

**CAPITOLO IV – INDAGINE SPERIMENTALE SULL’INFLUENZA
DELL’ANGOLO DI FIBRATURA NEI CONFRONTI
DELLA CRISI PER RIFOLLAMENTO DI
GIUNZIONI BULLONATE DI FRP**

1. Introduzione

Il crescente successo applicativo dei profili pultrusi di materiale composito fibrorinforzato (FRP - *Fiber Reinforced Polymer*) per la realizzazione di strutture civili e la conseguente innovazione tecnologica hanno attirato da tempo l’interesse la comunità scientifica internazionale, focalizzandolo sull’approfondimento degli aspetti peculiari connessi all’utilizzo dei nuovi materiali [42]. I metodi di calcolo messi a punto nel corso degli anni per le strutture realizzate con materiali tradizionali non sempre possono essere utilizzati anche per le strutture di FRP, caratterizzate da un diverso comportamento costitutivo con proprietà di simmetria, valori di rigidità, duttilità e resistenza notevolmente diversi.

Un tema molto complesso e di centrale importanza, non ancora adeguatamente investigato, attiene ai problemi di progetto e verifica delle connessioni strutturali di tipo bullonato. A tal proposito va tenuto presente che la vasta letteratura esistente sui collegamenti di strutture composite in campo aeronautico, meccanico e navale, non può essere direttamente utilizzata per quello civile. Ciò dipende soprattutto dalle diversità delle proprietà costitutive dei materiali compositi utilizzati nei vari ambiti applicativi, oltre che dalle diverse scale geometriche.

In particolare, studi significativi, sia a carattere teorico-numericò che sperimentale, sono stati recentemente condotti in campo civile da diversi ricercatori su alcune tipologie di collegamenti bullonati. Tra di essi, meritano particolare attenzione i lavori di, Camanho e Matthews [43], Ekh, Schön e Melin [44, 45], Hassan, Mohamedien e Rizkalla [46], Ireman [47], Kelly e Hallström [48], Li, Kelly e Crosky [49], Lie, Yu e Zhao [50], Starikov e Schön [51], Vangrimde e Boukhili [52, 53], Xiao e Ishikawa [54], Yan, Wen, Chang e Shyprykevich [55].

I risultati conseguiti dai suddetti studiosi hanno evidenziato le modalità di crisi delle connessioni bullonate tra laminati individuando i principali fattori che ne sono responsabili:

- geometria dell'unione, ovvero diametro e passo dei bulloni, distanze dei fori dai bordi, larghezza e spessore degli elementi da collegare;
- tipo di matrice e natura delle fibre;
- struttura del pacchetto di laminazione.

1.1. Obiettivi della tesi in tema di giunti bullonati

L'indagine sperimentale svolta nel presente lavoro di tesi è stata dedicata allo studio delle modalità di crisi di giunzioni bullonate tra elementi strutturali di FRP, in particolare, all'influenza dell'angolo di fibratura del composito nei riguardi della resistenza a rifollamento del giunto.

Preliminarmente, è stata eseguita un'analisi agli elementi finiti (FEM) che ha fornito utili indicazioni circa l'entità e la distribuzione delle tensioni che si mobilitano in corrispondenza del foro centrale di una piastra di materiale composito soggetta all'azione di uno sforzo trasmesso da un singolo bullone. Inoltre, i risultati dell'analisi FEM hanno consentito di ottenere utili informazioni circa [56]:

- i) le caratteristiche geometriche dei provini da sottoporre a prova;
- ii) le modalità di strumentazione dei provini;
- iii) il numero ed i valori dell'angolo di inclinazione delle fibre da considerare nell'analisi sperimentale;
- iv) l'influenza dell'angolo di fibratura sullo stato tensionale intorno al foro.

Sono stati sottoposti a prova laminati compositi sia monostrato che pluristrato. In particolare questi ultimi, entrambi del tipo *cross-ply*, presentano un i seguenti due schemi di laminazione: $[(0_6/90_6)]_s$ (laminato tipo 1) ed $[(0_3/90_3)_2]_s$ (laminato tipo 2).

2. Modalità di crisi dei collegamenti bullonati

Le principali modalità di crisi di un collegamento bullonato tra materiali compositi fibrorinforzati sono le seguenti (Fig. 2.1.a-d):

- rottura per strappo del piatto (*net-section failure*);
- rottura per strappo del bullone (*shear-out failure*);
- rottura per rifollamento del foro (*bearing failure*);
- rottura del bullone per taglio (*fastener shear failure*).

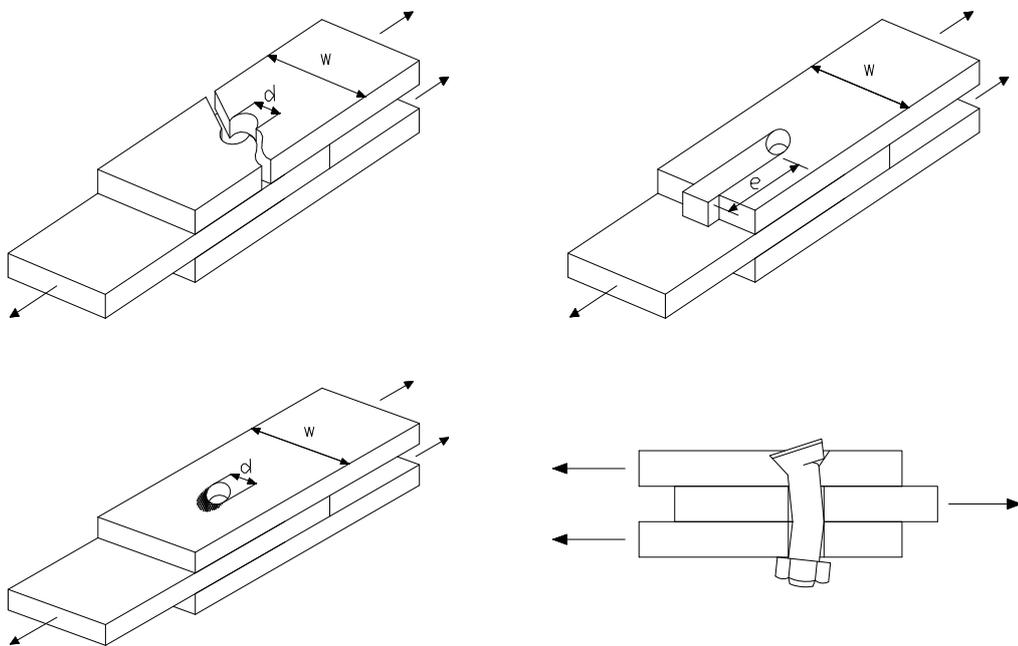


Figura 2.1 – Modalità di crisi di un collegamento bullonato: a) Rottura per strappo del piatto; b) Rottura per strappo del bullone; c) Rottura per rifollamento del foro; d) Rottura del bullone per taglio.

La prima modalità (Fig. 2.1a) interessa la sezione resistente del piatto, ortogonale alla direzione dello sforzo trasmesso dal bullone, che risulta indebolita

dalla presenza del foro. Essa si verifica generalmente quando i due rapporti tra il diametro del foro, d , e la larghezza del piatto, w , e tra il valore dello sforzo e la resistenza a rifollamento, assumono valori elevati.

La rottura per strappo del bullone (Fig. 2.1.b) è causata dalle tensioni tangenziali che si mobilitano parallelamente alla direzione dello sforzo di taglio nel bullone. Essa si verifica generalmente quando la distanza, e , del foro rispetto al bordo libero del piatto è piccola.

La rottura per rifollamento (Fig. 2.1.c) interessa il materiale immediatamente adiacente la zona di contatto tra il gambo del bullone e la parete del foro. Essa è determinata dalle tensioni di compressione che agiscono sulla superficie del foro e si manifesta generalmente per piccoli valori del rapporto (d/w) o del rapporto tra lo sforzo sollecitante e la resistenza a rifollamento. Tale comportamento, verificato sperimentalmente per materiali duttili, quali l'acciaio, deve essere adeguatamente investigato nel caso dei materiali compositi, per i quali non è nota a priori la zona interessata dal collasso del materiale, in presenza di modalità di crisi anche diverse da quelle proprie dei metalli.

La quarta modalità di crisi (Fig. 2.1d) è generata da elevati valori delle tensioni tangenziali agenti nel bullone.

3. Impianto sperimentale

Sono state confezionate tre serie di sedici provini ricavati a partire da piastre monostrato di GFRP (*Glass-FRP*). Tali piastre sono state ottenute per laminazione sottovuoto di otto strati di tessuto in fibra di vetro, più due strati di tessuto tipo *mat*, impregnati con resina epossidica. Le frazioni volumetriche delle fibre e della matrice sono pari, rispettivamente, al 60% e al 40%, circa.

I sedici provini di GFRP presentano forma quadrata (Fig. 3.1) di lato 500mm e spessore pari a 10mm. Su ciascun provino sono stati praticati quattro fori d'angolo ed altri due fori, di diametro pari a 21mm. Di essi, il primo è posizionato al centro (foro 0), ed il secondo (foro i), strumentale per la prova, è ubicato in corrispondenza del bordo in modo che la retta passante per i centri dei due fori, r_{0i} (coincidente con la direzione dello sforzo sollecitante), formi con la direzione delle fibre un angolo α di prefissato valore. In particolare, i sedici provini di ciascuna serie corrispondono ai seguenti sedici valori nominali del suddetto angolo α : $0^\circ, 1^\circ, 3^\circ, 5^\circ, 7^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ e 90° .

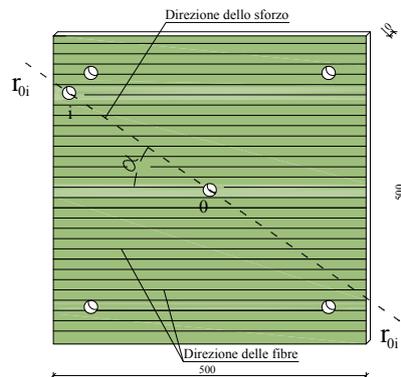


Figura 3.1 – Generico provino di GFRP (dimensioni in mm).

I valori nominali delle principali caratteristiche meccaniche delle fibre e della matrice costituenti il composito sono riportati, rispettivamente, nelle Tabelle 21 e 22.

Tabella 21 – Caratteristiche meccaniche delle fibre.

Valori nominali forniti dal produttore	Unità di misura	Valore
Densità volumetrica	g/cm ³	2.14
Diametro filamento	µm	14
Carico di rottura a trazione delle fibre	MPa	2500
Modulo di elasticità a trazione delle fibre	GPa	50
Allungamento a rottura	%	3.5 - 4.0

Tabella 22 – Caratteristiche meccaniche della resina.

Valori nominali forniti dal produttore	Unità di misura	Valore
Resistenza a trazione	MPa	26
Modulo di elasticità normale a trazione	MPa	1400

Il valore del modulo elastico delle fibre e quello della percentuale volumetrica delle stesse sono state successivamente confermate da prove in laboratorio.

