

INDAGINE TEORICO - SPERIMENTALE (1ª PARTE)

# Il vetro ingegnerizzato

Presso il Laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università di Pisa è stata intrapresa una ricerca sulla risposta meccanica delle giunzioni strutturali incolate tra vetro e metalli. Nell'ambito di questa ricerca sono state eseguite due prove di trazione quasi statiche su campioni costituiti da profili in acciaio inox incollati a lastre di vetro stratificato mediante due tipi diversi di interlayers: ionoplastico polimerico nella prima prova e acrilico nella seconda prova

**Maurizio Froli, Gerardo Masiello, Alessio Vezzosi, Tommaso Conti** - Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa - Sezione Strutture

**L**e doti di trasparenza, durezza e resistenza agli agenti atmosferici hanno decretato da secoli l'ingresso trionfale del vetro in architettura. In epoca recente il vetro ha guadagnato anche il ruolo di materiale da costruzione a dispetto della sua intrinseca e antonomastica fragilità e della difficoltà a essere unito ad altri materiali.

Eppure proprio per garantire adeguati margini di sicurezza nei confronti di rovinosi collassi il vetro può essere "ingegnerizzato" esclusivamente progettando strutture dotate di gerarchia, ossia

composte da elementi con diverso grado di importanza, e ridondanti, ossia tali che la crisi di un elemento non implichi il collasso dell'insieme. La realizzazione di questi principi richiede necessariamente lo sviluppo di unioni di forza che possono riguardare parti in vetro dello stesso elemento costruttivo, elementi costruttivi vitrei distinti, elementi in vetro e componenti costituite da altri materiali, metallici o sintetici.

La prima classe di unioni è realizzata oggi in modo predominante e soddisfacente dal processo di stratificazione grazie al quale si riesce notoriamente a conferire alle lastre di vetro una maggiore capacità portante ed una duttilità d'insieme unendole tra loro mediante materiali plastici, come ad esempio Pvb o altri materiali

ionoplastici polimerici, in modo che in caso di rottura di una lastra le altre continuino ad esercitare la propria funzione resistente.

Per unire elementi costruttivi vitrei tra loro (come nel caso di un parapetto collegato ai gradini in vetro di una scala) oppure per collegare elementi in vetro a un'altra struttura (come ad esempio nel caso delle facciate sospese) la tecnica impiegata fino a oggi in modo prevalente prevede la foratura del vetro e l'inserimento di un mezzo d'unione metallico variamente foggato, come borchie o rotulles. Per attenuare le dannose concentrazioni di tensione suscitate dal contatto diretto tra vetro e metallo è necessario interporre materiali adatti quali alluminio, Teflon, neoprene ecc., ma nonostante tutto e

anche in assenza di applicazioni locali di carico, è noto che qualunque foro costituisce una fonte di concentrazioni di sforzo dove la probabilità di innesco della frattura è maggiore che in altre zone del vetro.

Per questi motivi la frontiera da esplorare per incrementare la qualità delle strutture in vetro è costituita oggi dai collegamenti privi di foratura tra i quali primeggiano le unioni con adesivi strutturali.

I collegamenti incollati presentano infatti numerosi vantaggi tra i quali:

- hanno la capacità di distribuire molto più uniformemente gli sforzi da trasmettere attenuando i picchi di tensione;
- le dilatazioni termiche differenziali tra gli elementi vitrei da unire vengono in gran parte compensate attraverso scorrimenti elastici nello spessore dello strato di adesivo;
- riducendo il numero delle parti metalliche si riduce notevolmente il peso proprio dell'intera costruzione ottenendo al tempo stesso un maggior grado di trasparenza.

Per contro, gli adesivi possono presentare problemi di durabilità e di tenuta nel tempo essendo in alcuni casi sensibili all'azione invecchiante dell'umidità, della temperatura, dell'irraggiamento solare e manifestando spesso deformazioni di tipo viscoso termo-dipendenti.

