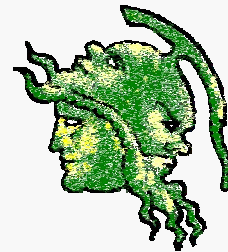


ESSEBI S.r.l



BIFFA ESTENSIMETRICA

CDT

Crack displacement transducer

Trasduttore di spostamento in carboresina
realizzato dalla ESSEBI Srl

30 settembre 2007

V.le Giulio Agricola, 130 – 00174 Roma tel. 06-71.00.152 06-710.75.339

www.essebiweb.it info@essebiweb.it

1	PREMESSA	2
2	GEOMETRIA	2
3	MATERIALE	3
4	DISPOSIZIONE ESTENSIMETRICA	4
5	CALIBRAZIONE.....	4
6	INFLUENZA DI FATTORI ESTERNI AMBIENTALI.....	6
7	IMPIEGO ED INSTALLAZIONE IN OPERA	7
8	APPLICAZIONI.....	8
9	MIGLIORAMENTI ED IMPLEMENTAZIONI FUTURE.....	9
10	BIBLIOGRAFIA	9

1 PREMESSA

Trattasi di una biffa “elettronica”, strumentata con due estensimetri elettrici a resistenza, da impiegare per la misura del quadro evolutivo di lesioni su elementi strutturali in muratura ed in calcestruzzo armato. A seconda della geometria adottata e del materiale impiegato è possibile apprezzare spostamenti dell’ordine del millesimo di millimetro fino ad un fondo scala di 2,5 mm. Per i massimi spostamenti si hanno carichi applicati dell’ordine di qualche kg, per cui il fissaggio a muro non costituisce alcun problema (dopo una opportuna preparazione della superficie, può essere effettuato anche con un collante tipo cemento).

2 GEOMETRIA

In fig. 1 è riportato il disegno base di una biffa standard (CDT1). Le successive modifiche non hanno riguardato la struttura ad arco ma sono state tutte rivolte a migliorare il sistema di fissaggio alla parete lesionata e a rendere più compatta la parte su cui predisporre il connettore elettrico, “tipo Cannon”, per il collegamento alla centralina di condizionamento e di amplificazione del segnale.

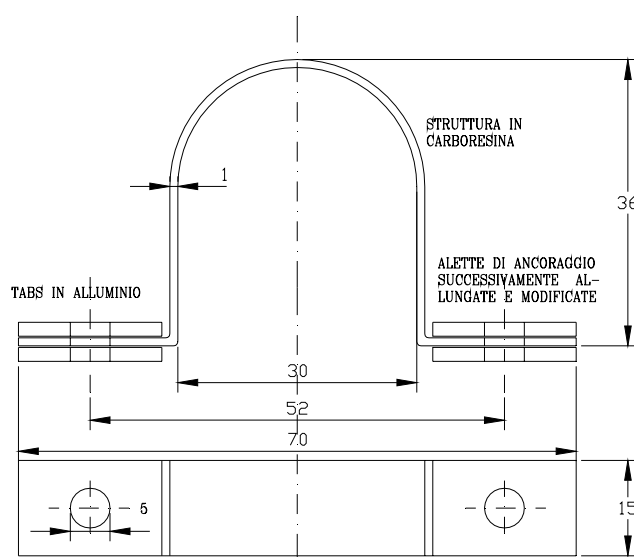


fig. 1

Una simile geometria consente di amplificare sensibilmente la deformazione in quanto nella zona in cui sono applicati gli estensimetri si ha una elevata tensione da momento flettente¹. In prossimità ai fori sono previsti tabs di rinforzo, incollati a sandwich sull’elemento di base, per minimizzare eventuali effetti di rifollamento.

Venendo le due alette di estremità rigidamente collegate ai due lembi della parete, a cavallo della lesione, l’elemento risulta essere iperstatico. In particolare lo schema di calcolo più vicino alla

¹ Se la biffa fosse piana si avrebbe solo trazione e la conseguente tensione sarebbe inferiore di un fattore pari a $6l/h$ in cui h rappresenta lo spessore e l il braccio di applicazione della forza rispetto al punto di misura. Nel caso in esame tale fattore risulta pari a 126.

realtà è quello di portale simmetrico doppiamente incastrato (nella risoluzione del problema iperstatico devono essere determinate due incognite iperstatiche: il momento e la reazione orizzontale all'incastro).