In particolare, la percentuale volumetrica di fibre, è stata verificata dallo scrivente con l'ausilio di un microscopio elettronico (*SEM*). Quest'ultimo ha consentito di rilevare la presenza di una direzione prevalente delle fibre con percentuale volumetrica pari al 40% e altre fibre appartenenti a strati tipo *mat*, con percentuale volumetrica complessiva di circa il 20%.

Si riportano di seguito due foto del provino di GFRP, delle quali la seconda è stata scattata al microscopio elettronico.

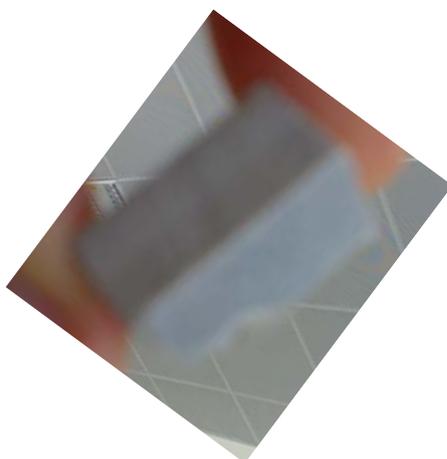


Figura 3.2 – Foto del provino di GFRP.

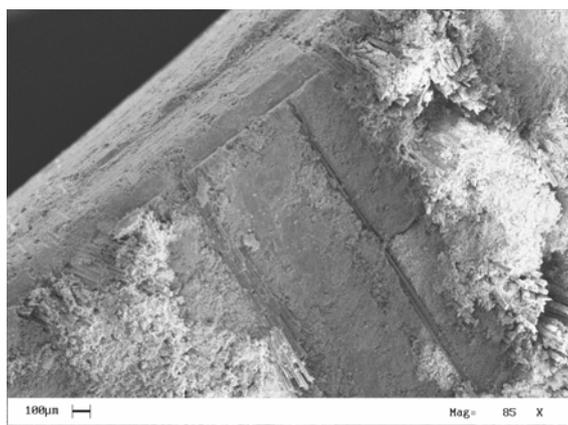


Figura 3.3 – Foto al microscopio elettronico del provino di GFRP.

Allo scopo di determinare le proprietà meccaniche del laminato composito, sono state inoltre eseguite prove di trazione e compressione su provini ricavati dalle piastre. I risultati delle suddette prove, unitamente alla loro descrizione sono riportati nei successivi paragrafi.

3.1. Caratterizzazione meccanica dei prototipi

3.1.1. Prove di compressione

Al fine di determinare le caratteristiche meccaniche “a compressione” del materiale è stato realizzato nell’ambito del presente lavoro, un apposito dispositivo di prova che risponde ai requisiti della norma EN ISO 14126: 1999 (*Fibre reinforced plastic composites – Determination of compressive properties in the in-plane direction*) e della norma D 3410/D 3410M-03 (*Standard test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading*).

Il dispositivo (Figg. 3.4-3.5a-b) consiste in due supporti di acciaio, superiore ed inferiore, all’interno dei quali sono alloggiati due coppie di ganasce, anch’esse di acciaio. I provini di GFRP sono ammorinati a queste ultime mediante opportune viti, così come illustrato nella figura 3.6.

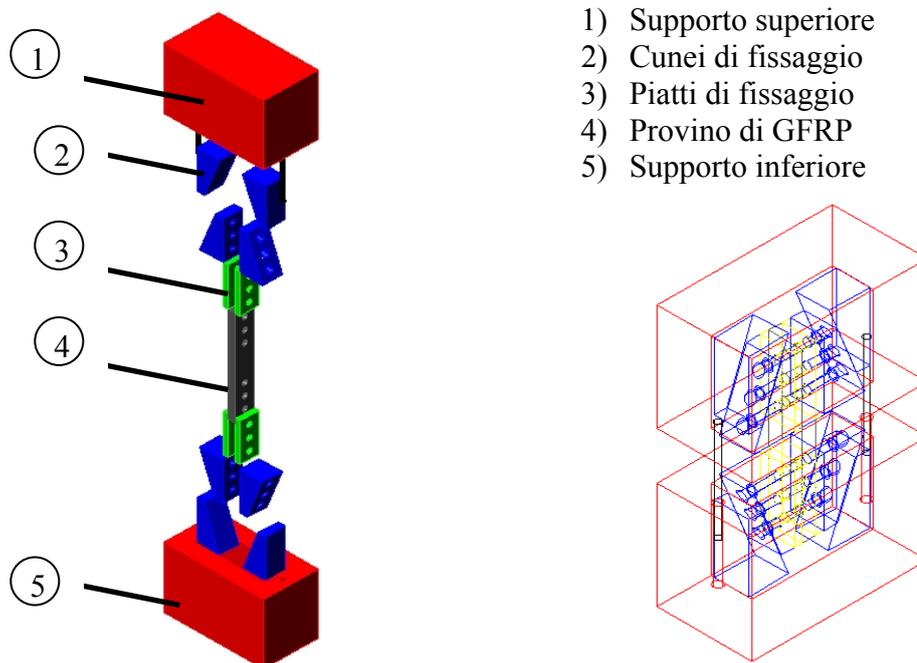


Figura 3.4 – Vista 3D del dispositivo di prova.

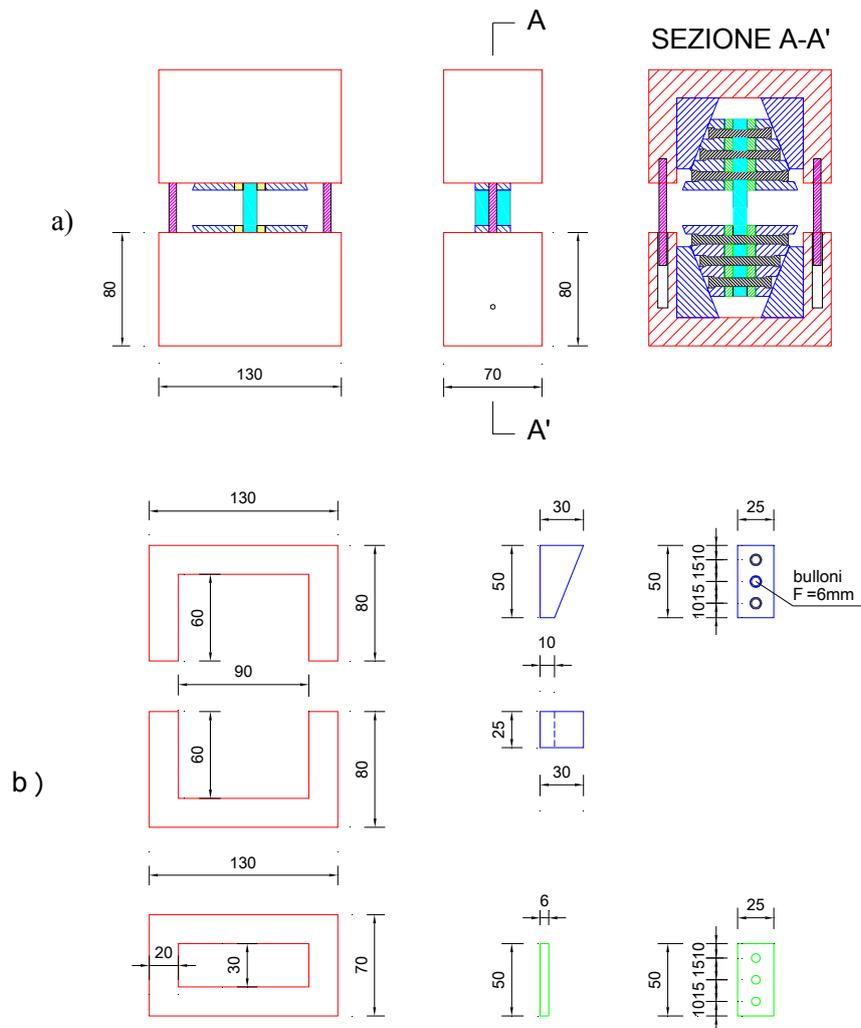


Figura 3.5 – Disegni schematici del dispositivo di prova: a) Vista laterale e sezione; b) particolari.

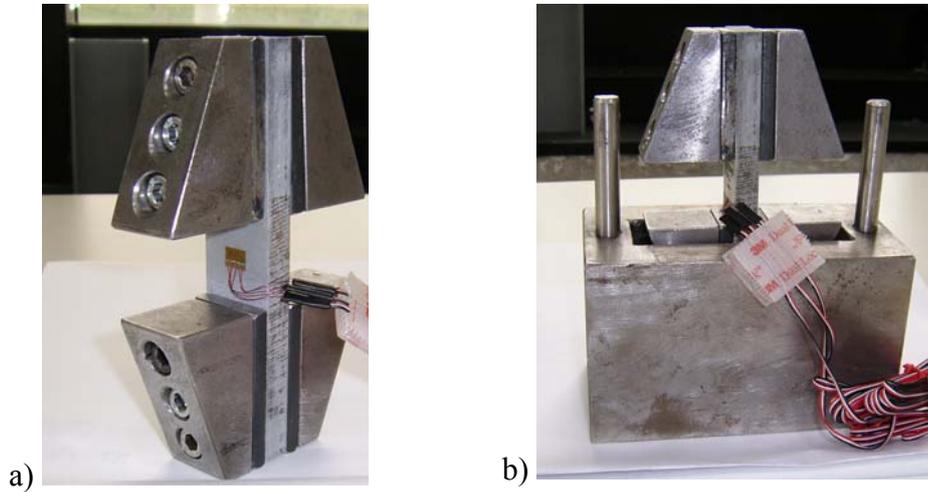


Figura 3.6 – Foto del sistema: a) sistema ganascе-viti; b) inserimento nel supporto inferiore.

Una volta predisposto, il dispositivo viene inserito tra i piatti di una pressa (Fig. 3.7) e la prova di compressione viene eseguita secondo la procedura indicata nelle suddette normative, riportate in Appendice A7.



Figura 3.7 – Dispositivo di prova inserito tra le ganascе della macchina universale.

3.1.2. Provini

Le prove di compressione sono state eseguite su provini ricavati dalle piastre di GFRP ed aventi forma rettangolare delle seguenti dimensioni 125mmx25mm (Fig. 3.8). In particolare, sono stati sottoposti a prova 5 campioni con le fibre disposte parallelamente all'asse dello sforzo di compressione e 5 campioni con fibre disposte in direzione ortogonale a quest'ultimo secondo quanto prescritto dalla norma EN ISO 14126: 1999.



Figura 3.8 – Provino di GFRP per la prova di compressione.

Ciascun provino è stato strumentato mediante una coppia di rosette estensimetriche rettangolari caratterizzate dalla presenza di tre griglie estensimetriche, inclinate tra loro di un angolo pari a 45° , (rosette Vishay Micro-Measurements tipo C2A-06-062LR-120) con resistenza pari a $120 \pm 0.6 \text{ Ohm}$ a 24°C .

Il sistema di acquisizione dati utilizzato è composto da una centralina “System 5100 Vishay MM” dotata di 20 canali estensimetrici.