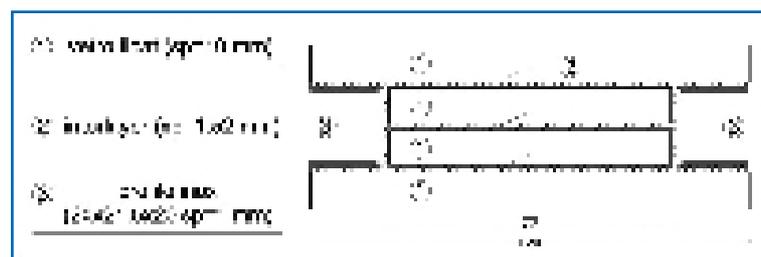
Recentemente è stata introdotta sul mercato una nuova generazione di interlayers polimerici di tipo ionoplastico i quali posseggono, rispetto al tradizionale Pvb, superiori proprietà meccaniche quali per esempio maggiore rigidità circa 100 volte maggiore quello del Pvb), maggiore resistenza (tensione limite circa cinque volte quella del Pvb), più elevata temperatura di rammolimento (pari a circa 60°C) oltre ad assenza di delaminazione per effetti climatici ambientali, compatibilità con i sigillanti e soprattutto eccellenti doti di adesione ai metalli.

È facile prevedere che, grazie alla tecnologia degli adesivi strutturali, l'utilizzo del vetro come



Fig. 1 - Campione

Fig. 2 - Sezione del campione



materiale da costruzione subirà in futuro uno sviluppo ancora maggiore di quello odierno: le tecnologie già esistenti nell'ingegneria meccanica, dove gli adesivi sono impiegati in giunzioni strutturali, devono soltanto essere adattate alle esigenze e alle tolleranze dimensionali presenti in architettura. In molte delle applicazioni aerospaziali, per esempio, lo spessore degli adesivi è appena di qualche decimo di millimetro, ma ciò è incompatibile con i valori di tolleranza necessari in architettura dove gli adesivi devono garantire non soltanto la resistenza, ma devono compensare anche le imprecisioni e riempire i vuoti fra elementi vitrei. Attualmente la principale limitazione all'utilizzo estensivo degli adesivi strutturali nella giunzione di elementi vitrei risulta proprio la scarsa conoscenza dell'influenza dello spessore adesivo sulle caratteristiche di resistenza delle giunzioni.

Per sopperire a questa mancanza di conoscenze sono attualmente in corso numerose campagne di ricerche industriali e universitarie nel corso delle quali vengono sperimentate soluzioni che prevedono l'esclusione completa di componenti metalliche nelle connessioni, affidando completamente agli adesivi strutturali la giunzione di forza tra elementi strutturali vitrei. Si citano al proposito le ricerche intraprese presso l'*Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren* (ILEK) di Stoccarda e l'*University of Technology of Delft* in cui sono state progettate e costruite alcune strutture in vetro assemblate esclusiva-

mente per mezzo di adesivi. Un esempio particolarmente interessante e avveniristico è il prototipo di cupola integralmente vitrea, "The Glass Dome", progettata presso l'Università di Stoccarda dall'Ing. Lucio Blandini sotto la guida del Prof. Werner Sobek e costituita da un guscio a doppia curvatura di circa 8.5 m di diametro ottenuto incollando tra loro mediante adesivi strutturali acrilici, 44 lastre a doppia curvatura spesse solo 10 mm.

Presso il Laboratorio di Strutture del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa è stata intrapresa di recente una ricerca sulla risposta meccanica delle giunzioni strutturali incollate tra vetro e metalli. Nell'ambito di questa ricerca sono state eseguite due prove di trazione quasi statiche, delle quali viene riferito nel seguito, su campioni costituiti da profili in acciaio inox incollati a lastre di vetro stratificato mediante due tipi diversi di interlayers: ionoplastico polimerico nella prima prova e acrilico nella seconda prova.

#### A) Prova di trazione su incollaggio mediante interlayer ionoplastico

Il campione è stato ottenuto assemblando due profili a U in acciaio inox con un elemento in vetro *float* formato per laminazione mediante interlayer ionoplastico polimerico di quattro lastre rettangolari spesse 10 mm delle quali le due esterne di dimensioni 120x160 mm e quelle interne di dimensioni 77x160

mm. Lo strato di interlayer è spesso 1.52 mm e la sezione trasversale dei profili a U misura 20x21.5x20 mm con spessore di 1 mm.

Le estremità del campione sono state munite di speciali piastre di attacco costruite appositamente per permettere l'alloggiamento della cella di carico e distribuire simmetricamente sui profili metallici lo sforzo applicato dalla macchina di prova.