Sono stati incollati² strain gages³ in corrispondenza alla sezione in chiave dell'arco, nella zona superiore e in quella inferiore in posizione simmetrica.

3 MATERIALE

Per l'elemento strutturale, semicircolare in sommità, è stata impiegata carboresina⁴ (strati di tessuto di fibra di carbonio e resina termoindurente di tipo espossidico) per le ragioni che seguono.



fig.1 - foto d'insieme in fase di lavorazione

La particolare conformazione curva della travata superiore rendeva complicata la lavorazione di qualsiasi tipo di materiale metallico che fosse allo stesso tempo duttile per la conformazione su stampo ed elastico, quasi armonico, durante la successiva applicazione. Il carbonio, è risultato il materiale più adatto per la sua intrinseca caratteristica di poter essere conformato su misura in tessuti o nastri che, impregnati di resina assumono consistenza strutturale quando sottoposti a temperatura e pressione. In tal modo è possibile la realizzazione di componenti comunque complessi: l'unica difficoltà consistente nella realizzazione dello stampo, e dell'eventuale controstampo, su cui disporre gli strati durante la laminazione fino al raggiungimento dello spessore voluto.

² Con collante bicomponente a base di resina fenolica X-60 della HBM .Il collante Z-70 della HBM (cianacrilato) avrebbe consentito una realizzazione più pulita ma non è stato impiegato in quanto non avrebbe consentito il riempimento delle microbutterature (non visibili ad nudo) sempre presenti in un componente in plastica rinforzata.

³ Estensimetri HBM.

⁴ Le caratteristiche della matrice e del rinforzo, il numero degli strati di tessuto e la esatta sequenza di stratificazione sono coperti al momento da segreto.

Elementi realizzati in carboresina, essendo in pratica costituiti da plastica rinforzata, non subiscono, contrariamente alla stragrande maggioranza dei materiali metallici, fenomeni ossidativi e se opportunamente polimerizzati (seguendo cioè fedelmente le indicazioni del fornitore della resina) risultano avere una bassa, quasi insensibile, igroscopicità

Ultimo, ma non meno importante aspetto, è quello legato al basso, quasi nullo ed in alcuni casi negativo, coefficiente di dilatazione termico del carbonio che combinato con quello della resina, secondo la regola delle fasi in ragione delle percentuali relative, consente di ottenere un valore finale comunque basso, ben al di sotto di quello di un normale acciaio. Fermo restando che tutti gli effetti termici sull'apparato estensimetrico sono perfettamente compensati, le deformazioni apparenti che si hanno su una simile struttura iperstatica, non libera di adeguarsi spontaneamente a modificazioni esterne, in corrispondenza ad un ΔT , sono di lieve entità e dovute soltanto alla presenza delle alette di ancoraggio (effetto ulteriormente enfatizzato dalla presenza dei tabs di rinforzo in alluminio). La polimerizzazione è stata effettuata in forno e la compattazione è stata favorita dall'impiego di un controstampo femmina.

Il laminato costitutivo il composito è formato da 6 strati di Dry Fabric 3713 M40J⁵ impregnati di resina epossidica e stratificati a mano su stampo maschio.

4 DISPOSIZIONE ESTENSIMETRICA

Nelle prime realizzazioni sono stati applicati due estensimetri disposti su lati contigui del ponte, ad amplificare la flessione (fattore di ponte pari a 2), e ad annullare la trazione (di scarsa significatività) e le deformazioni apparenti (sugli estensimetri), dovute dalla temperatura. Successivamente, per aumentare intrinsecamente la sensibilità dello strumento di misura, sono stati utilizzati quattro estensimetri (fattore di ponte pari a 4). Sono stati impiegati estensimetri doppi, autocompensati per acciaio, della HBM della serie DY11, aventi ciascuno resistenza di 350 Ω e griglia lunga 6 mm.

