



Telaio LEONARDO

SPERIMENTAZIONE

IL PROGRAMMA DELLE PROVE SPERIMENTALI

direzione scientifica di Giorgio Croci

Le prove sperimentali sui prototipi che sono state condotte in laboratorio in collaborazione tra lo Studio Progettazione e Controlli (S.P.C. srl), la Società Tecnocontrolli srl e i laboratori scientifici del Cenacolo hanno avuto il duplice scopo di fornire elementi utili al dimensionamento dei telai e degli apparecchi di spinta e di verificare la funzionalità e la resistenza delle tele da rifodero una volta assemblate ai nuovi telai.

Il programma di prove sperimentali, conclusosi con una simulazione numerica eseguita con il metodo degli Elementi Finiti (E.F.), ha preso in considerazione:

- a) campioni delle tele da rifodero che si prevedeva di utilizzare nel restauro (11);
- b) singoli elementi strutturali del telaio;
- c) martinetti, ossia gli elementi di spinta;
- d) porzioni di telaio montato (profilato + aste + martinetti e molle + angolari + rinforzi) (12).

Prove sulle tele da rifodero

Queste indagini sono state condotte su provini delle dimensioni di 45x30 cm, costituiti da due o tre pattine (definite anche tele pattine) rese solidali mediante incollaggio. Lo spessore totale veniva così ad essere di 8/10 di mm nel caso della doppia pattina, o di 12/10 di mm nel caso della pattina tripla. Costatata una sostanziale ortotropia nel comportamento delle tele, è stato deciso di applicare le sollecitazioni a trazione in direzione parallela al lato più lungo.

I campioni sono stati sottoposti a due diverse prove di trazione:

- 1) carico variabile;
- 2) carico costante.

Ulteriori prove sono state eseguite anche con l'ausilio della camera climatica. In tutte le prove il contributo, in termini di incremento di resistenza e di rigidità, apportato dalle tele antiche è stato considerato o trascurabile o minimo (13).

Prove di trazione a carico variabile

Le prove a trazione a carico variabile sono state condotte sia con che senza la stabilizzazione delle deformazioni, su tele doppie e su tele triple.

Prove su tele doppie con stabilizzazione delle deformazioni

"Le modalità di esecuzione prevedevano, dopo ogni passo di carico, una pausa per la stabilizzazione delle deformazioni fino alla tensione di 160 kg/cm². Le letture successive sono state eseguite senza interruzioni nell'applicazione della forza in quanto la conoscenza delle deformazioni a carico costante non risulta in questo caso determinante (tensioni troppo elevate per potere essere realmente applicate sulle tele antiche), il valore medio a rottura è risultato $\sigma = 271 \text{ kg/cm}^2$ " (14), (Figg. 14, 15 e 16).

Prove su tele doppie e su tele triple senza stabilizzazione delle deformazioni

"Alcuni campioni, di caratteristiche analoghe ai precedenti, sono stati sottoposti ad una sollecitazione di trazione applicata con incrementi continui, senza



Fig. 14
Per la stabilizzazione delle deformazioni, il valore medio a rottura è risultato $\sigma = 271 \text{ kg/cm}^2$.
Il provino durante l'esecuzione del test

attendere la stabilizzazione delle deformazioni. Sono stati effettuati vari cicli di carico: il primo fino alla tensione $\sigma=140 \text{ kg/cm}^2$, è stato seguito da una fase di scarico per la misurazione della epsilon residua; il secondo è stato spinto fino alla rottura dei provini, ottenuta per il valore medio $\sigma=278 \text{ kg/cm}^2$ (15), (Fig. 17).

Nel caso, invece, dei provini ottenuti mediante incollaggio di tre pattine "la forza di trazione è stata applicata secondo cicli di carico successivi, tutti eseguiti a passi di carico continui. Al termine di ogni ciclo veniva misurata l'entità della deformazione residuale. Nell'ultimo ciclo il campione veniva portato a rottura, situazione verificatasi per un valore medio di $\sigma=269,1 \text{ kg/cm}^2$ (16), (Fig. 18).

Sintesi dei risultati

I valori di σ a rottura, misurati nella totalità delle prove effettuate, sono risultati compresi tra i 255 ed i 278 kg/cm^2 , ossia entro un intervallo molto contenuto (Fig. 19). La deformazione residua, il valore di massimo interesse tra quelli ottenuti, è risultata estremamente contenuta per valori del carico applicato, corrispondenti ad un σ intorno a 70 kg/cm^2 , mentre per valori di σ intorno a 130-160 kg/cm^2 le deformazioni residue divengono assai rilevanti e variano anche notevolmente da provino a provino.