3.1.3. Risultati delle prove

Attraverso le prove di compressione sono stati desunti i valori della resistenza a compressione, $\sigma_{cM,\alpha}$ ($\alpha=0^\circ, 90^\circ$), e del modulo di elasticità normale, $E_{c,\alpha}$ ($\alpha=0^\circ, 90^\circ$). Si precisa che per il calcolo delle suddette quantità si è fatto riferimento alle relazioni di seguito riportate, secondo quanto stabilito, in particolare, dalla EN ISO 14126:1999 (Vedere Appendice A7).

La resistenza a compressione, $\sigma_{cM,\alpha}$, misurata in Megapascal, viene valutata utilizzando la formula:

$$\sigma_{cM,\alpha} = \frac{F_{\max}}{bh} \quad (2.1a)$$

I simboli in essa presenti hanno il seguente significato di seguito specificato:

F_{\max} rappresenta il carico massimo, espresso in Newton;

b è la larghezza, in millimetri, del provino;

h è lo spessore, in millimetri, del provino.

Per quanto riguarda, invece, la valutazione del modulo di compressione $E_{c,\alpha}$, espresso in Megapascal, si fa riferimento alla seguente relazione:

$$E_{c,\alpha} = \frac{\sigma''_c - \sigma'_c}{\varepsilon''_c - \varepsilon'_c} \quad (2.1a)$$

In essa:

σ''_c rappresenta la tensione di compressione corrispondente alla deformazione $\varepsilon''_c = 0.0025$, espressa in megapascal;

σ'_c rappresenta, invece, la tensione di compressione per $\varepsilon'_c = 0.0005$, espressa sempre in Megapascal.

I risultati delle suddette prove sono sintetizzati nella Tabella 24, riportata nel successivo paragrafo.

3.1.4. Prove di trazione

Le prove di trazione sono state eseguite, così come per quelle di compressione, su 10 campioni. Di essi 5 aventi le fibre disposte parallelamente all'asse del provino e 5 con fibre disposte in direzione ortogonale all'asse, nel rispetto della norma ASTM D3039/1995 e ASTM D3039M/1995 "Prove di trazione su materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica".

Anche in questo caso i provini sono stati ricavati dalle piastre di GFRP e presentano forma e dimensioni uguali a quelli utilizzati per le prove di compressione. Le suddette norme ASTM suggeriscono le dimensioni del provino a seconda che le fibre siano disposte parallelamente (ovvero ortogonalmente) alla direzione dello sforzo di trazione.

Tali dimensioni sono riassunte nella successiva Tabella 23.

Tabella 23 – Dimensioni dei provini a trazione.

Dimensioni dei provini (in mm)	Fibre orientate a 0°	Fibre orientate a 90°
Larghezza della provetta	15	25
Lunghezza della provetta	250	175
Spessore della provetta	10	10
Lunghezza del rinforzo	55	25
Spessore del rinforzo	1,5	1,5
Angolo di raccordo	7°:90°	90°

I risultati delle prove di trazione e di compressione sono esposti in Tabella 24.

Tabella 24 – Caratteristiche meccaniche del laminato composito.

Valori sperimentali	Unità di misura	Valore
Resistenza a trazione, 0°	MPa	193
Resistenza a trazione, 90°	MPa	69
Resistenza a compressione, 0°	MPa	225
Resistenza a compressione, 90°	MPa	87
Modulo di elasticità normale a compr., 0°	MPa	20000
Modulo di elasticità normale a compr., 90°	MPa	9143
Modulo di elasticità normale a traz., 0°	MPa	17200
Modulo di elasticità normale a traz., 90°	MPa	9950

I valori dei moduli elastici del composito riportati in Tabella 24, sono in accordo con i risultati ottenibili mediante l'ausilio della cosiddetta "regole delle miscele" utilizzando i parametri meccanici dei singoli costituenti riportati nelle Tabelle 21 e 22 ed i valori delle percentuali volumetriche delle fibre e della matrice ricavati sperimentalmente.

3.2. Dispositivo di prova

Il dispositivo di prova realizzato nell'ambito del presente lavoro consiste in due coppie di piatti d'acciaio, di forma quadrata, con lato pari a 500 mm e spessore di 50 mm. Al centro dei piatti è presente un foro di 300 mm di diametro (Figg. 3.9a,b). Ciascuna coppia di piatti presenta inoltre quattro fori in prossimità degli angoli ed altri otto fori, di diametro pari a 21mm, ubicati sul bordo esterno in modo che ad ognuno di essi corrisponda uno dei sedici fori presenti sul bordo dei provini di GFRP.

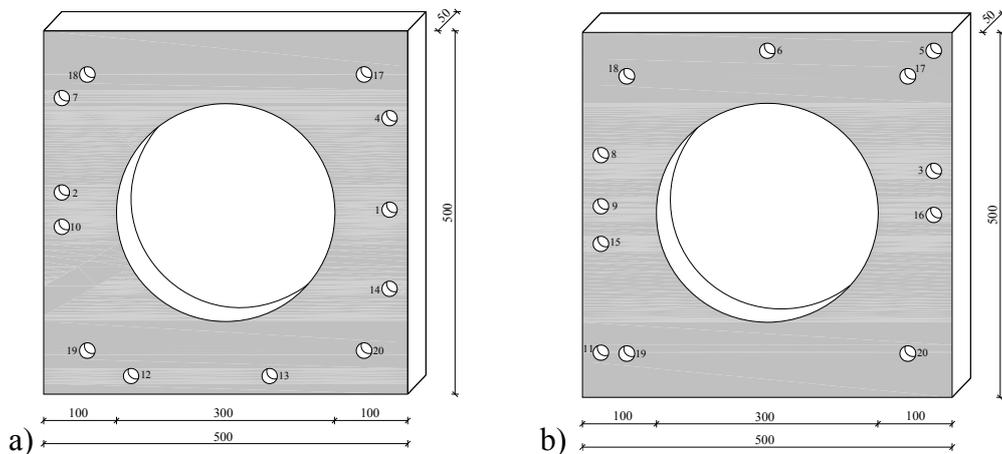


Figure 3.7 – Piatti d'acciaio (dimensioni in mm): a) tipo 1; b) tipo 2.

Per eseguire la prova il generico provino di GFRP viene inserito tra i due piatti d'acciaio (Fig. 3.10a) ed i quattro bulloni d'angolo, che realizzano l'unione del sistema piatto d'acciaio/provino di GFRP/piatto d'acciaio (Fig. 3.10b), vengono opportunamente serrati in modo che la parte centrale

dell'elemento di materiale composito, non a contatto con i piatti, possa realisticamente considerarsi come una piastra circolare incastrata al bordo.

Si precisa che, una volta realizzati i fori nelle piastre in acciaio, si è proceduto ad una verifica della loro posizione utilizzando un calibro di misura con precisione al millimetro. Le suddette misurazioni hanno consentito di individuare gli angoli di inclinazione delle rette r_{oi} (Fig. 3.1) rispetto alla direzione delle fibre, per i sedici fori ed hanno evidenziato un errore del valore dell'angolo nominale pari, al più, a 0.2° .

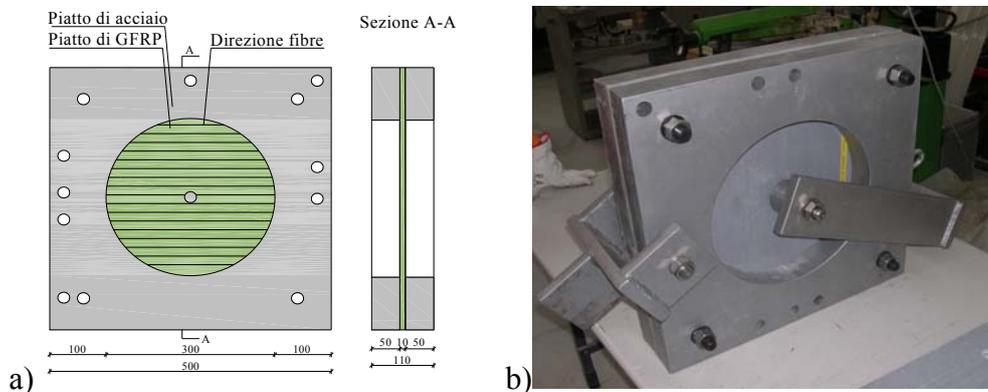


Figure 3.10a,b – Dispositivo di prova: sistema assemblato piatti d'acciaio/provino di GFRP (dimensioni in mm).

Il dispositivo di prova così assemblato viene opportunamente ammorsato alle ganasce di una macchina universale di prova, caratterizzata da un valore del carico massimo pari a 630kN (Fig. 3.11a). In particolare, alla ganascia inferiore è agganciato il bullone inserito al centro del provino di GFRP, mentre a quella superiore è fissato il bullone inserito in uno dei fori presenti sul bordo del dispositivo, in modo da applicare lo sforzo secondo la direzione voluta. La centratura di quest'ultimo, rispetto al piano medio del piatto di GFRP, è garantita dalla presenza di due distanziatori applicati in corrispondenza del bullone superiore (Fig. 3.13). La prova viene quindi effettuata in controllo di spostamento con una velocità 9.9×10^{-3} mm/sec.

3.3. Strumentazione dei provini e sistema di acquisizione dati

Tutti i provini di GFRP sono stati strumentati, nell'intorno del foro centrale, mediante l'applicazione di dodici rosette estensimetriche, disposte su entrambe le facce del provino ad una distanza relativa compresa tra i 5 mm ed i 10mm, così come illustrato in figura 3.12a. Per il provino n°0, caratterizzato da un valore dell'angolo α pari a 0° , è stata anche adottata la disposizione dei trasduttori di deformazione illustrata in figura 3.12b.

Le rosette utilizzate (Fig.3.13) presentano tre griglie estensimetriche inclinate tra loro di un angolo pari a 45° (rosette rettangolari "C2A-06-062LR-120" prodotte dalla "Vishay Micro-Measurements") con resistenza di 120 ± 0.6 Ohm a 24°C .

Il sistema di acquisizione dati è composto da tre centraline "System 5100 Vishay MM", disposte in parallelo, caratterizzate complessivamente dalla presenza di 60 canali estensimetrici (Fig.3.11b). I dati acquisiti durante le prove sono stati elaborati per via automatica mediante il software di gestione della centralina estensimetrica "StrainSmart".

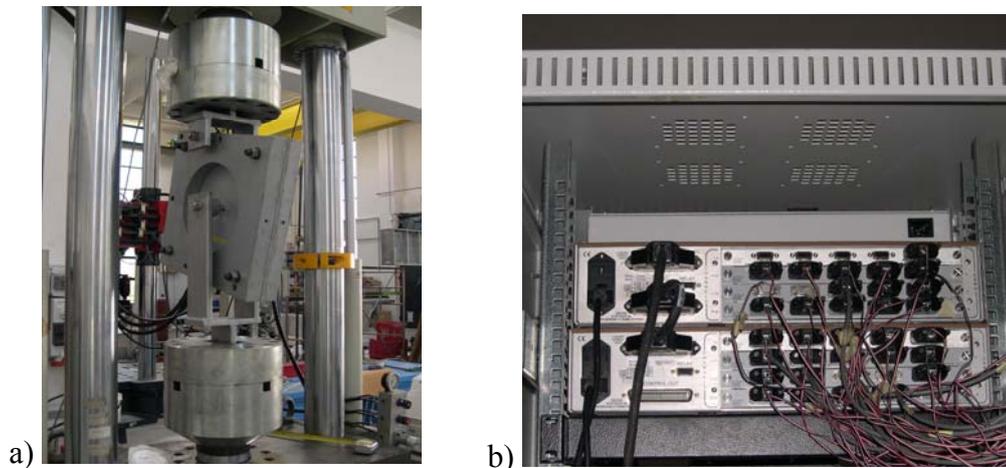


Figure 3.11 – a) Foto del dispositivo di prova inserito tra le ganasce della macchina di prova universale; b) Foto delle centraline estensimetriche.