I collegamenti fino al connettore⁶ del tipo Cannon sono a due fili per estensimetro; il cavo di prolunga dal connettore alla centralina estensimetrica è a tre fili per estensimetro per la compensazione automatica della temperatura.

5 CALIBRAZIONE

Gli estensimetri incollati in corrispondenza alla chiave dell'arco misurano una deformazione essenzialmente dovuta a momento flettente; quello che interessa ai fini della misura è l'allontanamento orizzontale tra i due piedritti. La relazione, sotto riportata, mostra il legame tra spostamento (δ) e carico applicato orizzontalmente per l'apertura (o la chiusura) tra i due piedritti (P).

⁵ *Avente, sulla lamina avente di pari a 0,28 mm, modulo di elasticità nelle due direzioni principali pari a ca. 140 GPa*

⁶ *Separato dalla biffa e solidale ad una piastrina in alluminio nelle prime realizzazioni; solidale ad uno dei tabs di rinforzo nelle versioni successive.*

$$\delta = \left\{ \frac{2}{E \cdot J} \cdot \left[\frac{l^3}{3} + R \cdot \left(\frac{\pi}{2} \cdot l^2 + \frac{\pi}{4} \cdot R^2 + 2 \cdot l \cdot R \right) \right] - \frac{(h^2 + \pi \cdot R \cdot h + 2 \cdot R^2)^2}{E \cdot J \cdot (2 \cdot h + \pi \cdot R)} + \frac{\pi \cdot R}{2 \cdot E \cdot A} \right\} \cdot P \quad (5.1)$$

in cui E è il modulo di elasticità [kg/mm²], J è il momento d'inerzia di figura della sezione della biffa [mm⁴], A l'area della sezione della biffa [mm²], R il raggio della parte ad arco [mm], l la lunghezza dei piedritti [mm] e h lo spessore della biffa, costante lungo tutto lo sviluppo, [mm].

Il carico applicato è proporzionale al momento che a sua volta è proporzionale alla tensione e quindi alla deformazione in chiave.

Utilizzando tale equazione si può determinare una relazione teorica tra allungamento alla base e deformazione in corrispondenza alla sezione in chiave dell'arco. Con le dimensioni riportate in figura 1 e con spessori variabili tra 1 e 1,1 mm⁷ si hanno sensibilità variabili tra 656 e 723 µm/m/mm, in linea con quanto determinato sperimentalmente che è risultato variabile tra 696 e 780 µm/m/mm.

Per la determinazione della sensibilità sperimentale è stato appositamente realizzato un dispositivo di calibrazione (fig. 2) in cui, tramite due viti da impegnare in due fori simmetrici sulle alette orizzontali, si fissa la biffa a due blocchi metallici, liberi di scorrere su guide verticali, ed azionati, nel loro moto relativo, da una vite di manovra micrometrica. L'allontanamento (o avvicinamento) tra i due blocchi, a simulare l'apertura (o la chiusura) della lesione è misurato da un comparatore centesimale; la deformazione in chiave dell'arco della biffa è letta tramite centralina estensimetrica (sistema di misura dello sbilanciamento del ponte tramite amplificazione e condizionamento del segnale).

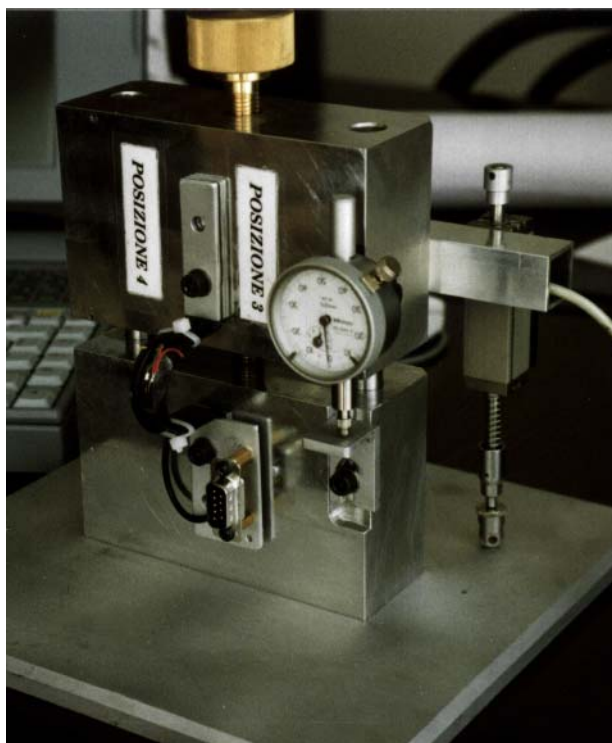


fig. 2 - dispositivo di calibrazione

⁷ La variabilità dello spessore è strettamente legata al processo manuale di fabbricazione e all'impiego di stampo e controstampo e per la compattazione.