La prova è stata effettuata mediante macchina universale Instron 1186 in controllo di deformazione imponendo una velocità costante di spostamento relativo tra gli afferaggi pari a 1 mm/min. Lo sforzo di trazione è stato applicato direttamente alle estremità dei profili inox e trasferito alle lastre in vetro attraverso le tensioni tangenziali d'aderenza sviluppate nell'interlayer.

#### Risultati della prova di carico

Prima di essere sottoposto a prova di trazione, il campione presentava già una leggerissima delaminazione iniziale del materiale di interposizione fra le lastre vitree nella zona corrispondente agli estensimetri n° 1, 2, 3. Nonostante questo difetto iniziale, l'accoppiamento per incollaggio fra componente vitrea e profili inox non ha subito, nel corso della prova, danni evidenti eccettuata alcune opacizzazioni del materiale di interlayer nelle zone vicine al bordo libero.

Le prime fessure si sono manifestate nelle lastre centrali durante l'8° ciclo di carico in corrispondenza di un carico di circa 3500 daN, con innesco nel punto in cui cessa l'incollaggio fra profilo metallico e lastra vitrea. La propagazione è avvenuta in modo simmetrico in direzione pressoché ortogonale alle linee isostatiche di trazione evidenziate nella modellazione FEM. La rottura, manifestatasi nel vetro nel punto in cui cessa l'incollaggio dei profili inox, è avvenuta sotto un carico limite ultimo di 4797 daN.

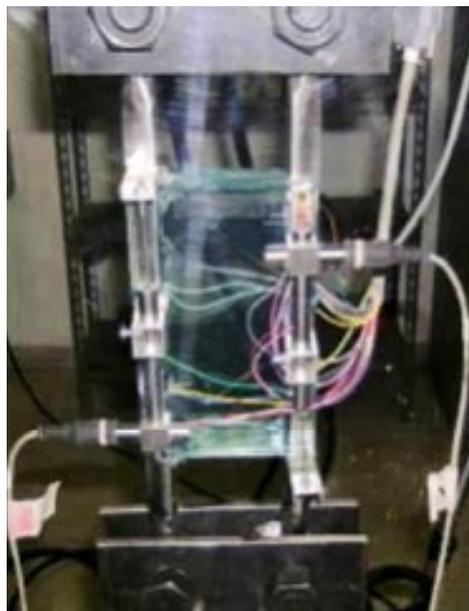


Fig. 3 - Modalità di prova e strumentazione

#### Elaborazione dei dati sperimentali

Gli andamenti delle deformazioni specifiche in direzione z (v. figura 5), rilevate da ciascun estensimetro al variare del carico, e di conseguenza le componenti di tensione  $\sigma_z$ , mostrano una soddisfacente rettilinearità tale da giustificare la interpolazione lineare di ciascuna serie di valori in conformità all'ipotesi di legame costitutivo di tipo elastico-lineare del materiale vetro nonostante la presenza di oscillazioni in prossimità dell'origine dei carichi, dovute probabilmente a fenomeni di assestamento che si attenuano all'aumentare del carico.

Tali andamenti differiscono tra loro a seconda della distanza dal bordo della lastra a causa del manifestarsi di un effetto flessionale parassita dovuto alla non coincidenza tra il baricentro del singolo profilo ed il baricentro della sezione di collante. Infiessendosi localmente nel piano zy, il profilo a U subisce una divaricazione delle superfici laterali che provoca a sua volta una compressione delle fibre esterne delle lastre vitree.

Allontanandosi dai bordi si generano delle de-



Fig. 4 - Rottura del campione

formazioni e quindi delle tensioni di trazione, ma comunque sensibilmente minori rispetto alle zone centrali dove si manifestano i picchi di tensione e dove tali andamenti sono anche più regolari.

Analizzando più dettagliatamente l'andamento delle tensioni  $\sigma_z$  nelle lastre vitree lungo ciascun tratto incollato, si nota che, a parità di carico applicato si generano delle tensioni di compressione in prossimità dei bordi che vanno aumentando verso il centro della lastra giungendo a un valore di circa 15 MPa in corrispondenza della sezione in cui cessa l'incollaggio. Inoltre lungo ciascun tratto incollato si nota l'esistenza di un punto a tensione pressoché nulla la cui posizione è indipendente dal valore del carico applicato.