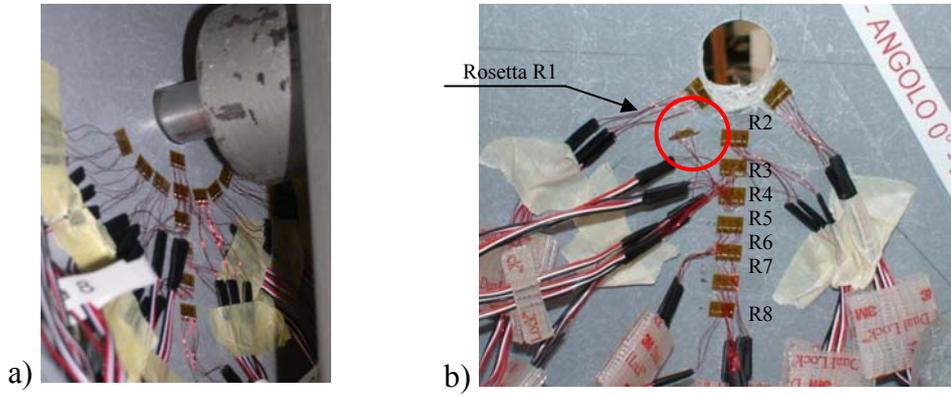


Figura 3.12 –a) Strumentazione generico provino di GFRP; b) Strumentazione provino GFRP n°0: immagine ripresa dopo la rottura del provino cui è seguito il distacco della rosetta R1.

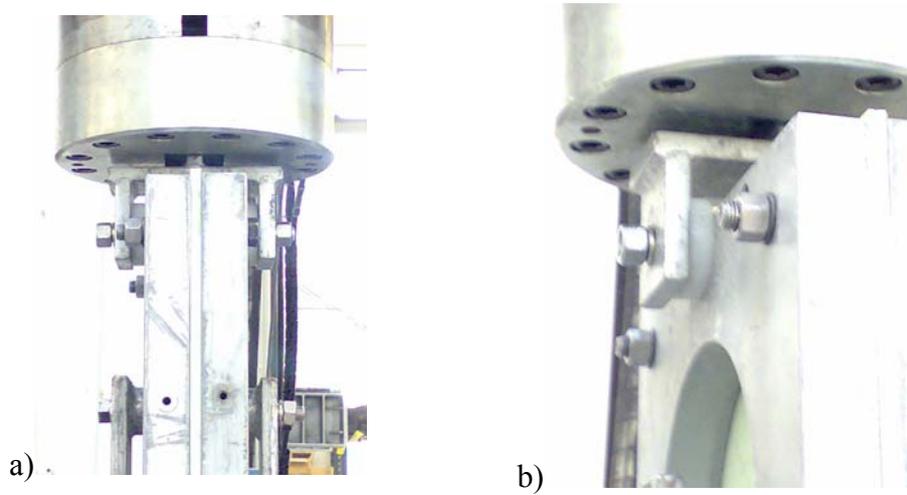


Figure 3.13 – Centatura del carico: a) vista d'insieme; b) particolare del distanziatore.

4. Analisi numerica agli elementi finiti

Per il progetto della prova, in particolare, per studiare la disposizione ottimale dei trasduttori di deformazione intorno al foro centrale del provino, in funzione dei diversi valori dell'angolo α , è stata svolta una analisi numerica agli elementi finiti con il programma STRAUS7 della *G+D Computing*, i cui risultati sono presentati nel presente paragrafo.

La zona centrale del provino di GFRP (di forma circolare con diametro pari a 300mm) è stata modellata mediante elementi bidimensionali ad otto nodi del tipo “*composite laminate*”, costituiti da un solo strato di materiale ortotropo (“*ply*”) di spessore 10mm. Esso è stato caratterizzato con valori nominali dei moduli elastici delle Tabelle 21-22, sia nella direzione delle fibre (0°) che in quella parallela (90°).

Le figure 4.1 e 4.2 mostrano, rispettivamente, la *mesh* utilizzata per l'analisi del provino ed un suo dettaglio in prossimità del foro centrale. In quest'ultima figura è possibile osservare la presenza di elementi finiti monodimensionali del tipo “*point-contact element*” che sono stati utilizzati per simulare il contatto tra il bullone ed il piatto di GFRP.

I risultati dell'analisi svolta sono presentati nelle figure 4.3-4.18.

Per tutti e sedici i valori considerati dell'angolo α , sono raffigurate le mappe delle tensioni agenti in prossimità del foro centrale, lungo la direzione delle fibre (σ_{11}) e lungo quella ortogonale (σ_{22}). Le figure 4.19 e 4.20 mostrano l'andamento delle suddette componenti di tensione, per un valore della forza applicata nel piano del laminato di valore pari ad 4582 N, schematizzata con forze elementari applicate nei nodi del diametro verticale (vedere Fig.4.2) del bullone. Le stesse figure 4.19 e 4.20 mostrano con chiarezza la cospicua influenza del parametro α , contrariamente a quanto accade per il caso di materiale isotropo.

Dai modelli di simulazione dello stato tensionale, così come è mostrato nelle figure 4.3-4.18, risulta anche con chiarezza che le tensioni indotte dal bullone sulla piastra si smorzano rapidamente all'allontanarsi dal foro (distanza di estinzione dell'ordine di 5 volte il diametro).

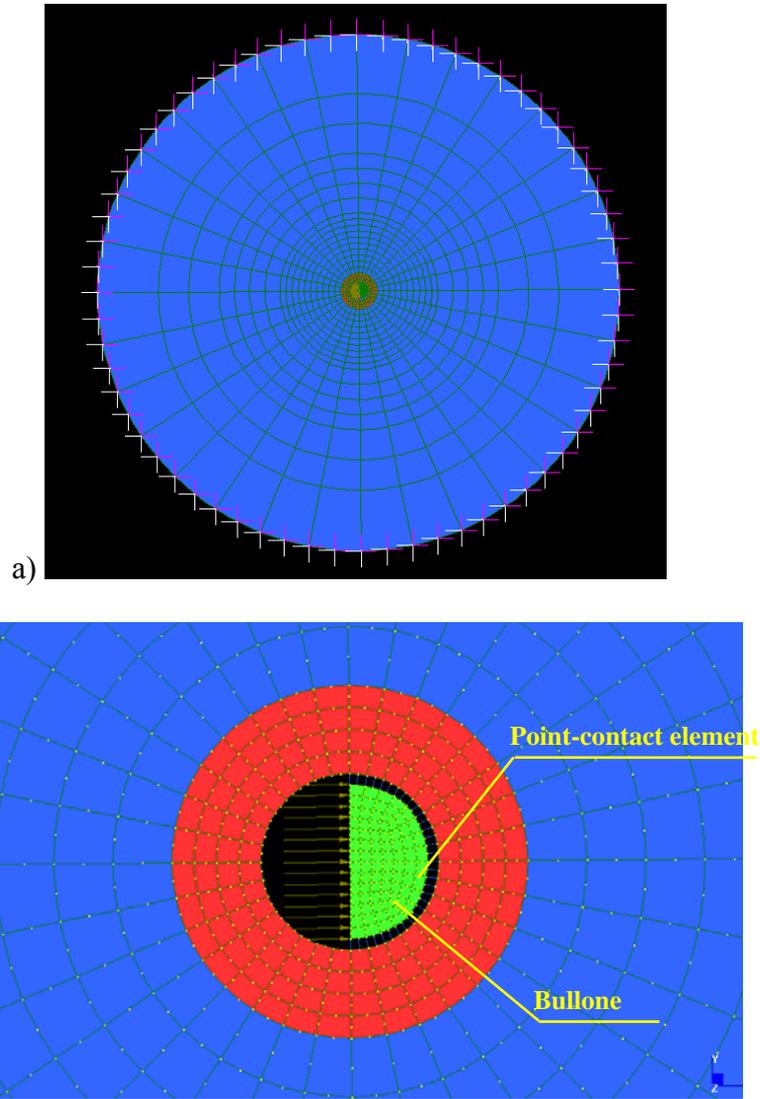


Figura 4.2 – Mesh agli elementi finiti: a) zona circolare di GFRP; b) Particolare in prossimità del foro.

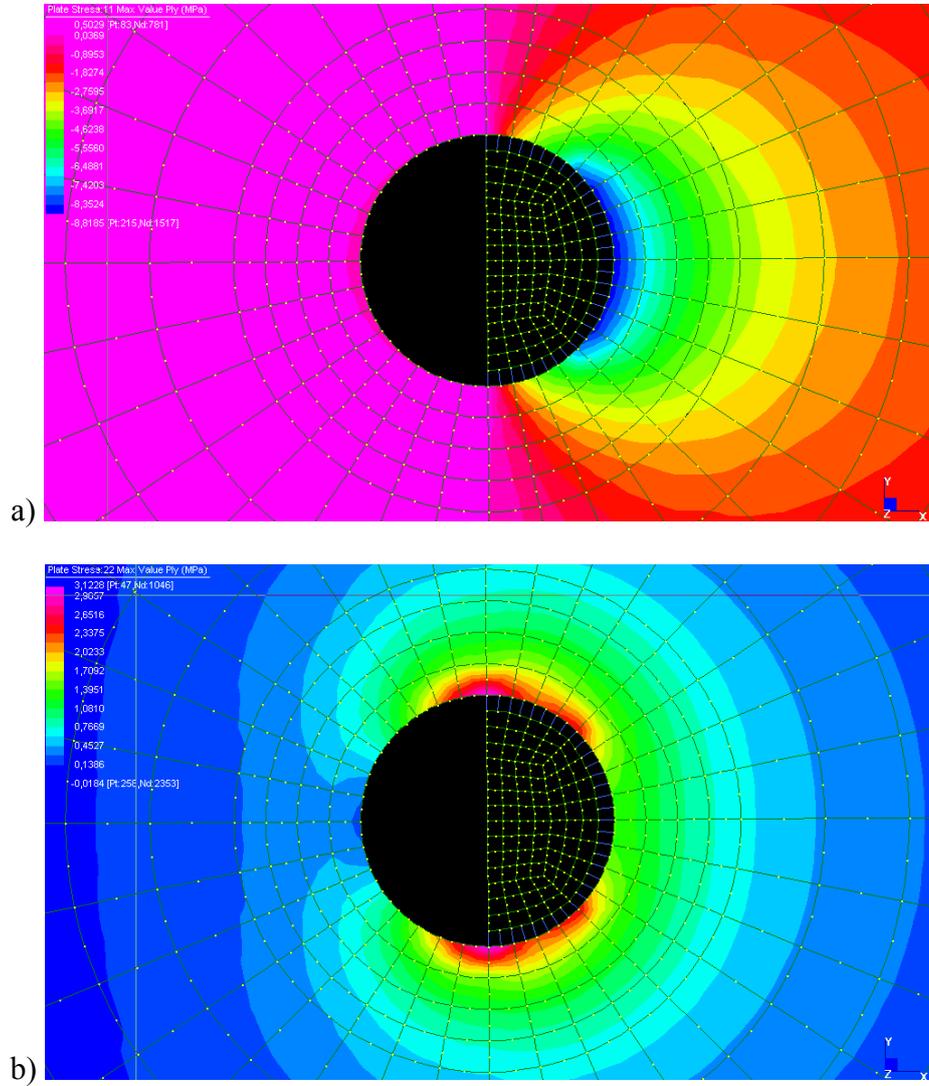


Figura 4.3 - Mappa delle tensioni: a) $\sigma_{11} - \alpha = 0^\circ$; b) $\sigma_{22} - \alpha = 0^\circ$.

