

# Comportamento Post-Buckling di Pannelli Irrigiditi In Composito, Realizzati con Diverse Tecnologie, Soggetti a Compressione

L. Boni<sup>1</sup>, D. Fanteria<sup>1</sup>, A. Lanciotti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, Università di Pisa,

## Sommario.

Nel lavoro vengono presentati i risultati di prove di compressione su pannelli irrigiditi in carboresina. L'attività è stata svolta nell'ambito del programma MIUR: "COFIN 2004 – Fusoliera Tutta in Composito per Velivoli Commerciali Pressurizzati di Medie e Grandi Dimensioni". L'attività sperimentale ha preso in considerazione due lotti di pannelli piani realizzati, da Alenia Aeronautica, utilizzando due differenti tecnologie di giunzione dei correnti al rivestimento, ovvero: "co-curing", e "cobonding".

Non si sono riscontrate sostanziali differenze nel comportamento pre e post-buckling delle due tipologie di pannello mentre si è evidenziata una differente modalità di collasso: nei pannelli cocured si osserva un importante fenomeno di peeling dei correnti nella regione centrale assai più contenuto o assente nella tipologia cobonded; comunque queste differenze non alterano significativamente il livello di carico di collasso dei pannelli.

## 1. Introduzione

L'effettiva capacità di ridurre considerevolmente il peso strutturale delle future generazioni di velivoli commerciali si basa anche sulla possibilità di sfruttare pienamente le caratteristiche e le capacità dei materiali compositi ad elevate prestazioni. Per quanto riguarda le strutture primarie di fusoliera apprezzabili vantaggi ponderali possono essere realizzati progettando strutture capaci di lavorare in campo post critico a partire da carichi di compressione ben al di sotto del valore estremo (Carico di Robustezza o "Ultimate load").

La possibilità di progettare e realizzare questo tipo di strutture si fonda sulla disponibilità sia di metodologie e strumenti di calcolo di ausilio al progetto che sulla capacità di convalidare strumenti e metodi mediante il confronto con i risultati di opportune attività di sperimentazione su componenti rappresentativi. L'interesse per queste tematiche è dimostrato dai numerosi lavori scientifici sull'argomento [1-7] e dai programmi di ricerca recentemente finanziati dalla Comunità Europea, quali "POSICOSS" [8] e "COCOMAT" [9], e dal MIUR: "COFIN 2004 – Fusoliera Tutta in Composito per Velivoli Commerciali Pressurizzati di Medie e Grandi Dimensioni", nel quale il presente lavoro si inserisce. In particolare si descrivono i risultati, ottenuti dal gruppo di ricerca dell'Università di Pisa, relativi ad una campagna di prove di laboratorio su due lotti di pannelli piani in carboresina (irrigiditi da 5 correnti con sezione a doppia T e da due setti trasversali) realizzati, da Alenia Aeronautica, utilizzando due differenti tecnologie di giunzione dei correnti al rivestimento, ovvero: "co-curing", correnti e rivestimento soggetti al processo di cura in contemporanea, e "cobonding", correnti pre-curati e incollati al rivestimento durante il processo di cura finale.

Nella memoria vengono presentati e confrontati i risultati relativi ai pannelli delle due tipologie; in particolare si esaminano i risultati delle misure estensimetriche, e gli

spostamenti fuori piano, misurati dai trasduttori LVDT, del corrente centrale e del rivestimento nella baia a fianco a differenti livelli di carico.

## 2. Prove sperimentali

### 2.1. Articoli di prova

Gli articoli di prova sono pannelli piani realizzati in materiale composito, irrigiditi da 5 correnti con sezione a doppia T e da due ordinate.

I pannelli sono stati fabbricati mediante stratificazione di lamine di fibra di carbonio con matrice di resina epossidica; le lamine sono relizzate utilizzando il materiale in forma di nastro unidirezionale o di tessuto bidirezionale ("Plain Weave"); le proprietà tipiche delle lamine base sono riportate in tabella 1.

Il costruttore (Alenia Aeronautica) ha realizzato due serie di articoli di prova, di 3 pannelli ciascuna: la prima (pannelli n. 1-3) ha correnti cocurati con il rivestimento, la seconda (pannelli n. 4-6) presenta correnti pre-curati e incollati al rivestimento durante il processo di cura finale ("cobonded").

Materiale	Caratteristiche elastiche			
	$E_1$ [MPa]	$E_2$ [MPa]	$\nu_{12}$	$G_{12}$ [MPa]
Nastro	124500	9700	0.34	4500
Tessuto	62340	62340	0.40	4130

Tabella 1 Proprietà tipiche dei materiali impiegati

I pannelli hanno larghezza 815 mm e lunghezza 1160 mm con due ordinate centrate rispetto alla mezzeria del pannello e distanziate di 619.6 mm; i pannelli presentano 5 correnti equispaziate di 181 mm e centrati rispetto all'asse longitudinale del pannello (Fig 1). I correnti (fig. 2) hanno sezione a doppia T di altezza 35.2 mm con soletta di collegamento larga 84 mm e flangia libera di larghezza 20 mm; lo spessore è uniforme e pari a 1.62 mm. Le ordinate di spessore 2.94 mm, hanno sezione a L di altezza 96 mm e flangia larga 24.4 mm. Le ordinate sono collegate al rivestimento mediante Hi-Lock in titanio ed ai correnti tramite clip angolari di fissaggio anch'esse fissate con Hi-Lock in titanio.