Per la calibrazione di ciascuna biffa è stata applicata una rampa di carico, e successivamente di scarico, ad intervalli costanti di 0,1 mm fino ad un fondo scala di ± 2 mm. La pendenza della retta di regressione lineare ha fornito il valore di sensibilità sperimentale.

6 INFLUENZA DI FATTORI ESTERNI AMBIENTALI

I fattori ambientali influenzano non solo l'estensimetro ma tutto il punto di misura. Si è poi in presenza ad un sensore realizzato in carboresina che pur, essendo poco sensitivo riguardo variazioni termiche, lo stesso non può dirsi per quanto riguarda variazioni dell'umidità relativa dell'aria, soprattutto se il processo di polimerizzazione non è stato eseguito rispettando tutte le indicazioni (ciclo termico e di pressione) del fornitore del sistema resina-indurente.

La stabilità dello zero di un punto di misura con strain gages dipende da molteplici fattori a cominciare da una corretta esecuzione di tutte le fasi d'incollaggio fino alla buona protezione dagli agenti esterni. Nel caso in esame, per i primi esemplari da impiegare all'interno della Cattedrale di Pienza, ambiente asciutto e a temperatura sufficientemente costante, gli estensimetri sono stati lasciati a vista. In futuro, per applicazioni più usuali, in cui i punti di misura potranno essere raggiunti con le mani e soggetti a significative sorgenti di calore, polvere, grasso e agenti chimici di varia natura, dovrà essere previsto un adeguato rivestimento protettivo.

E' di seguito riportato l'andamento della deformazione apparente al variare della temperatura per una biffa in cui il fenomeno è risultato alquanto significativo e rappresentabile con una regressione lineare.

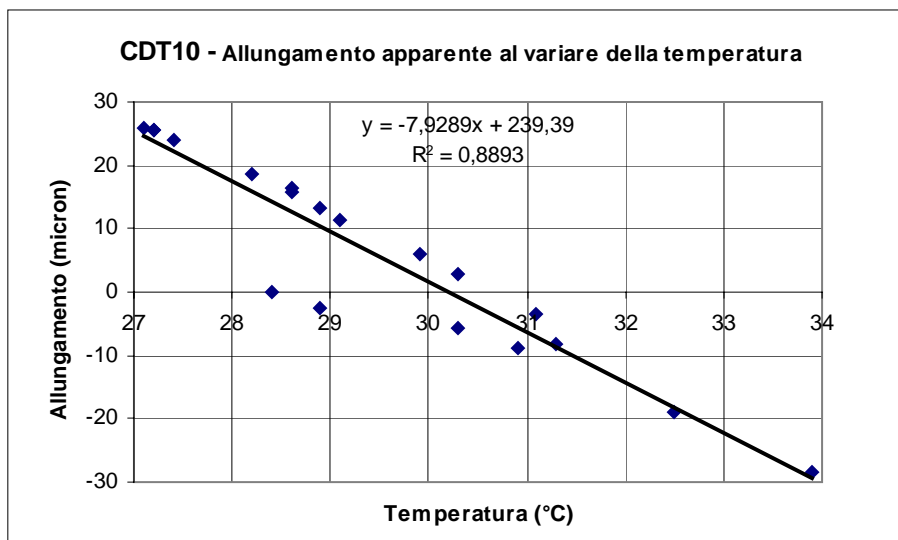


fig. 3

Volendo interpretare l'andamento con una regressione lineare, il fenomeno risulta in questo caso significativo (anche se non preoccupante) e sicuramente non dipendente dall'elemento biffa in carbonio, ma riconducibile all'insieme costituito dai supporti in acciaio, dalle ali laterali della biffa e dai tabs in alluminio che, allungandosi per effetto termico verso l'interno (verso la lesione) provoca la deformazione apparente sopra graficata, valutabile in un decremento di ca. 8 micron per ogni incremento di 1° C di temperatura. Fortunatamente questo fenomeno è sensibilmente più attenuato per tutte le altre biffe e non è da escludere che sia dovuto più all'effetto dell'umidità relativa dell'aria, che non alla temperatura medesima. L'aver trovato una correlazione lineare tra