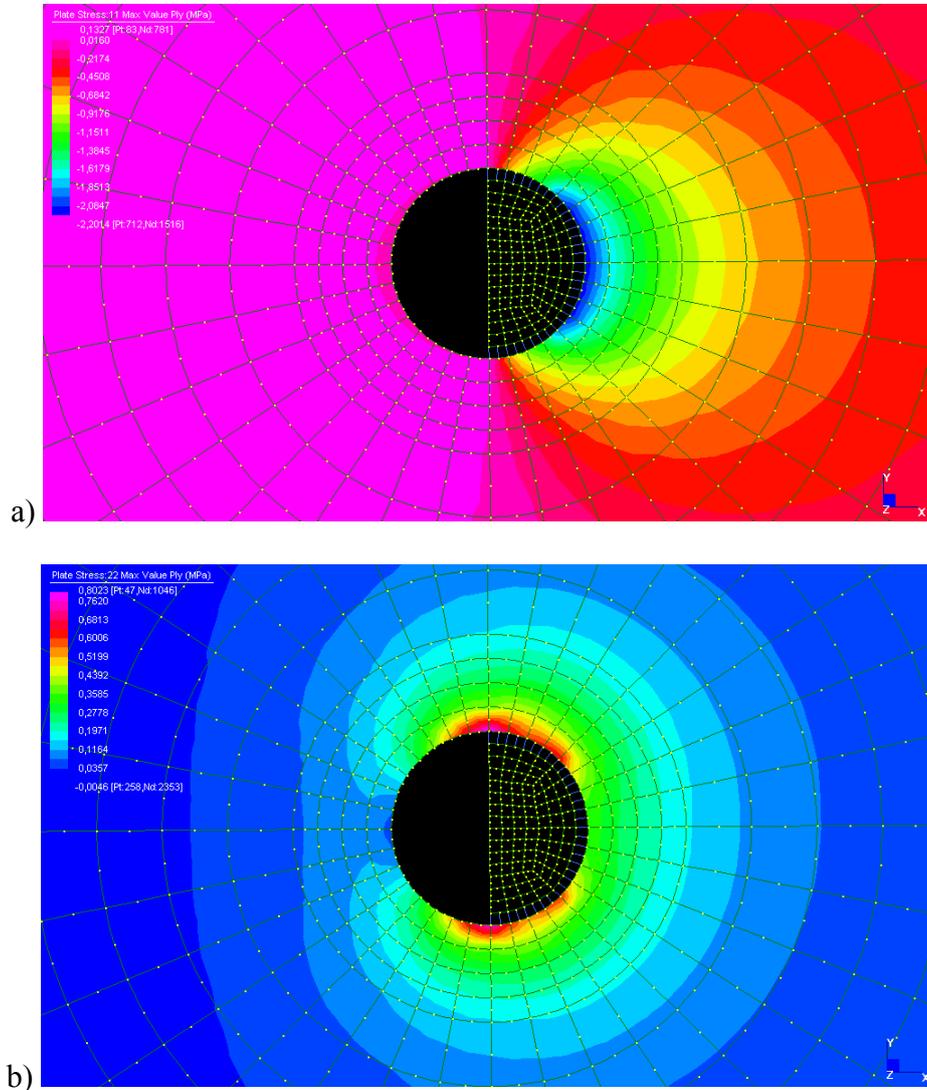


Figura 4.4 - Mappa delle tensioni: a) $\sigma_{11} - \alpha = 1^\circ$; b) $\sigma_{22} - \alpha = 1^\circ$.

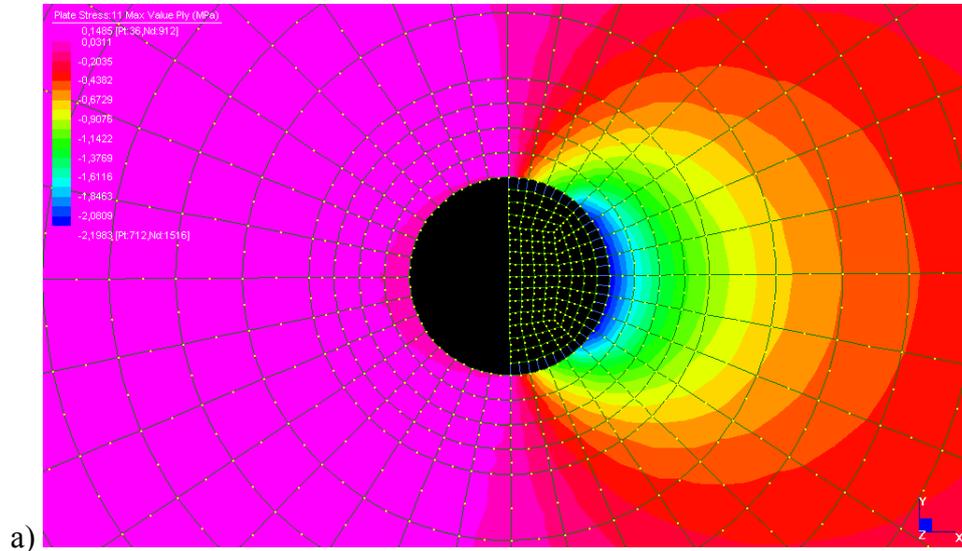


Fig. 4.5a - Mappa tensionale riferita alle $\sigma_{11} - \alpha = 3^\circ$.

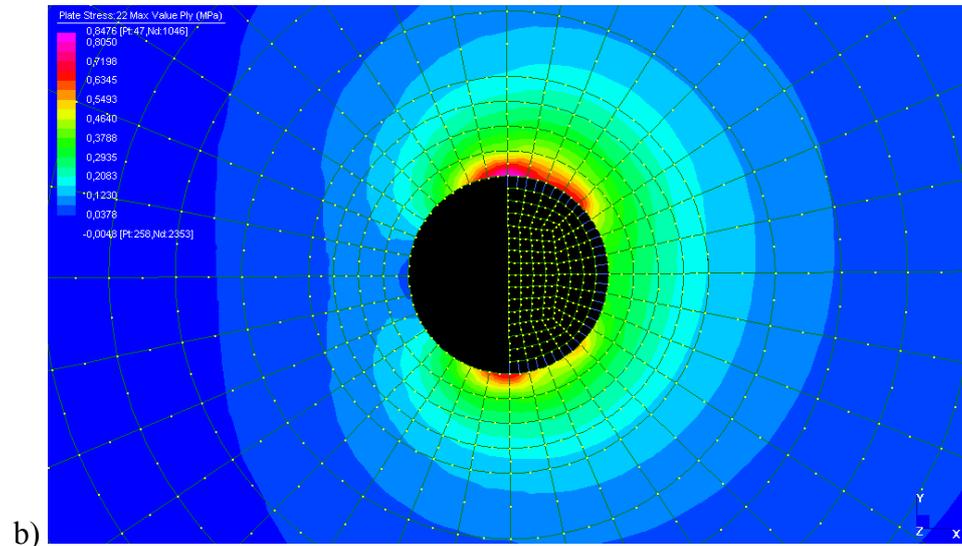


Figura 4.5 - Mappa delle tensioni: a) $\sigma_{11} - \alpha = 3^\circ$; b) $\sigma_{22} - \alpha = 3^\circ$.

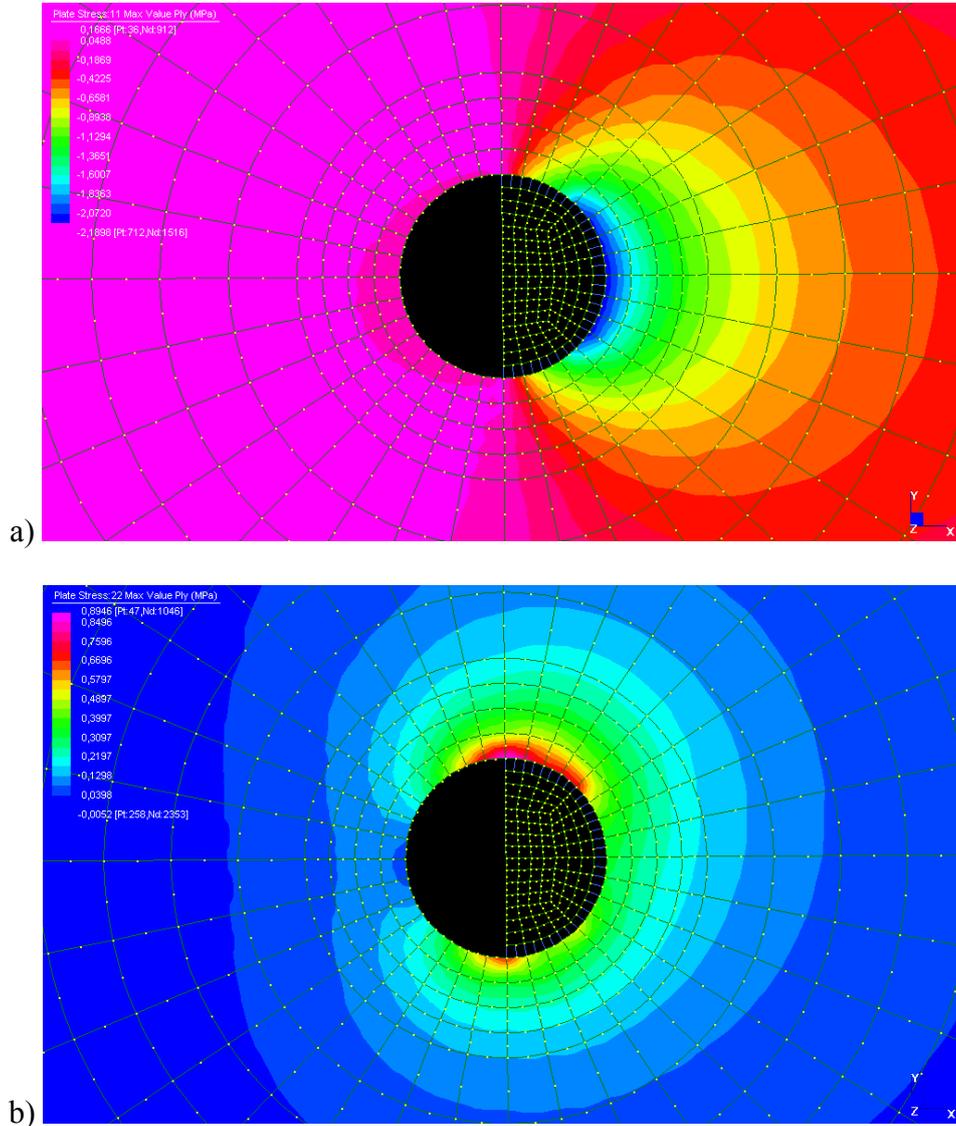


Figura 4.6 - Mappa delle tensioni: a) $\sigma_{11} - \alpha = 5^\circ$; b) $\sigma_{22} - \alpha = 5^\circ$.