#### Modellazione numerica

Parallelamente allo svolgimento delle indagini sperimentali è stato costruito un modello di calcolo FEM secondo il codice di calcolo Straus7® conducendo un'analisi statica non lineare, ovvero inserendo l'effettivo legame co-

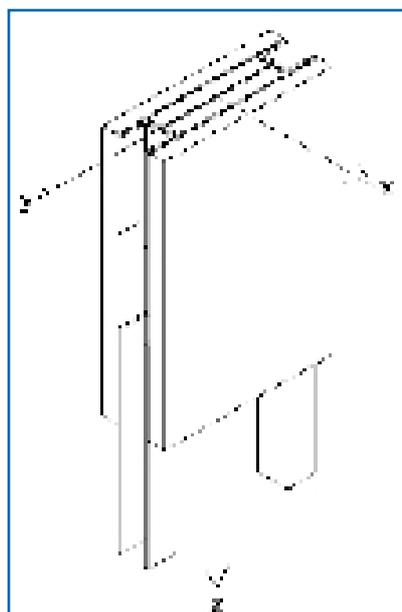


Fig. 5 – Sistema di assi locali

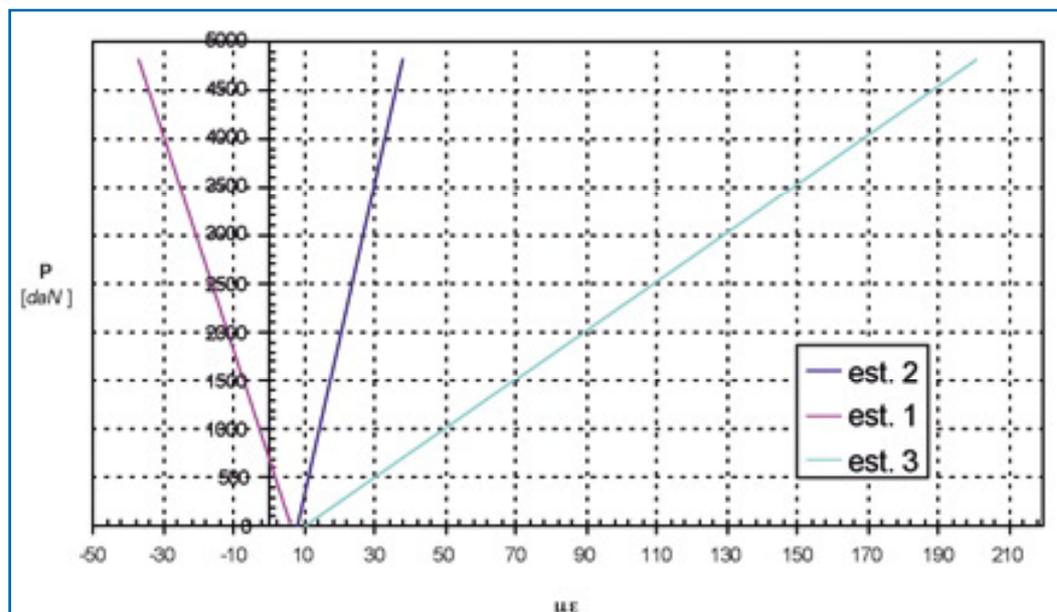


Fig. 6 – Andamento delle deformazioni specifiche lungo il tratto incollato al variare del carico applicato

stitutivo non lineare dell'interlayer. Ai materiali vetro e acciaio invece sono stati attribuiti dei legami costitutivi di tipo elastico-lineare utilizzando i valori tabellari a fianco.

Al fine di ottenere informazioni più dettagliate possibile riguardo le tensioni di contatto all'interfaccia degli elementi e localizzare esattamente picchi di tensione che potrebbero indurre uno stato di crisi nel campione, tutti gli elementi sono stati modellati con elementi "brick" a 8 nodi, costruendo una "mesh" più fitta in corrispondenza delle zone dove sono previste le maggiori concentrazioni di sforzo. Considerando inoltre la simmetria del campione rispetto ai suoi assi baricentrici, è stato possibile analizzare solo una parte dell'intero campione inserendo degli opportuni vincoli di simmetria, ottenendo così un modello di calcolo di dimensioni gestibili dal calcolatore, ma al tempo stesso più raffinato possibile.

Il problema così concepito richiede l'analisi statica non lineare di circa 5000 elementi "brick" per un totale di circa 6500 nodi.