Eseguendo le prove con intervalli di tempo, per la stabilizzazione delle deformazioni, si è verificato un sensibile accrescimento delle deformazioni; ad esempio, in corrispondenza di un $\sigma=160 \text{ kg/cm}^2$ queste sono più che doppie rispetto alle deformazioni istantanee.

Prove di trazione a carico costante

Sulla base di queste risultanze è stato deciso di eseguire alcune prove per valutare esattamente il tempo di esaurimento della azione di deformazione nella tela sottoposta a un carico costante.

Sono state eseguite due prove:

- il primo provino è stato sottoposto ad una trazione parallela al lato più lungo, applicata gradualmente fino al raggiungimento delle σ di prova ($\sigma=83,5 \text{ kg/cm}^2$), avvenuto dopo quattro minuti. La deformazione unitaria è stata di $\epsilon=0,0249$. Da questo momento sono state eseguite letture delle deformazioni a carico costante. Il test, durato 36 ore, ha mostrato che il comportamento dei valori della deformazione unitaria dopo un iniziale momento di rapido accrescimento si è stabilizzato su un valore pari a $\epsilon=0,0377$ (Fig. 20).
- per il secondo provino la trazione, applicata con le stesse modalità del primo, è stata pari a 46,4 kg/cm^2 . Il test, durato 100 ore, ha mostrato che i valori della deformazione unitaria si sono attestati intorno ad un $\epsilon=0,0078$ (Fig. 21). Una volta stabilizzatasi la deformazione, il carico è stato incrementato fino alla sollecitazione di 70 kg/cm^2 ; a questa variazione è corrisposto un aumento della deformazione che si è evoluto, nel tempo, con modalità del tutto simili a quanto verificato nella prima parte della prova.

Il risultato sperimentale ottenuto ha permesso di stimare, nel caso di applicazione di una sollecitazione di circa 70 kg/cm^2 (corrispondenti a 840 kg/m), in 36 ore il tempo dopo il quale dovrebbe esaurirsi l'80-90% della deformazione iniziale della tela.

Prove in camera climatica

Alcune prove sono state eseguite in camera climatica. L'obiettivo era quello di verificare il comportamento delle tele alle variazioni dei cicli microclimatici.

La tesatura dei provini è avvenuta quando questi si trovavano ad una temperatura di 10°C., con il 30% di U.R. Dopo 11 ore le condizioni termogrometriche sono state variate in 35°C. e 70% di U.R. e dopo ulteriori 24 ore sono state ripristinate le condizioni iniziali.

Nella prova si sono alternati, nell'arco di complessive 190 ore, questi due cicli di temperature e di umidità relative.

Due i provini utilizzati in cui erano simulate condizioni "normali":

- nel primo provino la tela era vincolata in modo analogo a quello utilizzato per le prove di trazione con una tensione ad inizio prova pari a 31 kg/cm^2 ;
- nel secondo provino la tela era, invece, vincolata da un meccanismo a molle analogo a quello di un telaio elastico. La tensione iniziale risultava $\sigma=26,6 \text{ kg/cm}^2$.

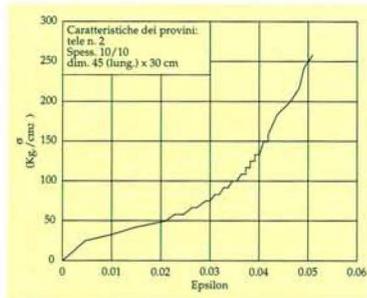


Fig. 15
Il diagramma di prova, rappresentato dal piano σ - ϵ , con i valori medi delle prove con stabilizzazione delle deformazioni



Fig. 16
Nel diagramma sono mostrati i valori medi delle curve depurate degli allungamenti misurate durante la stabilizzazione delle deformazioni a carico costante

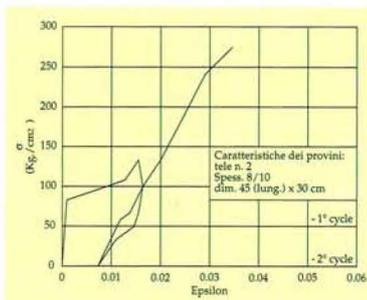


Fig. 17
Prove su tele doppie. I valori medi delle prove senza stabilizzazione delle deformazioni