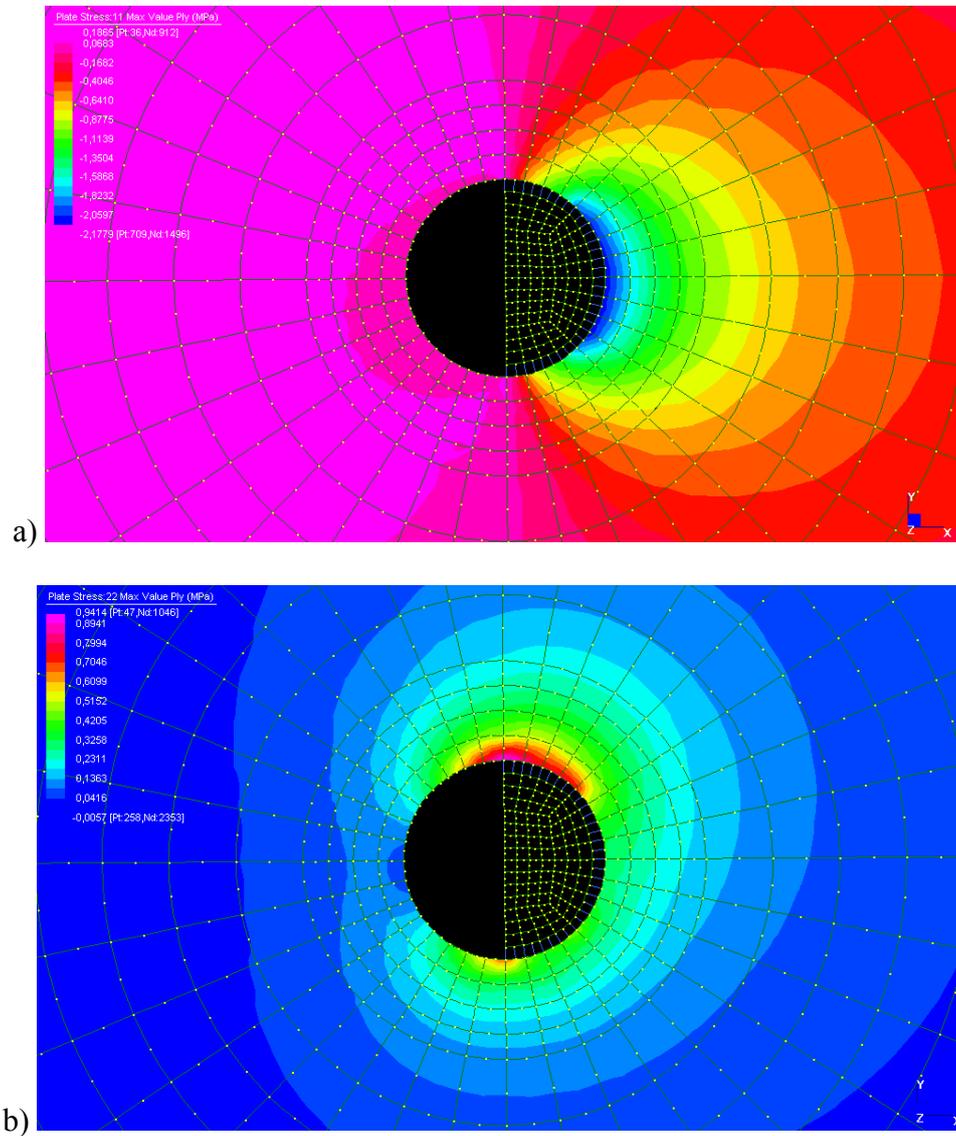


Figura 4.7 - Mappa delle tensioni: a) $\sigma_{11} - \alpha = 7^\circ$; b) $\sigma_{22} - \alpha = 7^\circ$.

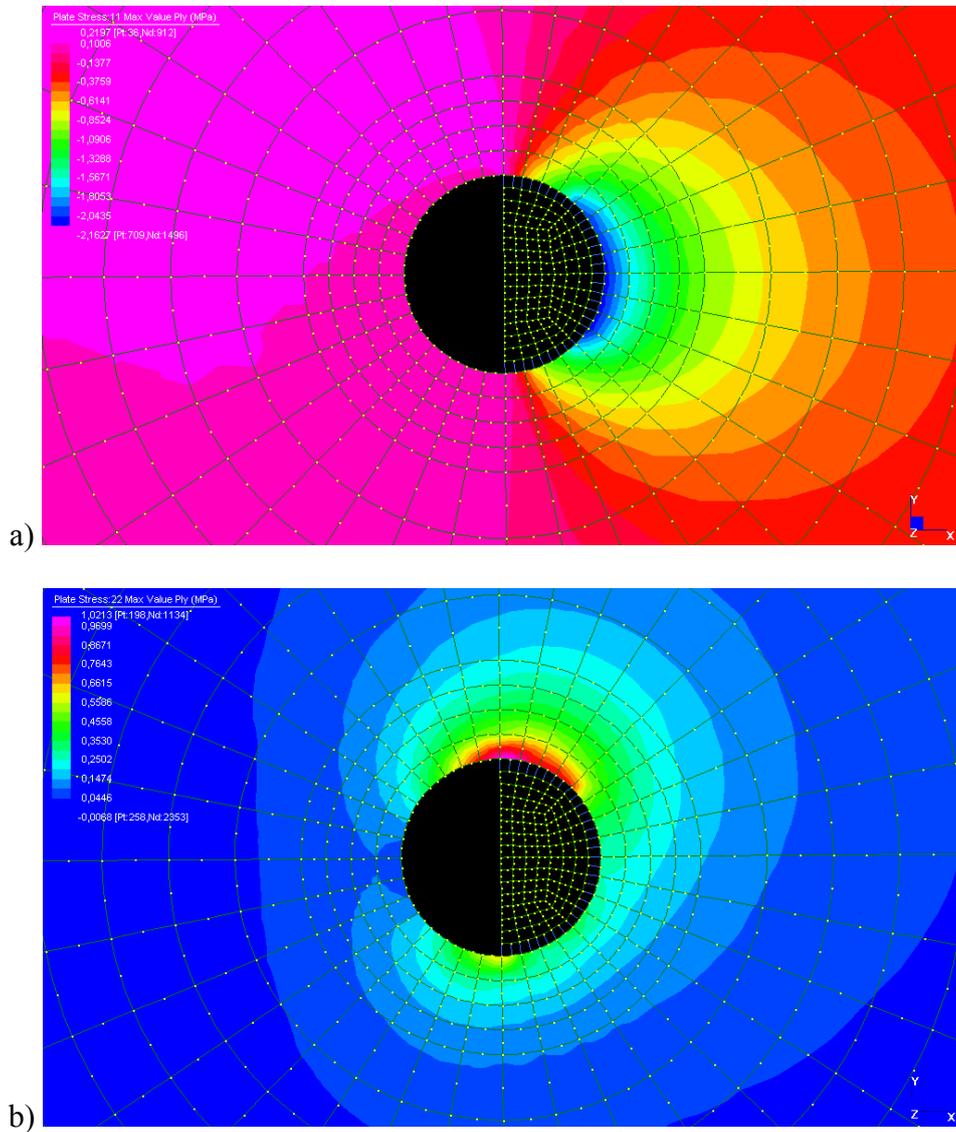


Figura 4.8 - Mappa delle tensioni: a) $\sigma_{11} - \alpha = 10^\circ$; b) $\sigma_{22} - \alpha = 10^\circ$.

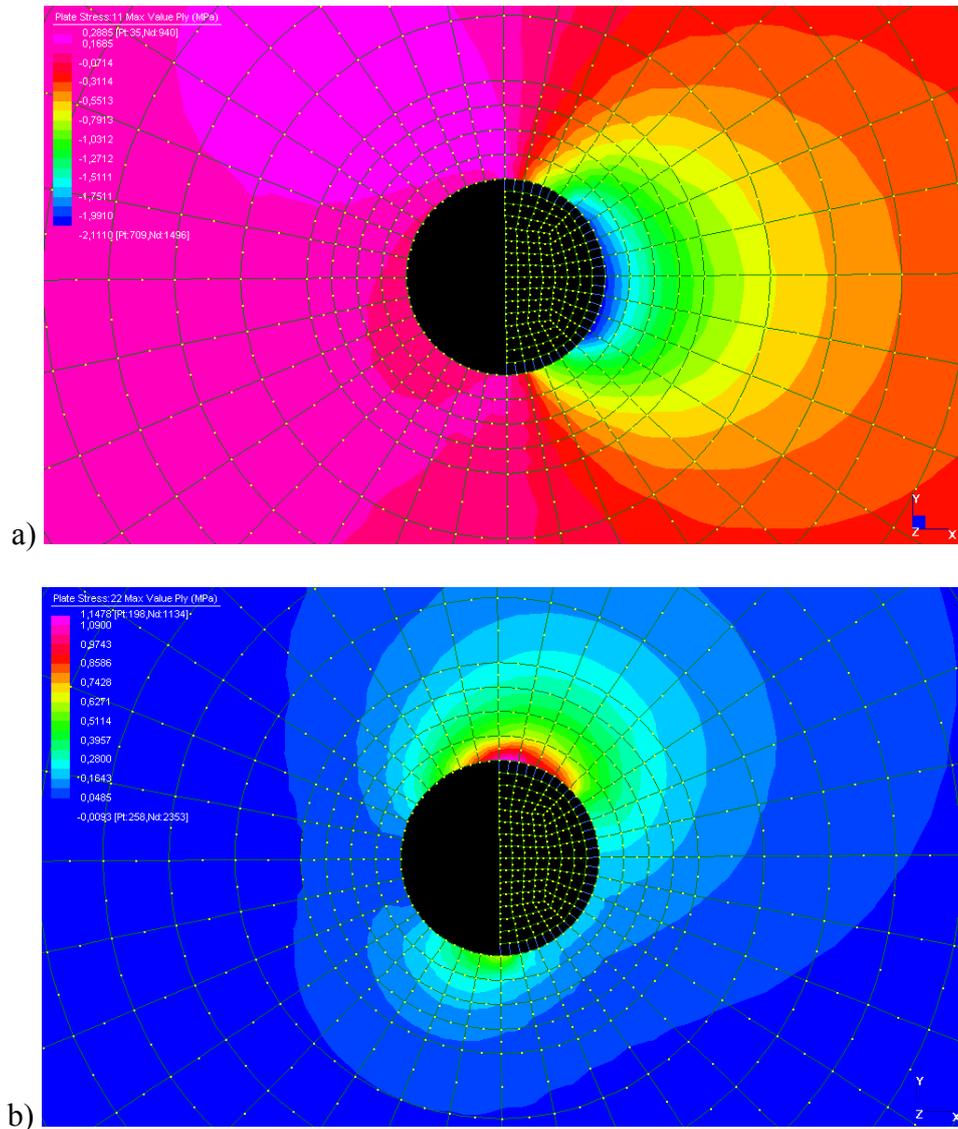


Figura 4.9 - Mappa delle tensioni: a) $\sigma_{11} - \alpha = 15^\circ$; b) $\sigma_{22} - \alpha = 15^\circ$.

