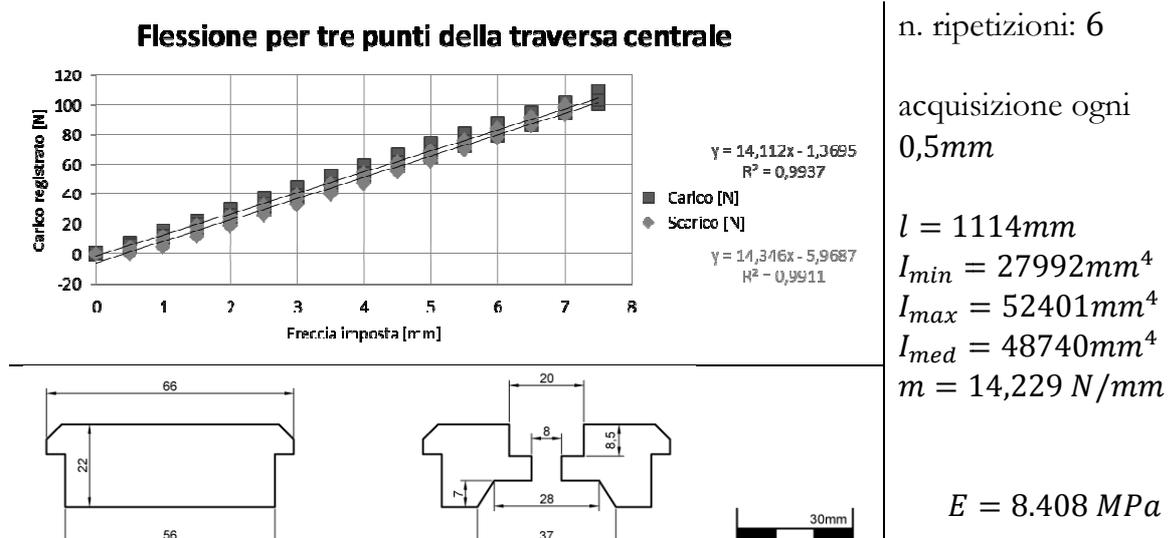
Il valore del momento di inerzia è strettamente legato alla geometria delle traverse, e nello specifico, alla sezione. La sezione delle traverse però non è omogenea, bensì articolata, a causa di una distribuzione dei fori per l'alloggiamento delle molle localizzati a distanza irregolare. Per calcolare dei momenti di inerzia che siano effettivamente rappresentativi delle traverse, si individuano per ciascuna traversa due sezioni limite: la *minima* in corrispondenza del centro del foro, e la *massima* in corrispondenza di una zona non forata;

per entrambe queste sezioni si calcolano i momenti di inerzia  $I_{min}$  e  $I_{max}$ . Si stima una percentuale di presenza lungo la traversa sollecitata per ciascuna di queste due sezioni e si calcola un momento di inerzia della traversa come media ponderata di  $I_{min}$  (15%) e  $I_{max}$  (85%).

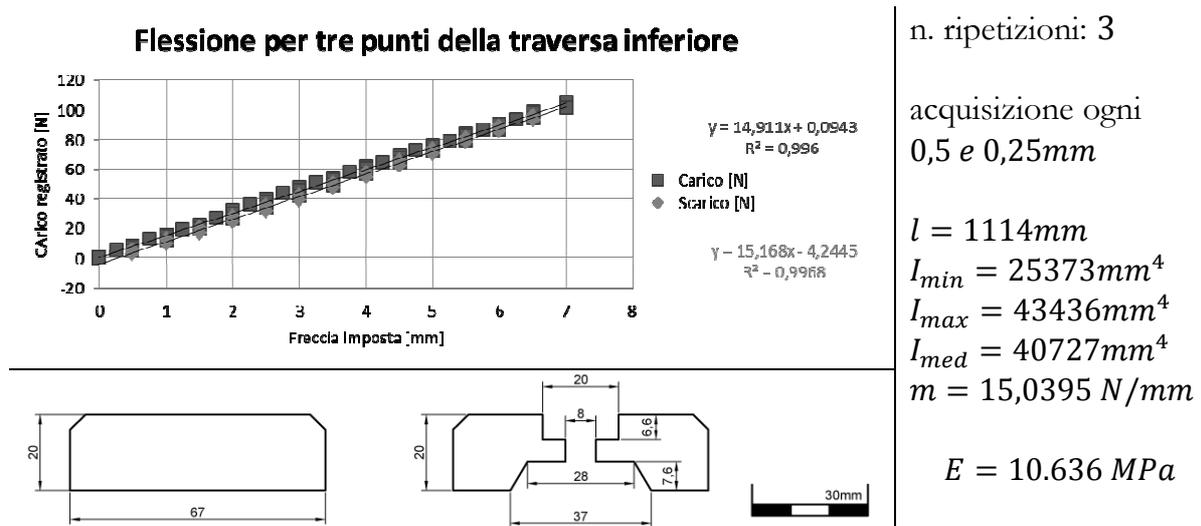
A questo punto è possibile calcolare il modulo di elasticità di ogni traversa sollecitata. Si riportano nelle tabelle 6.1, 6.2 e 6.3 i dati acquisiti e i risultati delle elaborazioni per ciascuna traversa.



**Tabella 6.1.** Flessione a tre punti della traversa superiore: si riportano i dati carico/freccia raccolti nel corso della prova; le due sezioni limite della traversa; le caratteristiche della prova e il modulo elastico calcolato.



**Tabella 6.2.** Flessione a tre punti della traversa centrale: si riportano i dati carico/freccia raccolti nel corso della prova; le due sezioni limite della traversa; le caratteristiche della prova e il modulo elastico calcolato.



**Tabella 6.3.** Flessione a tre punti della traversa inferiore: si riportano i dati carico/freccia raccolti nel corso della prova; le due sezioni limite della traversa; le caratteristiche della prova e il modulo elastico calcolato.

## 6.2. CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEL TAVOLATO ORIGINALE

Per le prove sul tavolato è stata seguita la stessa metodologia di prova impiegata per le traverse, ed è stata ripetuta per ciascuna linea corrispondente all'aggancio delle traverse.

Diversamente dalla metodologia applicata per l'elaborazione dei dati sulle traverse però, il tavolato non può essere assimilato ad una trave: la sollecitazione a flessione imposta provoca una risposta locale influenzata dal comportamento dell'intera lastra. La caratteristica di elasticità del tavolato può essere calcolata solo analizzando la risposta di un insieme di elementi finiti in cui è possibile suddividere idealmente l'intero volume sollecitato. Per validare la procedura di modellazione matematica è stato realizzato un simulacro fisico sul quale eseguire prove meccaniche a flessione, in ambiente di laboratorio di ricerca, quindi in condizioni di lavoro più precise e ripetibili rispetto alle prove effettuate in loco presso il laboratorio di restauro.

Ci si avvale pertanto dell'utilizzo di una replica strutturale e di un modello matematico strutturato in modo da definire le caratteristiche meccaniche del tavolato per approssimazioni successive.

La replica strutturale è stata realizzata in scala 1:1 rispetto all'originale, mantenendo lo stesso numero e dimensioni di tavole di cui il tavolato è composto e ricercando il più possibile una somiglianza nell'orientamento degli anelli delle singole tavole; non è stata riproposta la curvatura dell'originale, né la disomogeneità della superficie sul retro, né le fessure richiuse con incollaggio e con cunei in occasione del restauro (tavola 6.2).