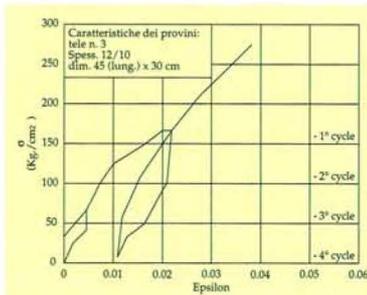


Fig. 18
Prove su tele triple. Il diagramma σ - ϵ di un provino a tre pattine sottoposto alle prove senza stabilizzazione delle deformazioni

Anche in questo caso le variazioni della tensione dovuta ai cambiamenti termoisometrici sembrano essere state estremamente ridotte e assai meno rilevanti del rilassamento a breve che si manifesta nelle prime 36 ore. In entrambi i casi dopo circa 60 ore si raggiunge la stabilizzazione della curva (Fig. 22).

Prove sugli elementi strutturali dei telai

Gli elementi strutturali fondamentali, realizzati in lega di alluminio, sono due:

- il profilato di sezione scatolare utilizzato per l'ossatura portante interna del telaio;
- il profilato di bordo dalla sezione più articolata (a sezione aperta nella parte esterna) destinato al bordo esterno per svolgere anche la funzione di ritegno delle tele.

Il profilato di sezione scatolare, che diviene anche alloggiamento dei martinetti, è soggetto, oltre che alla sollecitazione assiale trasmessa dalle molle di estremità, ad una flessione nel piano ortogonale all'asse, con momento di inerzia minore durante la fase del sollevamento. Per le prove è stato utilizzato un profilato di dimensioni 50x25 mm.

Il valore di rottura ($p=430$ kg) è stato raggiunto applicando una tensione massima pari a circa 2500 kg/cm². Valori, come si vede, di assoluta certezza poiché molto superiori a quelli delle strutture "portate", ovvero le tele (Fig. 23).

Una verifica particolare è stata necessaria per il profilato di bordo, quello che svolge funzioni di sostegno delle tele (Fig. 24). In condizioni di sollevamento del telaio, a causa della rotazione del profilato, il braccio della forza si incrementa notevolmente innalzando a valori rilevanti il momento flettente.

Il comportamento elastico del materiale è stato testato e giudicato soddisfacente fino ad una applicazione di una forza verticale $N=1000$ kg/m a cui corrisponde una deformazione di 5,3 mm (Fig. 25). Questa equivale ad una forza di trazione applicata nella direzione della tela pari a 3162 kg/m ed è relativa all'ipotesi di calcolo più sfavorevole che tiene conto anche dell'effetto di rotazione che si genera.

Prove sugli elementi di spinta

"Come noto il meccanismo di spinta è costituito sostanzialmente da un sistema di molle che vengono caricate fino ad imprimere alla tela il valore di trazione desiderato; la messa a contrasto delle molle avviene per mezzo di un perno filettato che, oltre ad impedire lo svergolamento delle molle stesse, consente anche di compensare le deformazioni plastiche che si verificano nella fase iniziale delle operazioni di tensione delle tele (e che raggiungono, nel caso delle tele del S. Nicola, valori dell'ordine di alcuni centimetri). Per conoscere esattamente il valore della forza fornita dalle molle, in funzione della deformazione subita e determinare di conseguenza quale tipo di molla si deve applicare in relazione alla grandezza delle tele, al numero di elementi di spinta presenti nel telaio ed al valore di tensione che si vuole imprimere alla tela, sono state eseguite alcune prove di laboratorio su prodotti usualmente disponibili nel commercio" (17).

Per ciascuna delle molle sono state condotte prove applicando una forza di trazione variabile da 0 fino a 140 kg. Quattro i tipi di molla sperimentati: due con $I=50$ mm e fili rispettivamente di 3 e 3,5 mm, ed altri due con $I=100$ mm e filo rispettivamente di 3,5 e 3,8 mm (Fig. 26).

Prove sul nodo tipo

E' stato preparato un provino mediante il quale si è creato un modello di un nodo sul quale si sarebbe dovuta applicare una fune per la movimentazione verticale del dipinto. "Scopo era quello di verificare che la resistenza del nodo (rinforzato da un coprighunto) fosse superiore a quella dei profilati che in esso concorrevano" (18, 19).