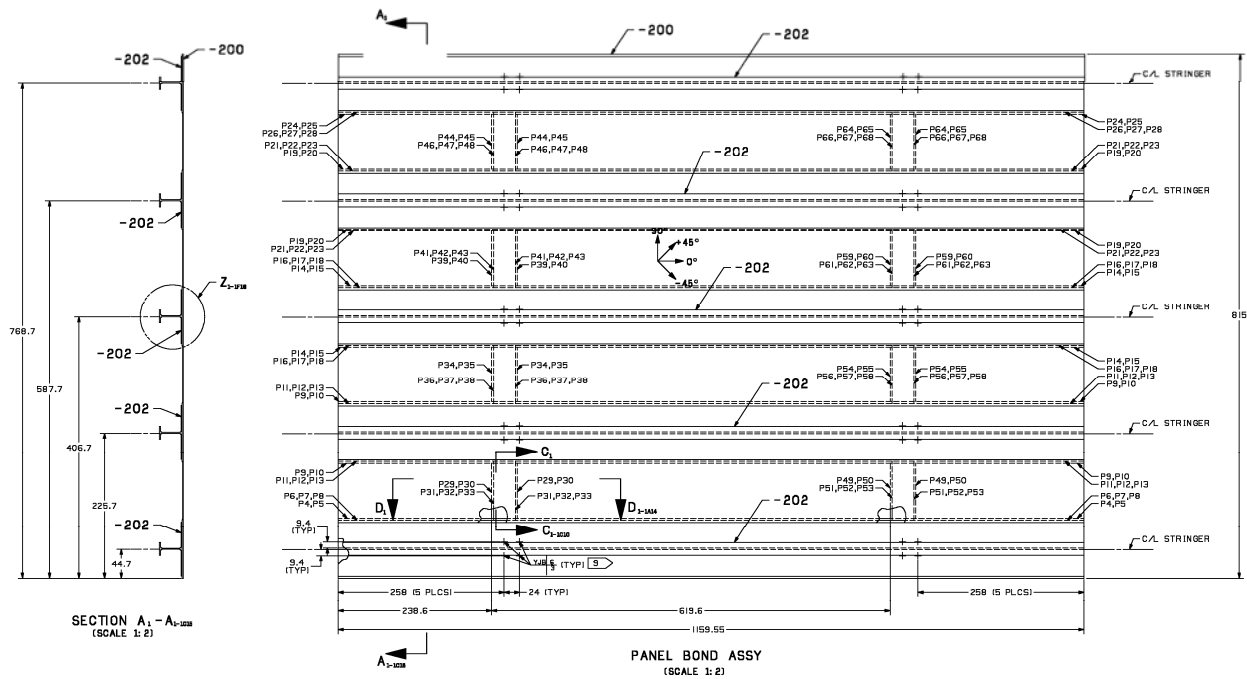


Figura 1 Configurazione geometrica dei pannelli irrigiditi

Il rivestimento presenta uno spessore di circa 1 mm e sono presenti “pad” di irrigidimento localizzati in corrispondenza dei correnti e delle ordinate.

Il sistema di riferimento principale per l’orientamento delle fibre ha asse 0° orientato nella direzione degli irrigidimenti in figura 2 viene mostrata la sequenza di impilamento (Layup) dei vari strati l’orientamento e lo spessore dei quali è definito in tabella 2.

Rif	Identificativo ply	Mat.	Orient. [°]	Spess. [mm]
200	2, 29, 33, 34, 38, 39, 43, 44, 48, 49, 53, 54, 58, 59, 63, 64, 68, 70	Nastro Unidir.	+45	0.140
	5, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 27, 28		0	
	3, 30, 32, 35, 37, 40, 42, 45, 47, 50, 52, 55, 57, 60, 62, 65, 67, 69		-45	
	1, 31, 36, 41, 46, 51, 56, 61, 66, 71, 6, 11, 16, 21, 26		Tessuto 2D	
		+45		
202	1, 6, 15, 20	Tessuto 2D	0	0.191
	3, 5, 8, 10, 11, 13, 16, 18	Nastro Unidir.	0	
	4, 9, 12, 17		-45	0.140
	2, 7, 14, 19		+45	

Tabella 2 Definizione orientamenti e spessori delle ply

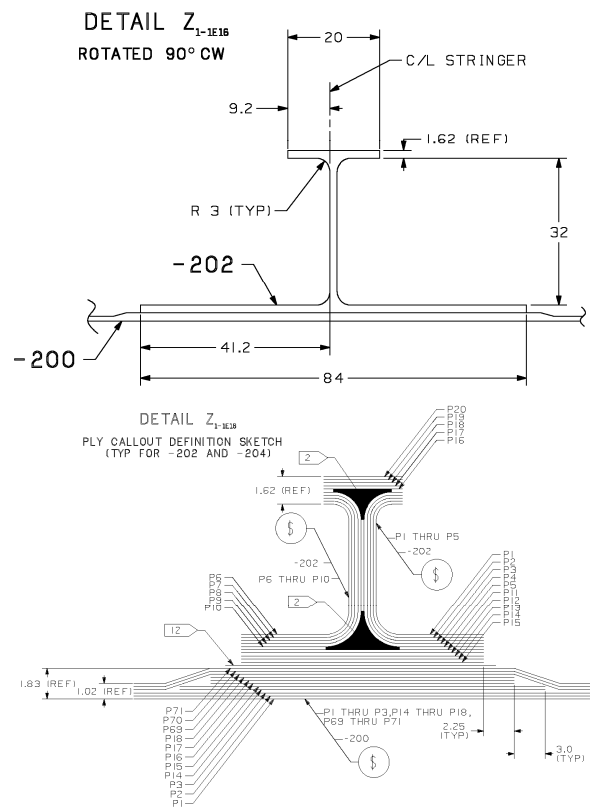


Figura 2– Dettaglio geometria dei correnti e del Lay-up

## 2.2. Attrezzature per le prove di compressione

Le prove sono state condotte su una macchina assiale con carico massimo di 150 ton attrezzata con teste piane di 1250 mm di larghezza (Fig. 3) adeguate per poter caricare in modo uniforme gli articoli di prova che presentano teste di estremità larghe 1025 mm e profonde 160 mm.



a) Dettaglio supporto ordinate



b) Vista retro (lato correnti)



c) Vista fronte (lato rivestimento)

Figura 3 Macchina di prova attrezzata

La cella di carico e il trasduttore di posizione integrati nell'attuatore della macchina di prova vengono utilizzati per misurare il carico complessivo e lo schiacciamento dell'articolo di prova.

Opportune attrezzature di supporto sono state realizzate per sostenere le ordinate e provvedere le adeguate condizioni di vincolo durante la prova. A tal fine le ordinate vengono collegate a piastre di acciaio sagomate sorrette da balestre flessibili ancorate alle colonne della macchina (Fig. 3a): questo sistema consente lo spostamento delle ordinate nella direzione del carico

mentre fornisce un vincolo molto rigido in direzione trasversale. Dal lato dei correnti viene montata una attrezzatura (Fig 3b) che consente la movimentazione, nel tratto compreso tra le due ordinate, in direzione longitudinale (asse correnti), di tre trasduttori di spostamento (LVDT). Tali trasduttori misurano, in corrispondenza di prefissati valori del carico di compressione, gli andamenti degli spostamenti fuori piano del corrente centrale e del rivestimento nella baia adiacente al variare della posizione in senso longitudinale.

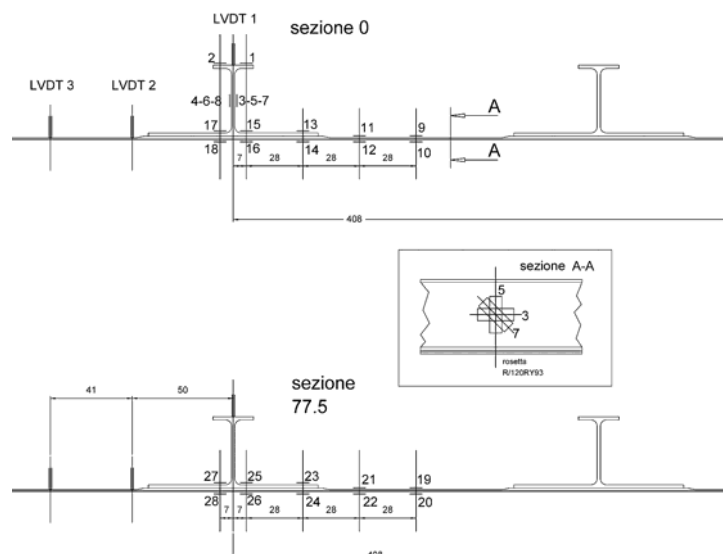


Figura 4 Schema di posizionamento estensimetri e LVDT

Dal lato piano viene montato lo schermo che sostiene la griglia per la visualizzazione, con il metodo “Shadow Moirè”, delle frange interferometriche generate dalle deformazioni fuori piano del pannello (bozze) che insorgono al raggiungimento del carico di instabilità del rivestimento (Fig. 3c).