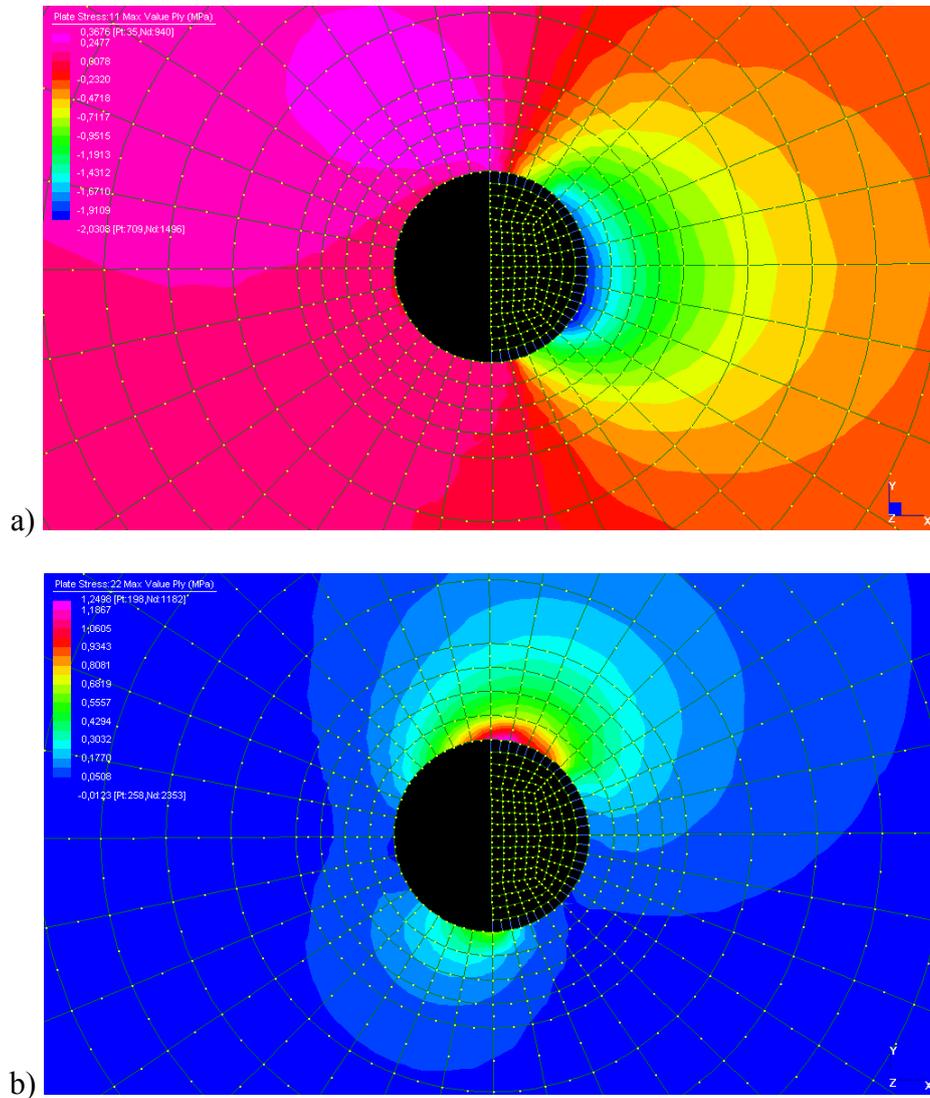


Figura 4.10 - Mappa delle tensioni: a) $\sigma_{11} - \alpha = 20^\circ$; b) $\sigma_{22} - \alpha = 20^\circ$.

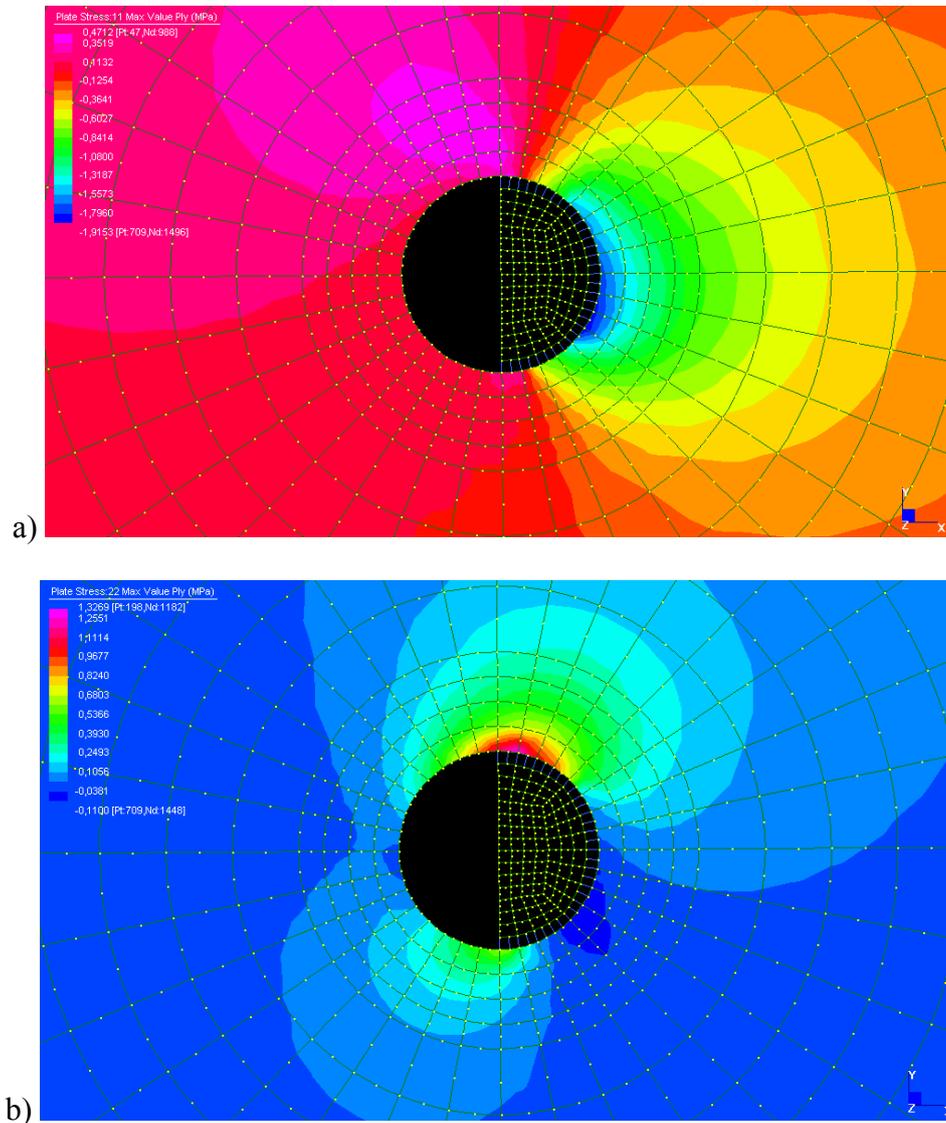


Figura 4.11 - Mappa delle tensioni: a) $\sigma_{11} - \alpha = 25^\circ$; b) $\sigma_{22} - \alpha = 25^\circ$.

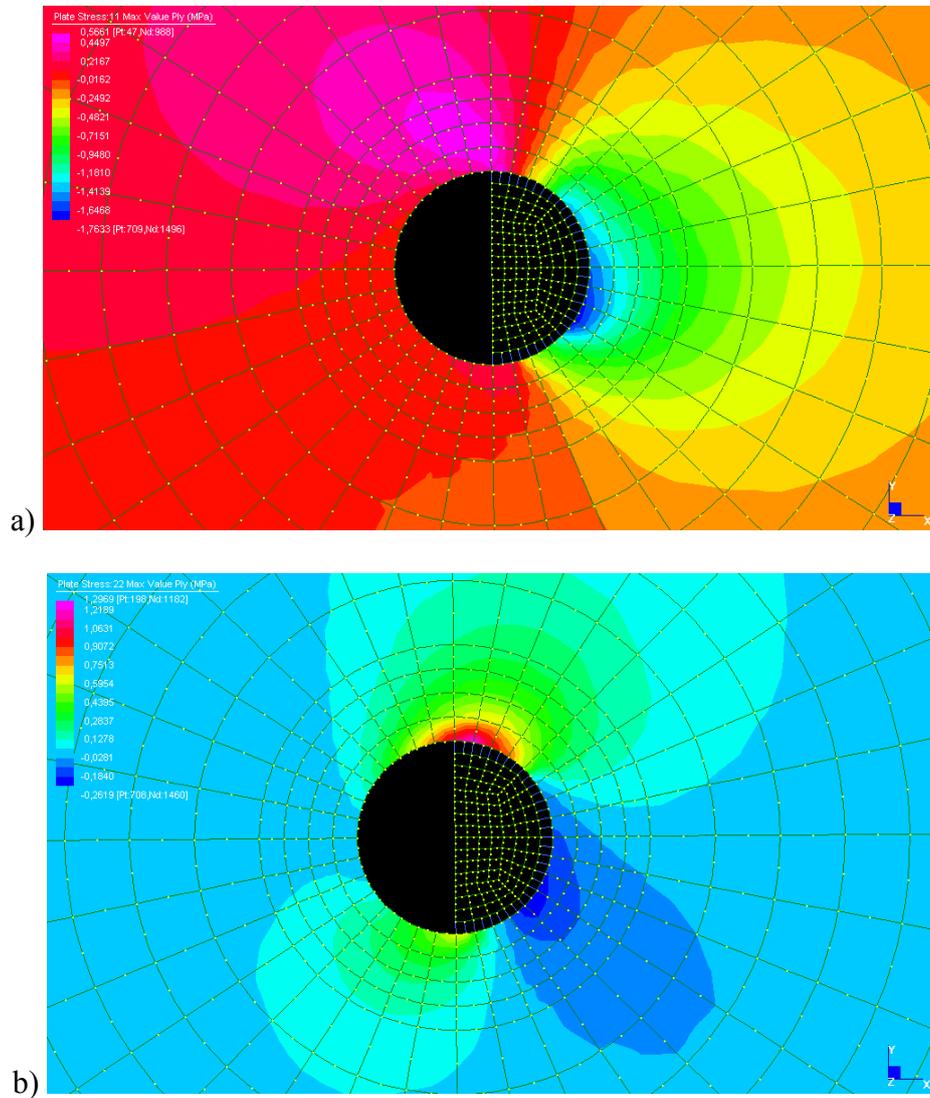


Figura 4.12 - Mappa delle tensioni: a) $\sigma_{11} - \alpha = 30^\circ$; b) $\sigma_{22} - \alpha = 30^\circ$.