I risultati di questo modello di calcolo sono

VETRO			ACCIAIO		
Modulo di elasticità longitudinale $E$	$7 \cdot 10^4$	MPa	Modulo di elasticità longitudinale $E$	$1,93 \cdot 10^5$	MPa
Coefficiente di Poisson $\nu$	0,21		Coefficiente di Poisson $\nu$	0,28	
Densità	$2,7 \cdot 10^{-6}$	Kg/mm <sup>3</sup>	Densità	$8,0 \cdot 10^{-6}$	Kg/mm <sup>3</sup>
Coefficiente di dilatazione termica	$9,2 \cdot 10^{-6}$	K <sup>-1</sup>	Coefficiente di dilatazione termica	$1,59 \cdot 10^{-5}$	K <sup>-1</sup>
Spessore	10	mm	Spessore	1	mm

Fig. 7 – Proprietà del vetro e dell'acciaio utilizzati

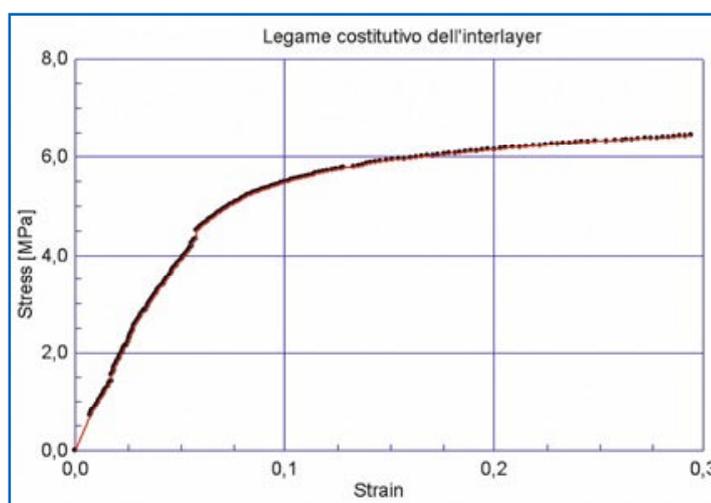


Fig. 8 - Legame costitutivo dell'interlayer ricavato sperimentalmente e inserito nel modello di calcolo

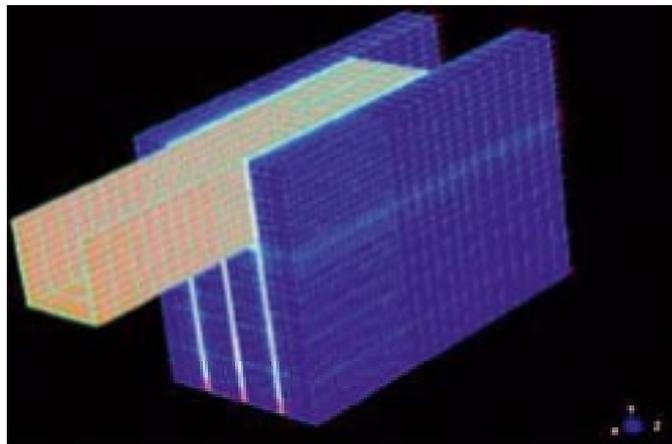


Fig. 9 - Modellazione numerica della prova sperimentale

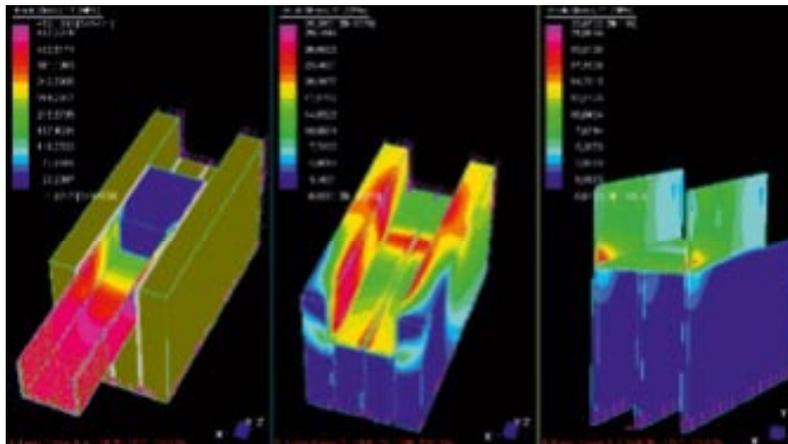


Fig. 10 - Tensioni principali massime nell'acciaio, vetro e interlayer

prossimi a quelli sperimentali, infatti la modellazione ha indicato nel vetro come critico proprio il punto dal quale si è innescata la lesione di rottura e nell'incollaggio proprio quei punti in cui si sono osservate le opacizzazioni nel materiale di interposizione.