2.3. Preparazione degli articoli di prova

Sui pannelli vengono posizionati 22 estensimetri mono-assiali “back to back” (in direzione del carico) e 2 rosette estensimetriche sull’anima del corrente centrale (anche queste back to back). In figura 4 viene mostrato lo schema generale di installazione degli estensimetri; la sezione 0 corrisponde alla sezione di mezzeria tra le ordinate mentre la sezione 77.5 si trova ad una distanza di 77.5 mm dalla precedente. I trasduttori di spostamento (LVDT) sono posizionati, come da fig. 4, sul corrente centrale e nella baia a fianco.

I pannelli vengono verniciati di colore bianco dal lato piano per consentire la visione delle frange interferometriche con il metodo “Shadow Moirè”.

2.4. Procedura di prova e misurazioni

In una prima fase il pannello viene caricato comandando la macchina con gradini di spostamento fino a circa 2.5 volte il carico di instabilità del rivestimento, valutato visivamente dalla comparsa delle bozze sul rivestimento stesso.

A ciascun incremento viene effettuata una scansione con il sistema di trascinamento dei trasduttori (LVDT) per acquisire l’andamento, lungo la direzione di applicazione del carico, dello spostamento fuori piano del corrente centrale del rivestimento nella baia a fianco.

In corrispondenza di ogni valore del carico vengono registrate anche le letture di tutti gli estensimetri.

Successivamente l’articolo di prova viene scaricato completamente e vengono verificate le letture estensimetriche evitare la presenza stati di deformazione residua rispetto alla condizione di inizio prova. Quindi viene applicata una rampa di spostamento fino alla rottura del pannello. Durante tutta la prova il pannello viene ripreso da lato dello schermo di Moiré da una videocamera digitale.

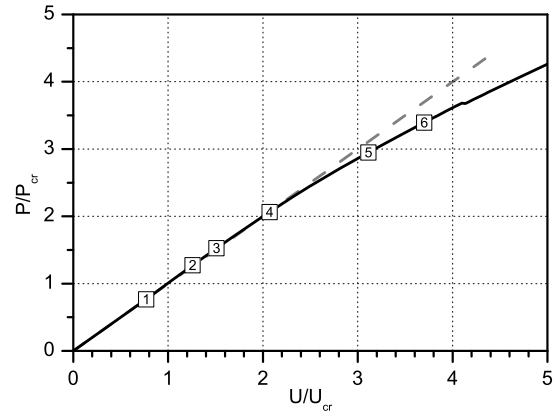


Figura 5 Curva carico-schiacciamento

3. Risultati delle prove

3.1 Curva carico – schiacciamento

In figura 5 viene mostrata una tipica curva carico schiacciamento (relativa al pannello n. 2); i valori sono resi non dimensionali mediante il carico di instabilità del rivestimento, valutato teoricamente, e lo schiacciamento complessivo del pannello calcolato in corrispondenza di detto carico. Si osserva che detta curva è sostanzialmente lineare fino ad un valore del carico circa doppio rispetto al carico di instabilità teorico.

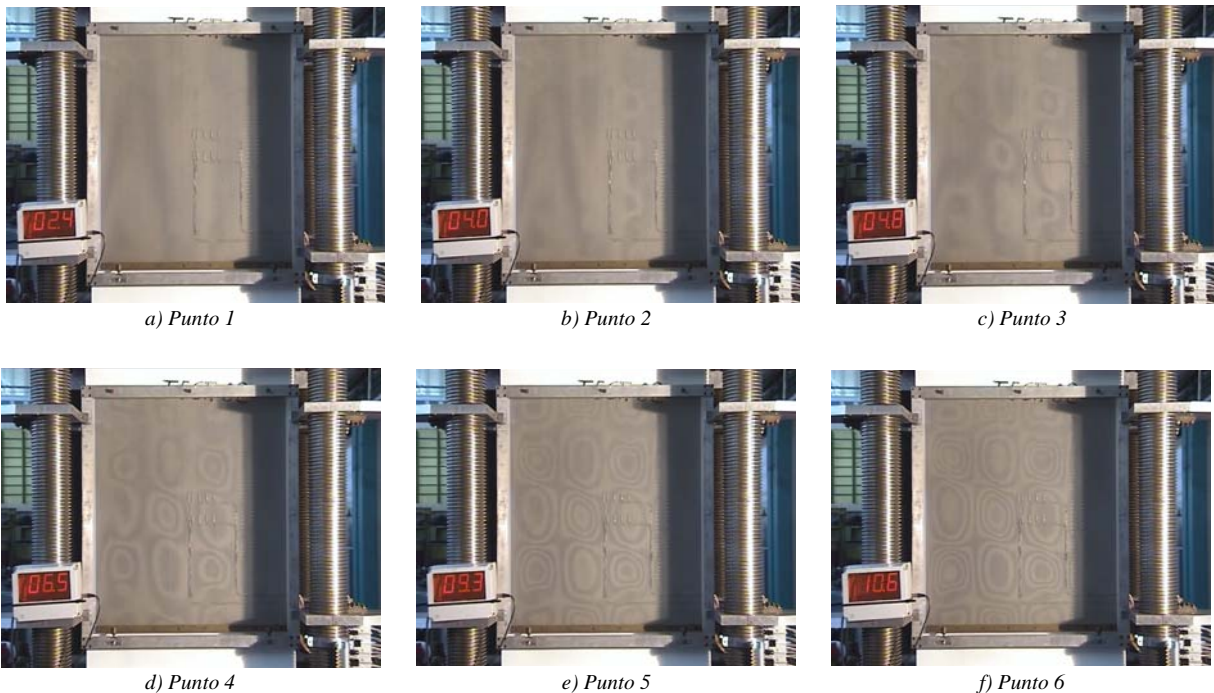


Figura 6 Frange interferometriche di Moiré a crescenti valori del carico (definiti in fig. 5)