temperatura e spostamento può essere pertanto giustificata dalla dipendenza lineare che esiste tra temperatura e umidità relativa. Questa ipotesi, anche se dovrà essere suffragata mediante misura diretta dell'umidità dell'aria, prende ulteriormente corpo se si pensa a quanto influiscono le variazioni di umidità su componenti in composito non ben polimerizzati⁸.

Si riporta di seguito la relazione in cui si nota la dipendenza della spinta alla P alla base del portale ad arco in funzione di una variazione termica ΔT :

$$P = - \frac{2 \cdot R \cdot \alpha \cdot \Delta T}{\frac{1}{E \cdot J} \left[\left(\frac{2 \cdot h^3}{3} + \pi \cdot R \cdot h^2 + 4 \cdot R^2 \cdot h + \frac{\pi \cdot R^3}{2} \right) - \frac{(h^2 + \pi \cdot R \cdot h + 2 \cdot R^2)^2}{2 \cdot h + \pi \cdot R} \right] + \frac{\pi \cdot R}{2 \cdot E \cdot A}} \quad (6.1)$$

i simboli hanno lo stesso significato che hanno nella equazione (5.1); α rappresenta il coefficiente di dilatazione termica, in questo caso della carboresina, inferiore a $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. Il segno meno sta ad indicare che ad un aumento di temperatura corrisponde una reazione vincolare verso l'interno del portale.

7 IMPIEGO ED INSTALLAZIONE IN OPERA

E' stato messo a punto un sistema per l'installazione a muro dello strumento. Con apposita dima si incollano⁹ i supporti in acciaio; per evitare di affidarsi alla sola adesione collante-intonaco, il posizionamento è ulteriormente assicurato da due viti ad espansione da muro che si impegnano su appositi fori disposti all'estremità (una su ciascun lato) dei due supporti. Su ciascuno di essi sono presenti due perni filettati in corrispondenza ai quali è inserita la biffa, attraverso i quattro fori, due per lato, posizionati sui due bracci di fissaggio; il bloccaggio viene effettuato meccanicamente attraverso il serraggio di dadi, disposti su rondelle ripartitrici.

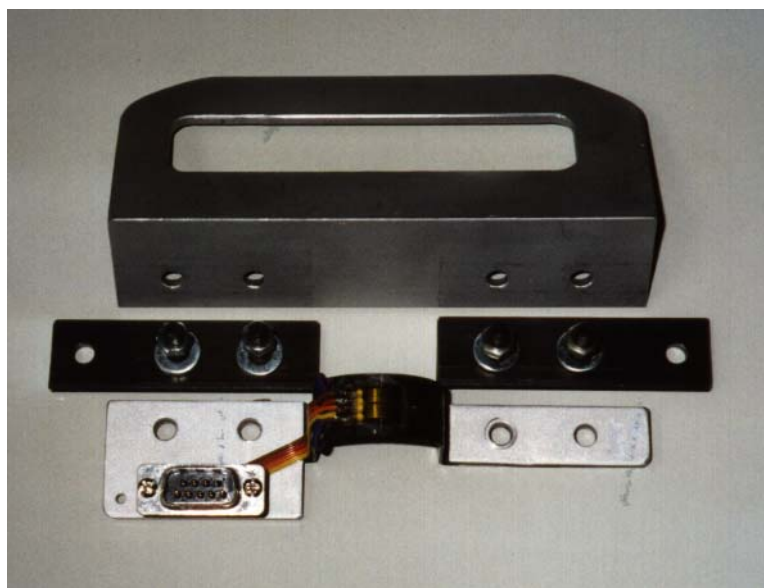


fig. 3 - Sistema d'installazione

⁸ Le molecole d'acqua si legano chimicamente con le lunghe catene di polimeri, impedendo ai legami cross-link di avvenire nella loro completezza ed al composito di ottenere una completa consistenza strutturale.