La Figura 11 indica l'andamento delle tensioni nelle lastre vitree lungo il tratto incollato: analogamente ai grafici ottenuti mediante i dati sperimentali, si notano delle tensioni di compressione in prossimità dei bordi della lastra che vanno aumentando verso il centro della lastra stessa ed intensificandosi all'aumentare del carico applicato raggiungendo una tensione di circa 15 MPa in corrispondenza del punto in cui cessa l'incollaggio. Anche il modello teorico in ciascun tratto evidenzia l'esistenza di un punto a tensione nulla la cui posizione è invariante rispetto al carico applicato.

#### Conclusioni

Alla luce dei risultati sperimentali, la giunzione così concepita tra profili inox e vetro mostra quelle risorse di duttilità mancanti a livello di singola lastra vitrea grazie alla ridondanza strutturale della giunzione stessa: a

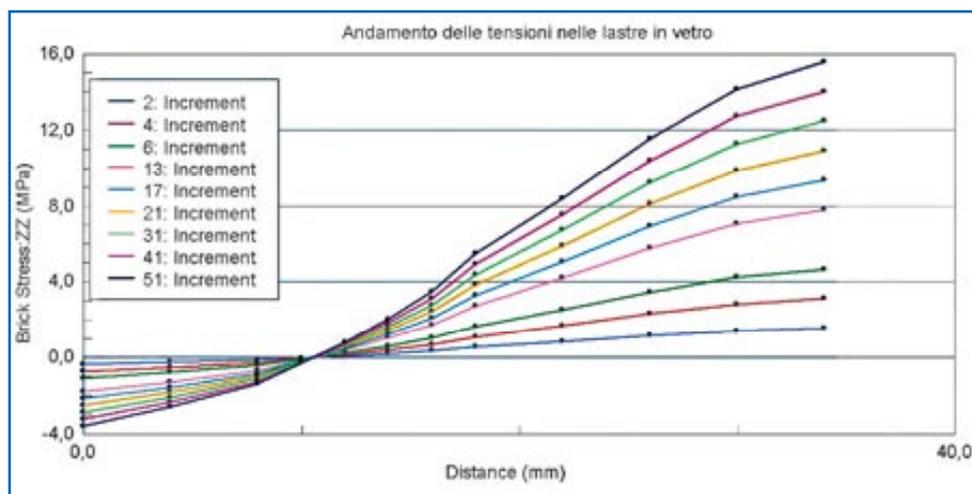


Fig. 11 - Andamenti delle tensioni nelle lastre vitree indicate dal modello di calcolo

seguito delle prime fratture infatti, avvenute nella lastre centrali, la giunzione non perviene complessivamente al collasso, ma continua ad offrire ulteriore rigidità e resistenza.

Il collasso del campione avviene per rottura delle lastre in vetro, nelle sezioni in cui cessano gli incollaggi dei profili inox, e non per perdita di aderenza nel materiale d'incollaggio.

La taratura del modello di calcolo relativo alla prova di trazione, eseguita sulla base dei dati sperimentali, fornisce dei risultati prossimi a quelli ottenuti dalla sperimentazione: la simulazione infatti ha indicato nel vetro come critico proprio il punto dal quale si è innescata la lesione di rottura e

nell'incollaggio proprio quei punti in cui si sono osservate le opacizzazioni nell'interlayer. Inoltre l'andamento delle tensioni di tipo  $\sigma_z$  lungo ciascun tratto incollato evidenziato dalla modellazione teorica è prossimo a quello emerso dalla rielaborazione dei dati sperimentali (vedi Fig. 18): si notano delle tensioni  $\sigma_z$  di compressione in prossimità dei bordi delle lastre che vanno aumentando verso il centro delle lastre dove raggiungono il loro valore massimo proprio in prossimità della fine del tratto incollato. Lungo ciascun tratto incollato si evidenzia un punto a tensione pressoché nulla la cui posizione è invariante rispetto al carico applicato al campione.

(Fine I<sup>a</sup> parte)