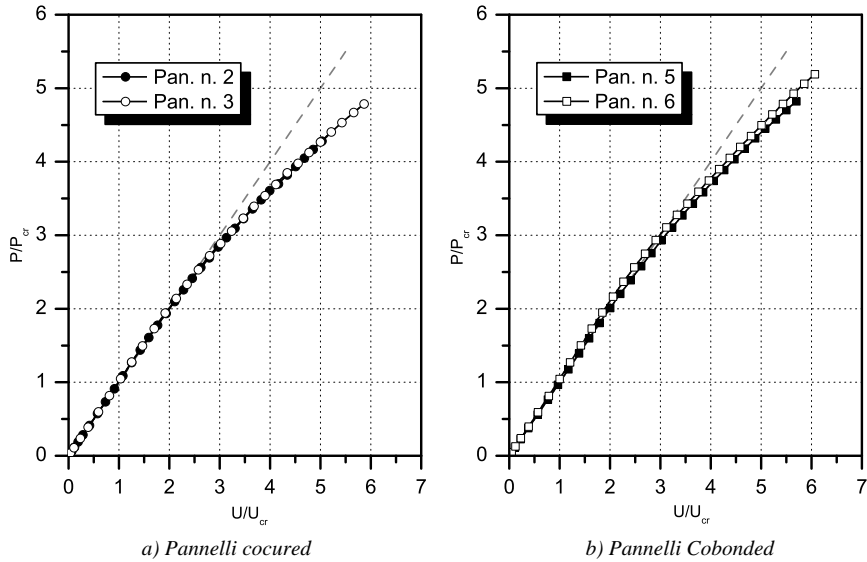


Figura 7 Curve carico-schiacciamento

La curva presenta inoltre una evidente discontinuità in corrispondenza di un valore del carico pari a circa 3.7 volte il carico di instabilità teorico che coincide con il verificarsi di uno scollamento tra corrente e rivestimento nella zona centrale del pannello (peeling).

In figura 6 vengono mostrate le foto del pannello, dal lato dello schermo di Moire, in corrispondenza dei valori del carico indicati con un numero progressivo in figura 5. Da tali foto è possibile apprezzare la deformata qualitativa dell'articolo di prova al crescere del carico applicato; il valore di detto carico è identificato dalla lettura del voltmetro digitale, collegato alla cella di carico, visibile sul lato sinistro delle diverse foto.

In figura 7 vengono mostrate le curve carico-schiacciamento di quattro dei sei pannelli provati (sono stati omessi i primi pannelli delle due serie perchè, a causa di problemi con l'attrezzatura di misura, non sono disponibili le registrazioni complete delle prove).

Dall'analisi della figura 7 si deduce che non vi sono sostanziali differenze di comportamento per le due tipologie di pannelli anche se sono evidenti carichi di collasso maggiori per i pannelli tipo cobonded.

Per questi ultimi si nota inoltre una, seppur lieve, differenza di comportamento tra i due pannelli sottoposti a prova con il pannello n. 6 che presenta valori del carico superiori a parità di spostamento.