⁹ E' stato sempre impiegato il collante bicomponente fenolico X-60 della HBM.

Una simile installazione consente la rimozione della biffa (e un nuovo suo utilizzo, eventualmente dopo una cautelativa ricalibrazione), rimuovendo i quattro dadi, impanati sui quattro perni filettati; gli unici elementi a perdere sono i due supporti in acciaio, che possono pertanto essere lasciati sul maschio murario (o sull'elemento in calcestruzzo armato), a cavallo della lesione.

8 APPLICAZIONI

A parte applicazioni prototipali (Palazzo Giacci a Rocca Priora-RM e condominio Via Poliziano 8 a Roma), il primo più rappresentativo impiego si è avuto per il monitoraggio dell'evoluzione del quadro fessurativo di alcune significative lesioni all'interno della cattedrale quattrocentesca di Pienza (Si). In particolare, all'interno della cattedrale, sono state posizionate tre biffe lungo una lesione principale nel transetto di sinistra. Altre quattro biffe sono state posizionate nel sottostante battistero a monitorare, per tutta la sua larghezza, una lesione superiore che tende a separare tutta la zona absidale dalla restante parte del duomo.



fig.4 -Biffa installata all'interno della cattedrale di Pienza

9 MIGLIORAMENTI ED IMPLEMENTAZIONI FUTURE

E' stato sperimentalmente riscontrato che i "tabs" in alluminio sulle alette possono comportare problemi di deformazioni apparenti legate alla temperatura. Sono pertanto in fase di studio sia modelli completamente in carbonio, senza alcun rinforzo in corrispondenza alle forature, sia modelli in cui la diversa conformazione geometrica è compensativa di questo fatto.

Visto che dall'esame numerico della (6.1) si nota che non è tanto il coefficiente di dilatazione termico a determinare la nascita di una reazione vincolare, causa di indesiderate deformazioni apparenti in chiave dell'arco, quanto il rapporto di alcuni parametri dimensionali, è in corso di valutazione la realizzazione di una biffa con portale squadrato, realizzata in acciaio inox¹⁰.

Per quanto riguarda la parte elettronica è in fase di sviluppo avanzato una biffa telemetrica in cui sono assenti le connessioni a cavo ed avente la peculiare caratteristica di incorporare, nella sua collocazione remota, la circuiteria di bilanciamento, condizionamento ed amplificazione¹¹. Con un simile sensore non servirà più la centralina estensimetrica, ma semplicemente un dispositivo ricevente da collegare alla seriale del PC di acquisizione.

10 BIBLIOGRAFIA

- V.I.Feodosev, "*Resistenza dei Materiali*", Editori Riuniti - Edizioni Mir
O.Belluzzi, "*Scienza delle Costruzioni*", Zanichelli Bologna
W.C.Young, "*Roark's Formulas for Stress and Strain*", McGraw Hill International Edition
R.S.Figliola, D.E.Beasley, "*Theory and Design for Mechanical Measurements*", John Wiley & Sons
G.S. Springer, "*Environmental Effects on Composites Materials*", Technomic Pub.Co. Westport-CT
K.Hoffmann, "*An Introduction to Measurement using Strain Gages*", HBM GmbH, Darmstadt
F.P.Branca, "*Estensimetri Elettrici a Resistenza*", ESA Roma
R.M.Jones, "*Mechanics of Composites Materials*", Hemisphere Publishing Corporation, New York
M.Marchetti, D.Cutolo, "*Tecnologie dei Materiali Compositi*" ESA Roma
"*Manuale di Ingegneria Civile*", Edizioni Scientifiche A. Cremonese - Roma

¹⁰ Sarà oggetto di documento descrittivo analogo al presente denominato CDT2.

¹¹ La cui parte elettronica sarà denominata SAT (Stand Alone Transducer). La biffa sarà pertanto individuata dalla sigla CD-SAT-n (Crack Displacement - Stand Alone Transducer - [modello])