La rottura (per collasso di un profilato) si è avuta in corrispondenza del carico verticale $N=370$ kg, carico di assoluta sicurezza, superiore di circa 7 volte a quello d'esercizio.

Prove sul sistema di bloccaggio delle tele

Il programma delle prove si conclude con la verifica dell'efficacia del sistema di bloccaggio delle tele rifoderate al telaio elastico. Il meccanismo proposto consente di ripartire, in modo uniforme lungo l'intero bordo, il carico

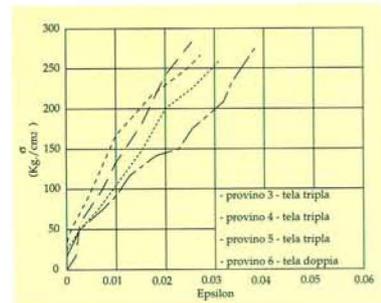


Fig. 19
Considerando, nel complesso delle prove di deformazione, i soli cicli terminati con la rottura del provino, gli andamenti dei diagrammi risultano assai simili, con i moduli elastici secanti a rottura tutti compresi tra i 7.200 ed i 10.800 kg/cm²

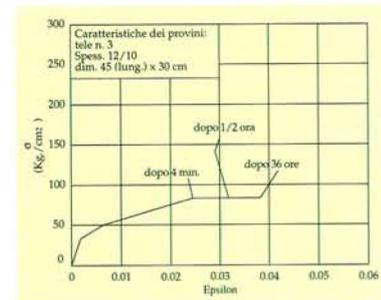


Fig. 20
Prove di trazione a carico costante sul provino A. Il diagramma σ - ϵ delle prove

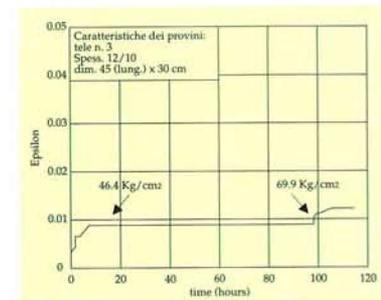


Fig. 21
Prove di trazione a carico costante sul provino B. Il diagramma mostra che, già dopo 4,5 ore, la deformazione ($\epsilon=0,00511$) è pari al 65% del totale, dopo 7,5 ore è pari all'85%, mentre dopo 9,5 ore la $\epsilon=0,00704$ è pari al 99,4% della ϵ 100 ore

trasmesso alla tela durante le fasi di tensionamento.

La misura degli allungamenti della tela ha consentito di stimare in circa 2000 kg/m il carico applicabile senza che la tela venga danneggiata dal sistema di bloccaggio prima di pervenire allo scorrimento (Fig. 27). Un carico di assoluta sicurezza.

Simulazione numerica

E' stata condotta una analisi matematica del comportamento strutturale di uno dei telai di maggiore articolazione tra quelli da mettere in opera nella Basilica.

Il metodo adottato per lo studio dello stato di sollecitazione è stato, come anticipato, quello degli Elementi Finiti. Il telaio, perciò, è stato schematizzato in 72 elementi tipo *beam* e 196 nodi; i gradi di libertà sono, in totale, 408 (Fig. 28).

La necessità di sollevare il telaio mediante un sistema di funi ed il rischio, cioè, di trovarsi di fronte a cedimenti di parti del sistema di elevazione hanno spinto ad ipotizzare come possibile (sebbene improbabile) anche la condizione di telaio sospeso ad un solo nodo.

Gli sforzi a cui avrebbe potuto essere sottoposto il telaio sono stati sperimentalmente ipotizzati duplici:

- peso proprio della struttura, agente in direzione verticale (modello di calcolo 1);
- tiro imposto alle tele dal sistema di molle, agenti in direzione orizzontale (modello di calcolo 2).

L'analisi dei carichi

Modello 1

"Nel primo modello di calcolo (telaio indeformato) sono stati considerati agenti i soli carichi verticali (pesi propri): il peso proprio delle aste costituenti il graticolo è stato assegnato al modello per mezzo del peso di volume; il peso proprio delle tele (0,650 kg/m²) è stato concentrato come carico nodale alle estremità delle aste in funzione delle rispettive aree di influenza ed è stato addizionato al peso proprio delle aste perimetrali (che non forniscono collaborazione strutturale al telaio)" (20).