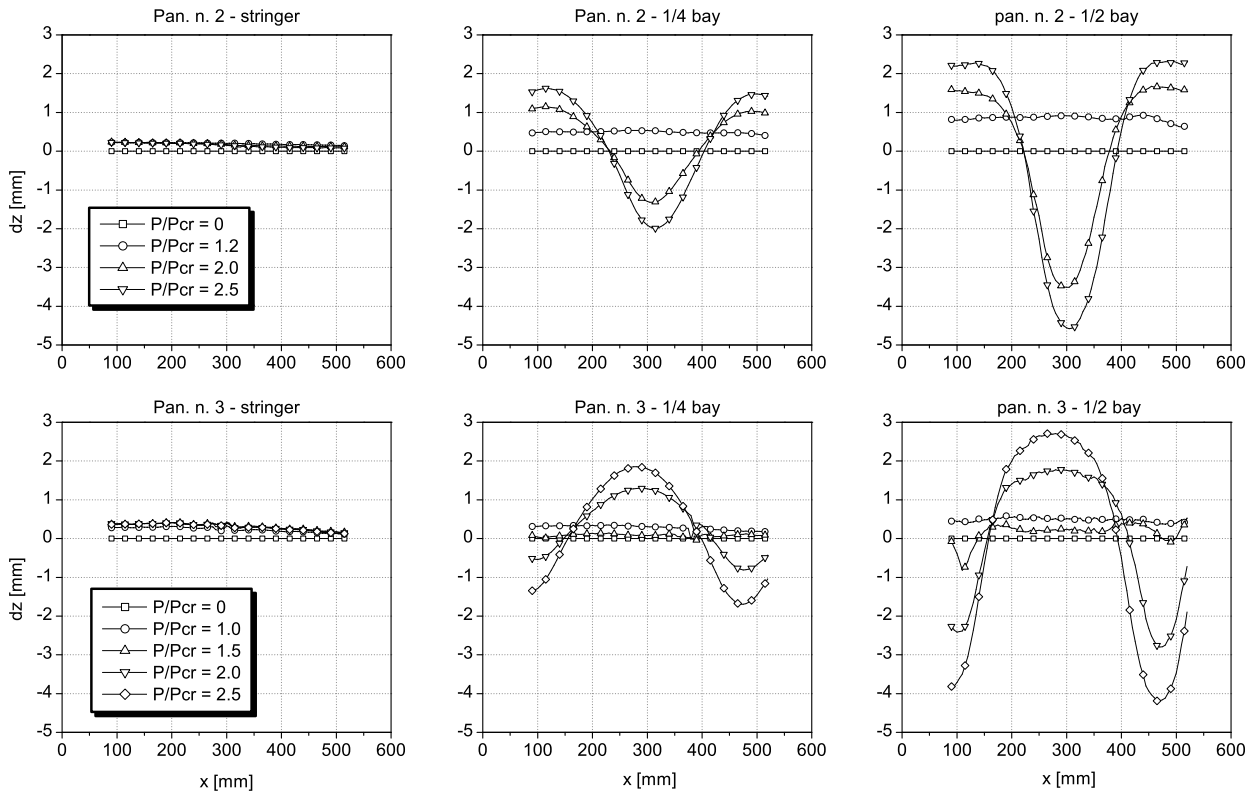


Figura 8 Misure di spostamento fuori piano: pannelli cocured

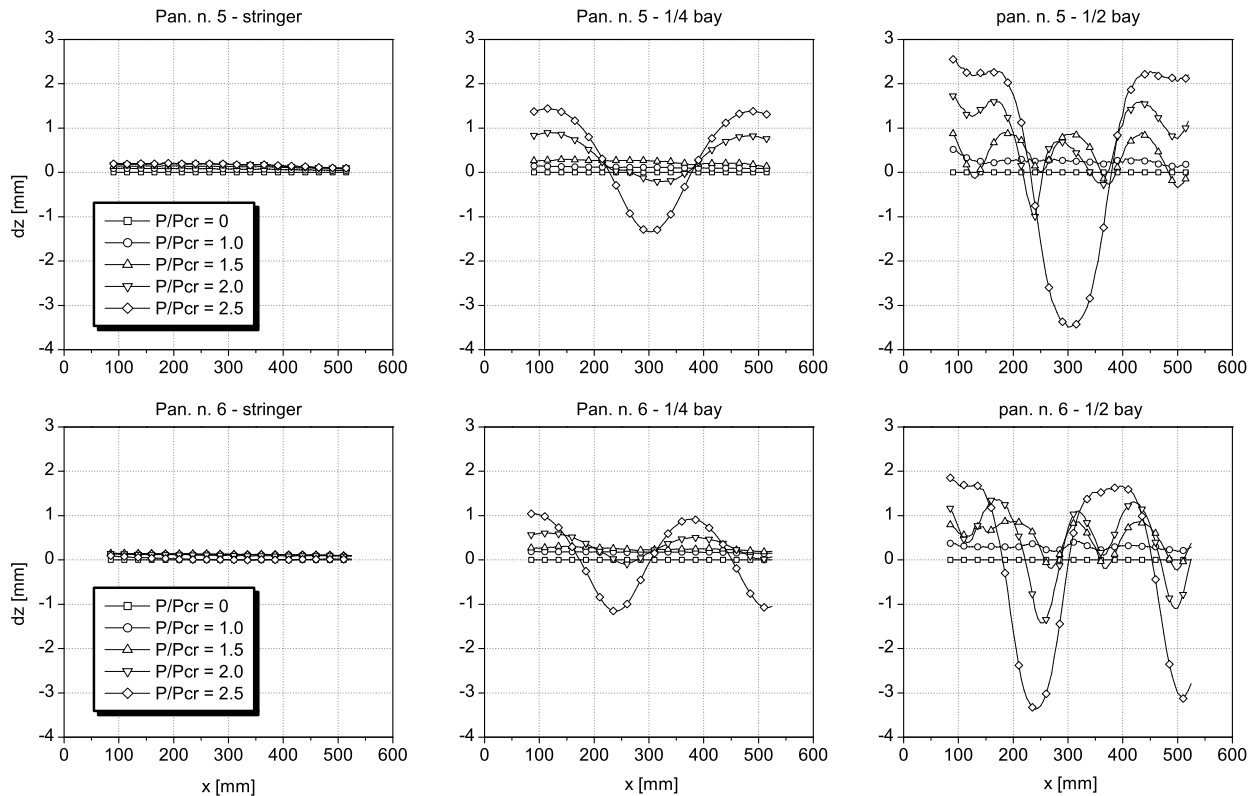


Figura 9 Misure di spostamento fuori piano: pannelli cobonded

### 3.2. Misure di spostamento fuori piano

Nelle figure 8 e 9 vengono mostrati gli andamenti dello spostamento fuori piano, valutati mediante LVDT, in corrispondenza del corrente centrale e del rivestimento. Il comportamento dei due pannelli cocurati è sostanzialmente simile e conferma il passaggio da una forma con 7 bozze di piccola ampiezza, presenti nel solo il rivestimento, ad una caratterizzata da 3 bozze, che si manifestano a valori del carico superiori a 1.5 volte il carico critico teorico e che coinvolgono anche le zone interessate dai pad di rinforzo e dalle flange dei correnti (c.f.r. fig. 6).

I dati relativi ai pannelli cobonded mostrano il fenomeno della transizione in maniera più marcata e si osserva una sostanziale diversità nella deformata ad alti valori del carico: infatti mentre il pannello n. 5 presenta 3 bozze, in analogia con i pannelli cocurati, nel pannello n. 6 sono presenti 4 bozze. Questo fatto è confermato dalla visualizzazione con la tecnica di Moirè come mostrato dalle foto riportate in figura 10.

### 3.3. Misure estensimetriche

Nelle figure 11-14 vengono riportati i grafici delle letture estensimetriche, effettuate durante le prove dei quattro pannelli considerati, limitatamente al rivestimento, ovvero relative agli estensimetri 9-14 e 19-24 di figura 4.

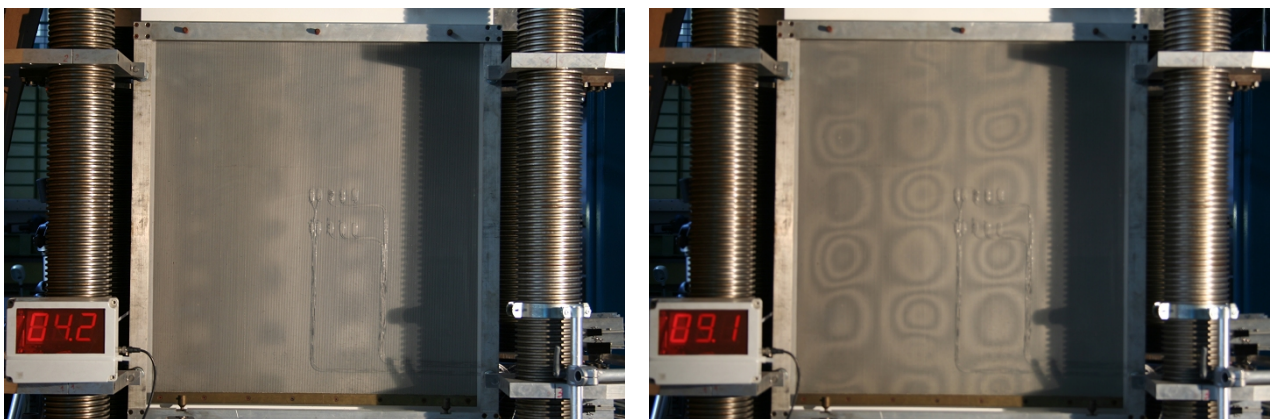


Figura 10 Visualizzazione spostamento fuori piano: pannello n. 6

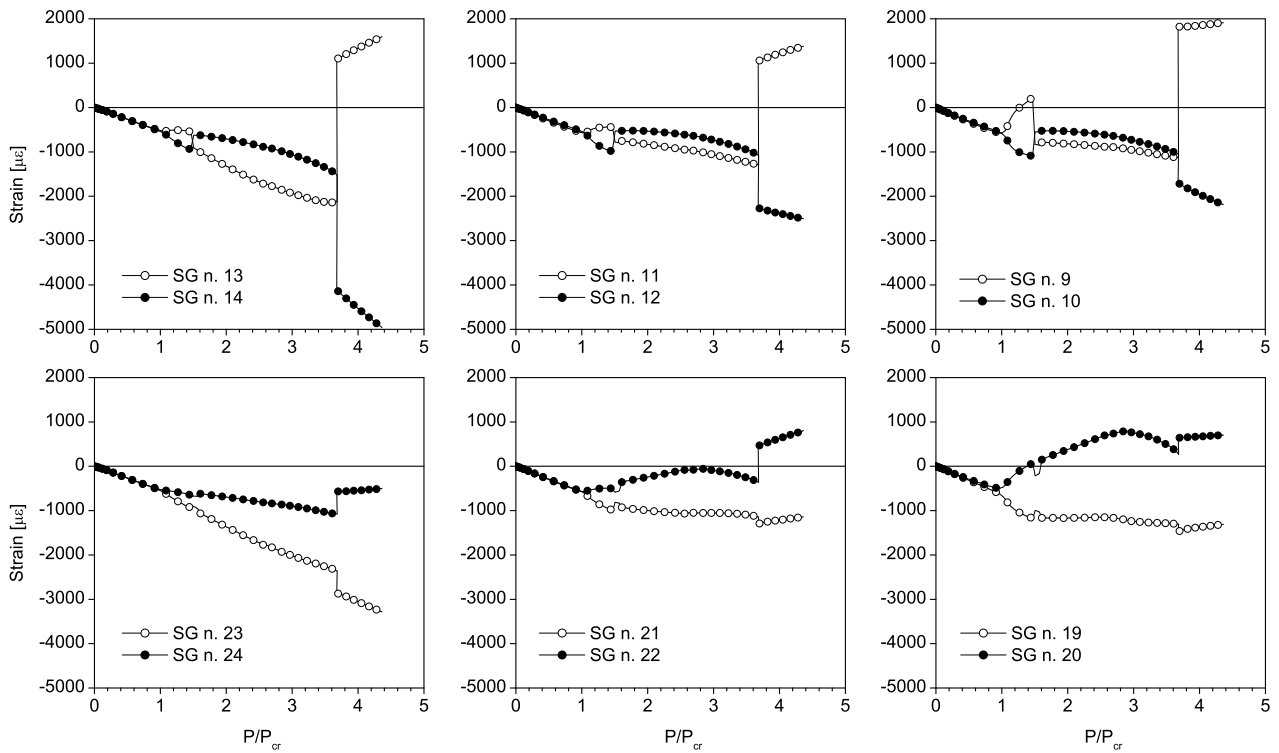


Figura 11 Letture estensimetriche: Pan. n. 2 – rivestimento

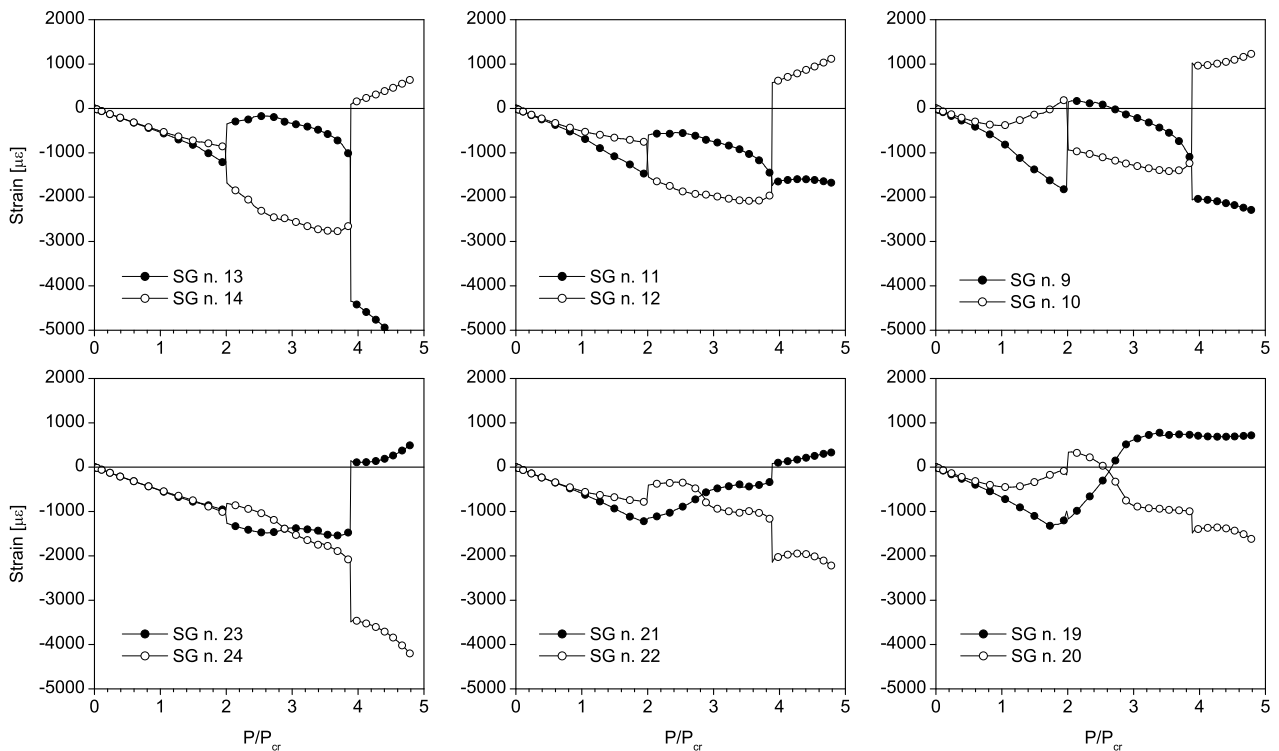


Figura 12 Letture estensimetriche: Pan. n. 3 – rivestimento

Sono evidenti l'insorgere delle bozze ad un valore del carico circa uguale al carico critico teorico e la successiva evoluzione del fenomeno con passaggio da piccole bozze che interessano principalmente il rivestimento a grandi bozze che coinvolgono anche le zone dei pad di rinforzo e delle flangie dei correnti. Le letture estensimetriche confermano inoltre per 3 pannelli su 4 (2 due cocurati e il

n. 5 cocbonded) il verificarsi della separazione (Peeling) del rivestimento dai correnti nella zona centrale del pannello (sostanzialmente a metà tra le ordinate) ad elevati valori del carico (di poco inferiori a 4 volte il carico critico per i pannelli cocurati e compreso tra 4 e 5 volte detto carico per il pannello cocbonded).