Modello 2

"Nel secondo modello di calcolo (corrispondente geometricamente alla deformata della prima fase) agisce solo l'azione della tela. Tale azione, valutata considerando un'aliquota della trazione massima di rottura cui sono stati sottoposti i provini e rapportata ad una striscia di tela pari all'interasse delle nervature del telaio (i=73 cm), è di 250 kg in compressione, su ciascuna asta" (21).

Analisi dei risultati

"Il comportamento statico del telaio risultò del tutto soddisfacente sia dal punto di vista della resistenza che da quello della deformabilità. La sollecitazione massima, tenuto anche conto del coefficiente di snellezza, è risultata pari a $\sigma=591$ kg/cm² ed è stata raggiunta nell'asta 45 in corrispondenza del nodo 90. Le prove di laboratorio, su un elemento vincolato in modo analogo a quello ipotizzato teoricamente, hanno fornito una sollecitazione limite di servizio pari a $\sigma=1.715$ kg/cm².

La massima deformazione del telaio risulta di 2,3 cm ed avviene in direzione ortogonale al piano indeformato del telaio. Tale deformazione non induce apprezzabili variazioni nello stato tensionale della tela e viene comunque completamente recuperata una volta fissato il telaio nella sua collocazione definitiva, essendo previsti punti di bloccaggio in corrispondenza con quasi tutti i nodi" (22).

Il complesso delle prove eseguite ha mostrato elevati margini di sicurezza sia nei confronti di una deformabilità che nei confronti di una rottura degli elementi del telaio. La simulazione teorica numerica ha mostrato, poi, una elevata affidabilità, ossia ampi margini di sicurezza, sia del sistema di tensionamento che di supporto dei dipinti: i coefficienti di sicurezza nei confronti della rottura del telaio risultano sempre assai elevati perché almeno due volte e mezza superiori a quanto necessario.

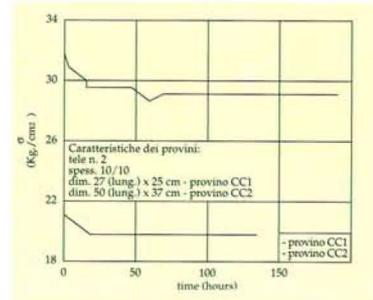


Fig. 22
 Le prove in camera climatica. In alto l'andamento nel tempo delle tensioni, mentre in basso si vede la camera climatica, al cui interno è stato alloggiato il provino che deve essere sottoposto ai cicli climatici



Fig. 23
 Prove di resistenza a flessione. Con un provino è stata simulata la flessione nel piano ortogonale all'asse del profilato

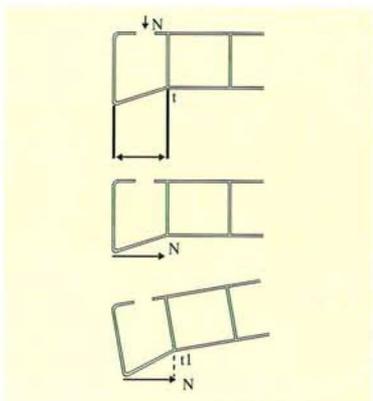


Fig. 24
 La particolare conformazione geometrica fa individuare nell'attaccatura della parte esterna con la parte scatolare l'elemento maggiormente sollecitato

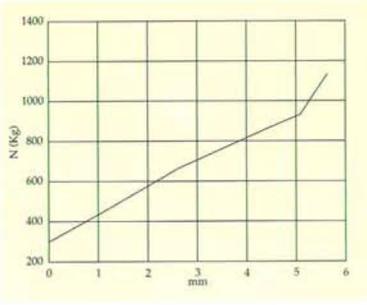


Fig. 25
Il provino viene sottoposto a verifica applicando la sollecitazione sul bordo esterno. A sinistra il diagramma delle deformazioni; a destra il macchinario utilizzato per la prova