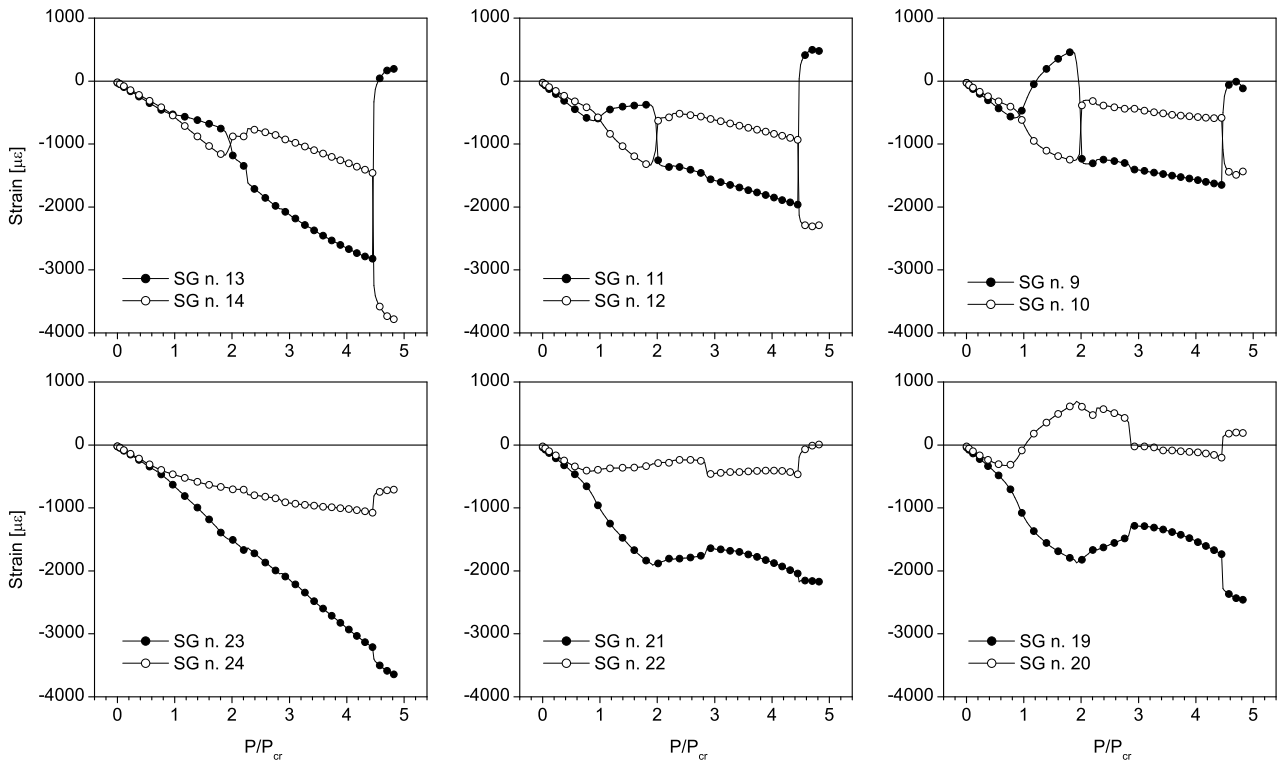


Figura 13 Letture estensimetriche Pan. n. 5 – rivestimento

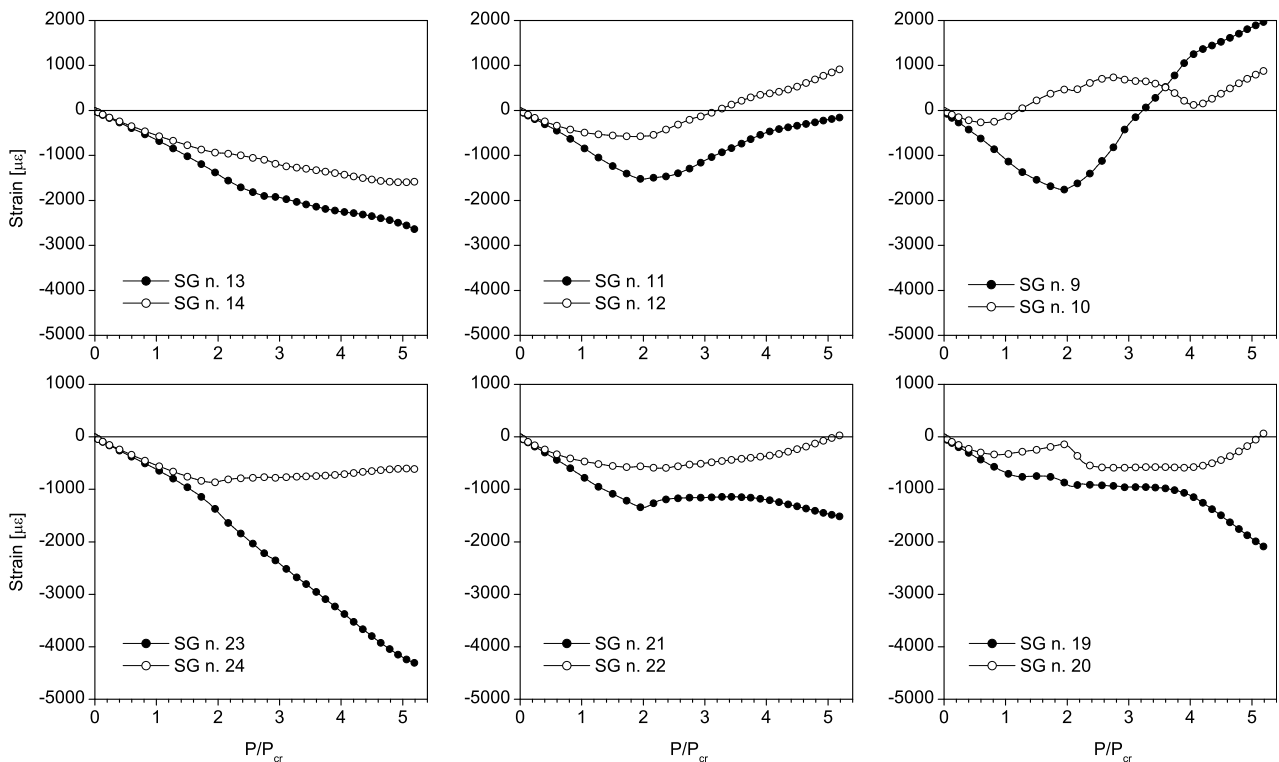


Figura 14 Letture estensimetriche Pan. n. 6 – rivestimento

Le letture estensimetriche sul corrente (di cui si riportano i grafici relativi al pannello 2 e 6 nelle figure 15 e 16 rispettivamente) evidenziano per gli stessi tre pannelli un consistente sbandamento laterale della flangia libera del corrente centrale (estensimetri 1-2) al momento della transizione della deformata fuori piano da piccole a grandi bozze. Il fenomeno non sembra comunque alterare

significativamente lo stato di deformazione nella zona di collegamento con il rivestimento alla base del corrente. Per quanto riguarda il pannello 6 il fenomeno è mitigato anche se si evidenziano letture alla base in corrispondenza della baia 77.5 che fanno supporre una sostanziale rotazione del corrente tra le due ordinate.

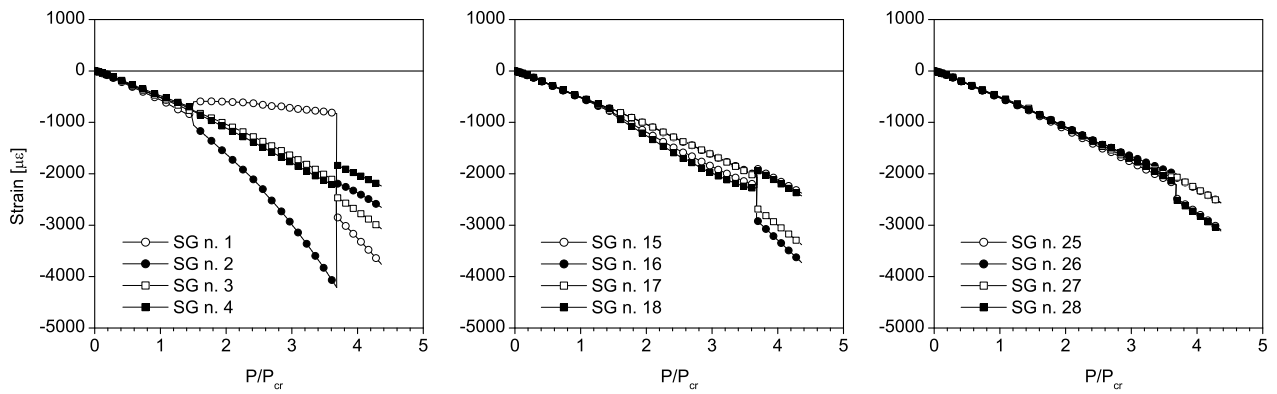


Figura 15 Letture estensimetriche: Pan. n. 2 – stringer

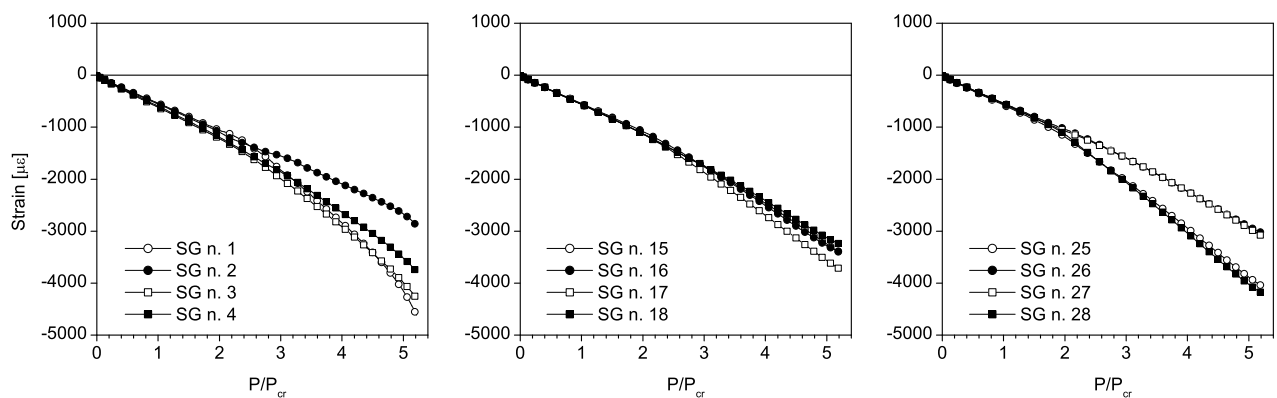


Figura 16 Letture estensimetriche: Pan. n. 6 – stringer

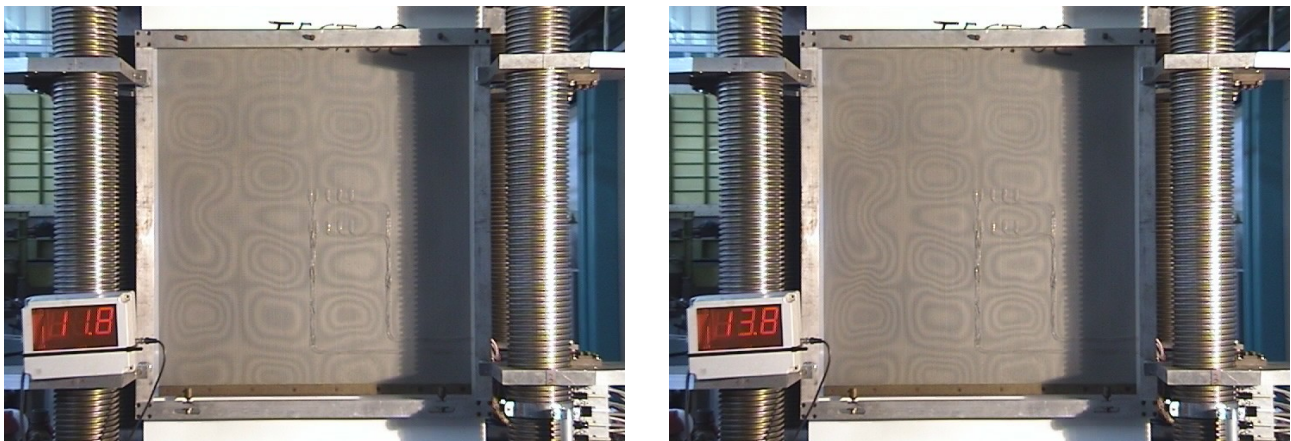


Figura 17 Deformate post peeling e all'insorgere della rottura (Pannello n. 2).

### 3.4. Modalità di collasso dei pannelli

Il cedimento dei pannelli cocurati avviene tipicamente in due tempi (in figura 17 sono mostrate le foto relative al pan. 2): inizialmente si osserva la separazione tra correnti e rivestimento nella zona centrale (bozza asimmetrica) successivamente si ha il vero e proprio collasso della struttura per cedimento improvviso dei correnti. Il primo dei pannelli cobonded presenta analoghe modalità di cedimento mentre il secondo cede senza che si verifichi il fenomeno del peeling.

## 4. Conclusioni

Sono stati presentati i risultati di prove di compressione su pannelli irrigiditi in carboresina provenienti da due lotti di pannelli piani realizzati utilizzando due differenti tecnologie di giunzione dei correnti al rivestimento, ovvero: "co-curing", e "cobonding".

Non si sono evidenziate sostanziali differenze nel comportamento pre e post-buckling delle due tipologie di pannello: entrambe presentano una deformata fuori piano inizialmente caratterizzata da bozze di piccola ampiezza, che interessano il solo rivestimento, la quale successivamente all'aumentare del carico si porta ad una configurazione a 3 (o 4) bozze di dimensioni maggiori che coinvolgono i pad e le flangie dei correnti.

## Riferimenti bibliografici

1. Starnes, J.H., Norman, F.K.J, and Rouse, M., "Postbuckling Behavior of selected flat stiffened graphite-epoxy panels loaded in compression", AIAA Journal, vol. 23, No. 8, 1985, pp. 1236-1246.
2. Chiarelli M., Lanciotti A. and Lazzeri L., "Compression behaviour of flat stiffened panels made of composite material", Composite Structures, Volume 36, Issues 1-2, September-October 1996, pp. 161-169.
3. Bisagni, C., "Numerical analysis and experimental correlation of composite shell buckling and postbuckling", Composites Part B: Engineering, Vol. 31, Is. 8, 2000, pp. 655-667.
4. Gaudenzi, P., Perugini, P. and Riccio, A., "Post-buckling behavior of composite panels in the presence of unstable delaminations", Composite Structures, Volume 51, Issue 3, , March 2001, pp. 301-309.
5. Caputo, F., Esposito, R., Perugini, P., and Santoro, D., "Numerical-experimental investigation on post-buckled stiffened composite panels", Composite Structures, Volume 55, Issue 3, , February-March 2002, pp. 347-357.
6. Bisagni, C., and Cordisco, P., "Testing of stiffened composite cylindrical shells in the postbuckling range until failure", AIAA Journal, Vol. 42, N. 9, 2004, pp.1806-1817.
7. Se-Hee, O., Kwang-Soo, K., and Chun-Gon, K., "An efficient postbuckling analysis technique for composite stiffened curved panels", Composite Structures, Vol. 74, Is. 3, August 2006, pp. 361-369.
8. Zimmermann, R., and Rolfes, R., "POSICOSS - improved postbuckling simulation for design of fibre composite stiffened fuselage structures", Composite Structures, Vol. 73, Is. 2, May 2006, pp. 171-174.
9. Degenhardt, R., Rolfes R., Zimmermann, R., and Rohwer, K., "COCOMAT - improved material exploitation of composite airframe structures by accurate simulation of postbuckling and collapse", Composite Structures, Vol. 73, Is. 2, May 2006, pp. 175-178.