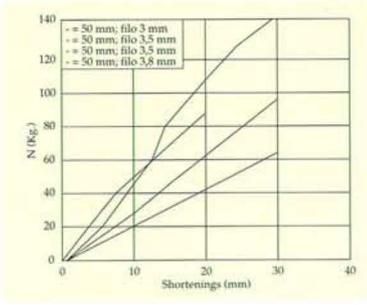
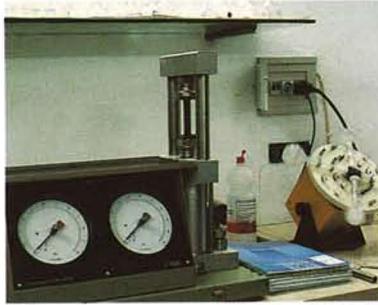


Fig. 26
Il diagramma mostra i risultati delle prove di deformabilità delle molle. A sinistra il diagramma delle prove, a destra i macchinari nel corso dell'esecuzione della prova

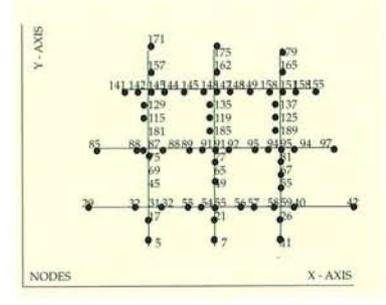
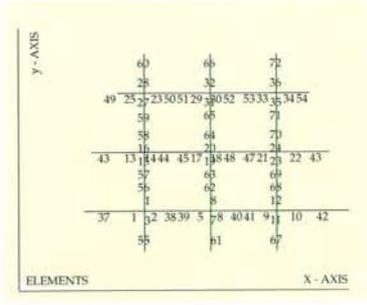
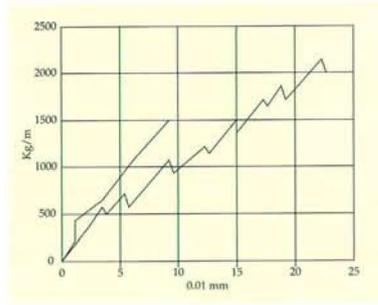


Fig. 27 (in alto a sinistra)
Prova di carico dell'elemento di grimpaggio delle tele

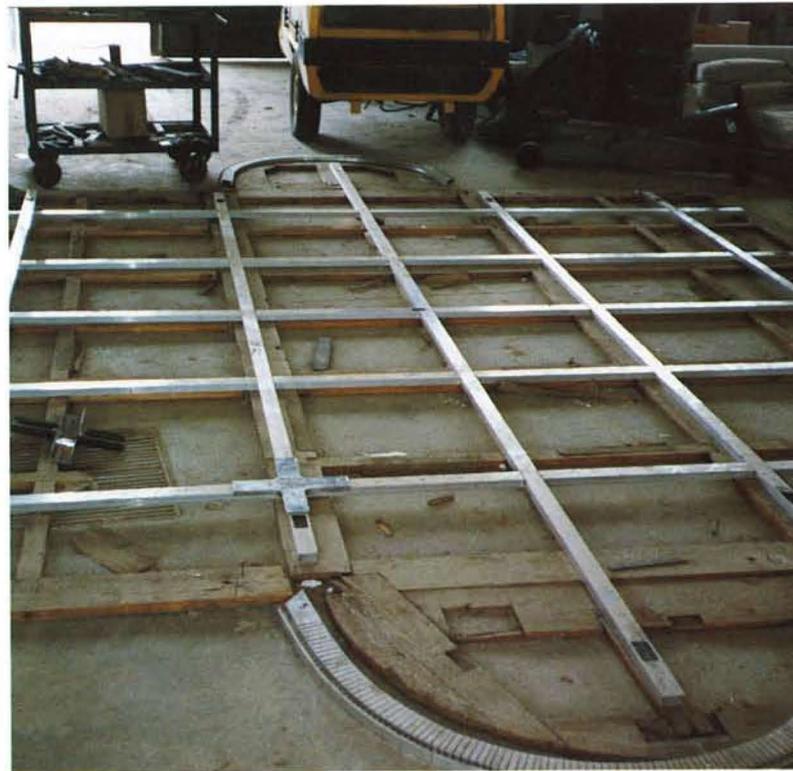


Fig. 28 (in alto al centro e a destra)
Studio del telaio con sistema degli Elementi Finiti. Schema del telaio: al centro gli elementi ed a destra i nodi

Fig. 29
Nel laboratorio si provvede al montaggio del nuovo telaio ad espansione in lega di alluminio sovrapponendolo al precedente telaio ligneo. Con questa operazione si verificano anche empiricamente gli ingombri del nuovo telaio