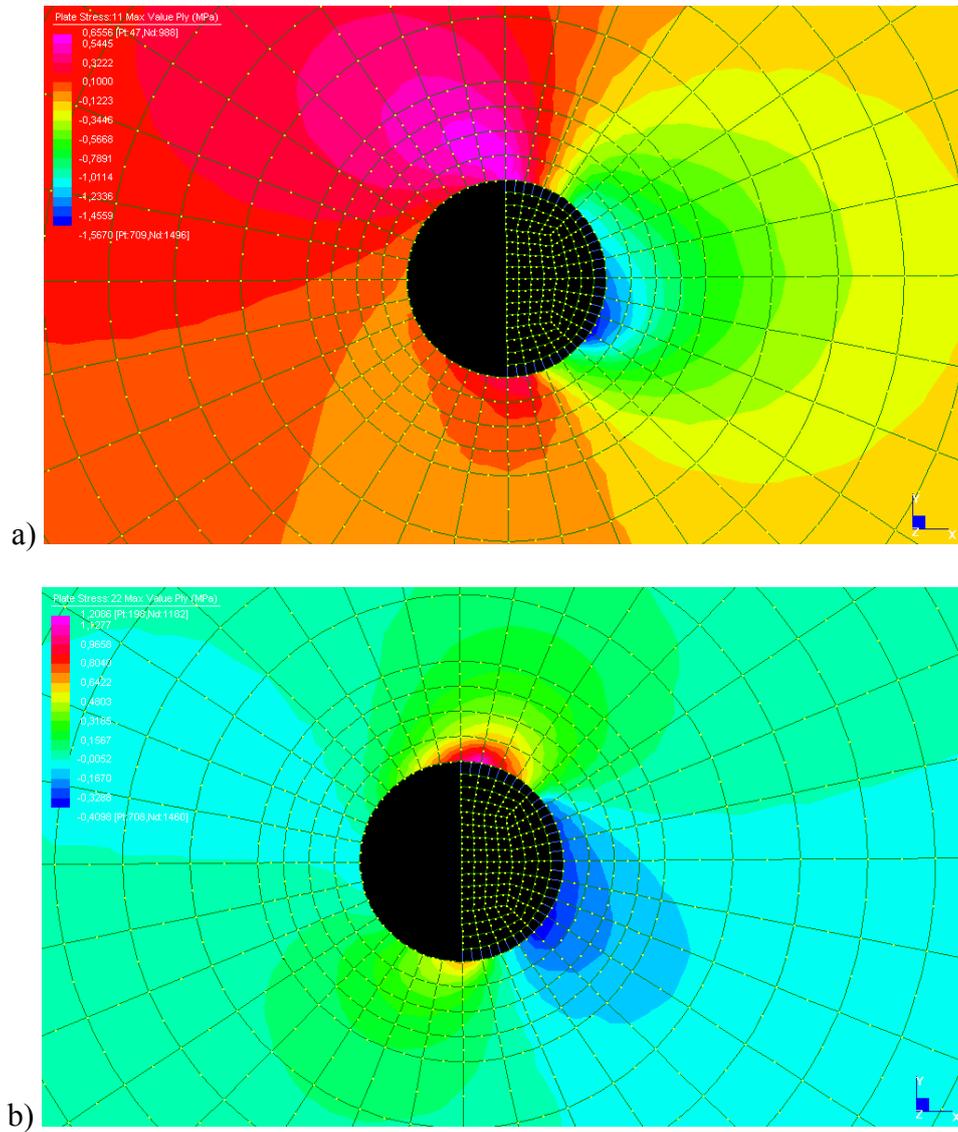


Figura 4.13 - Mappa delle tensioni: a) $\sigma_{11} - \alpha = 35^\circ$; b) $\sigma_{22} - \alpha = 35^\circ$.

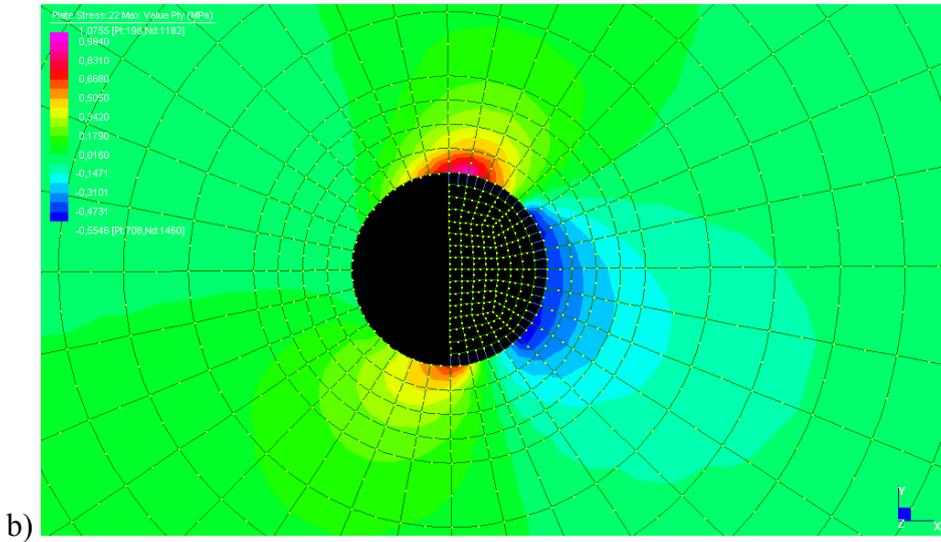
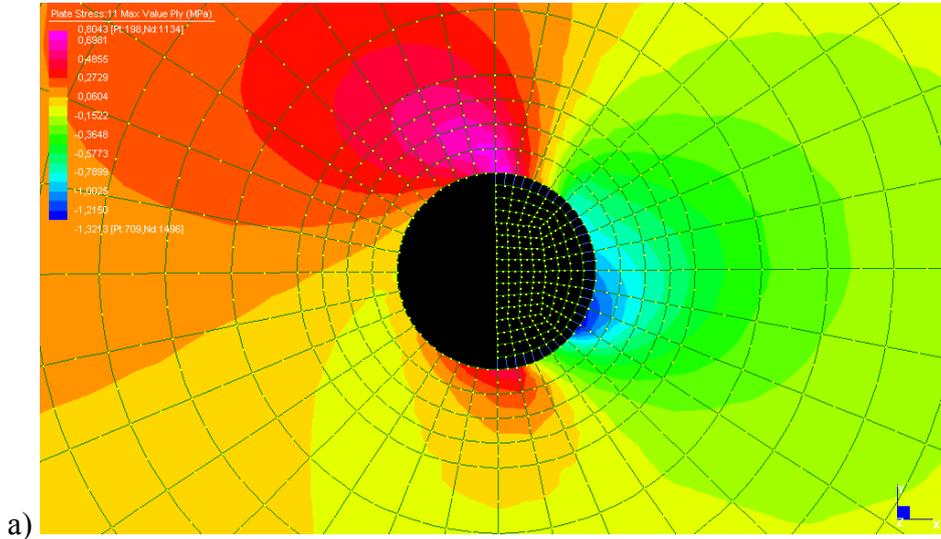


Figura 4.14 - Mappa delle tensioni: a) $\sigma_{11} - \alpha = 40^\circ$; b) $\sigma_{22} - \alpha = 40^\circ$.

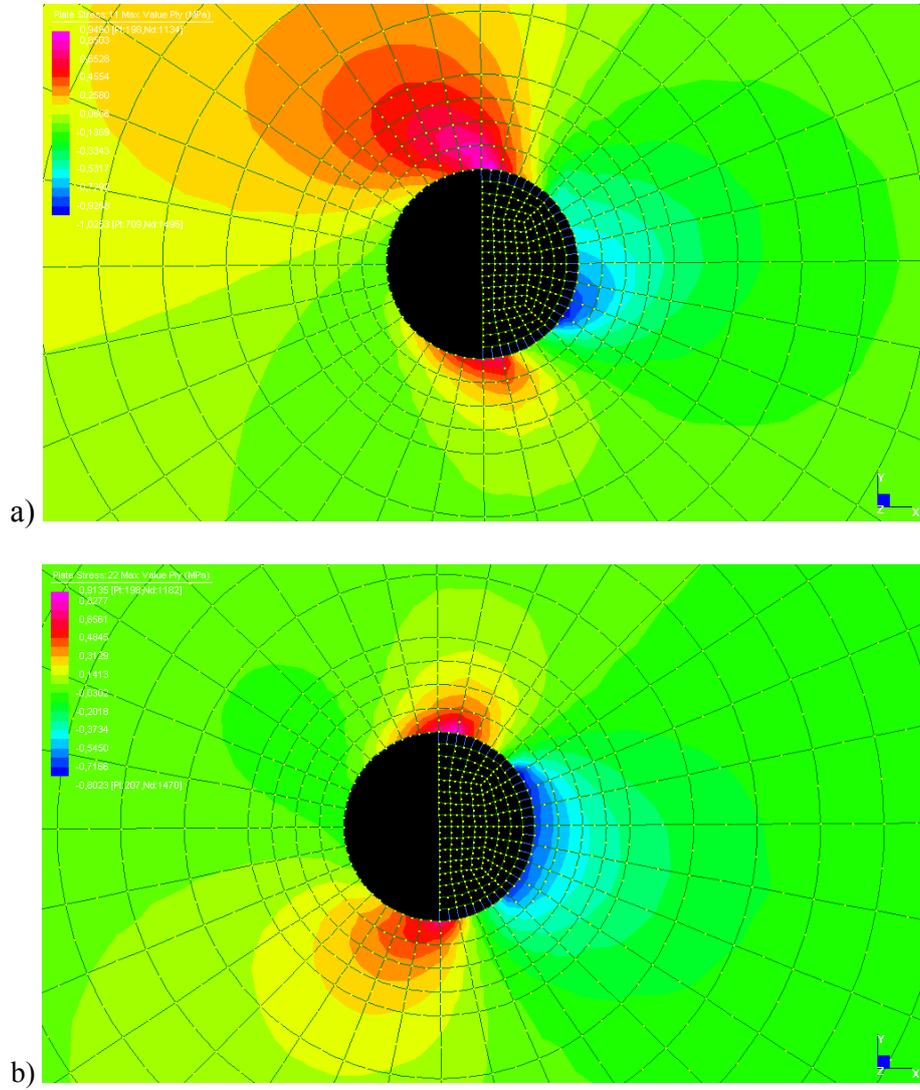


Figura 4.15 - Mappa delle tensioni: a) $\sigma_{11} - \alpha = 45^\circ$; b) $\sigma_{22} - \alpha = 45^\circ$.

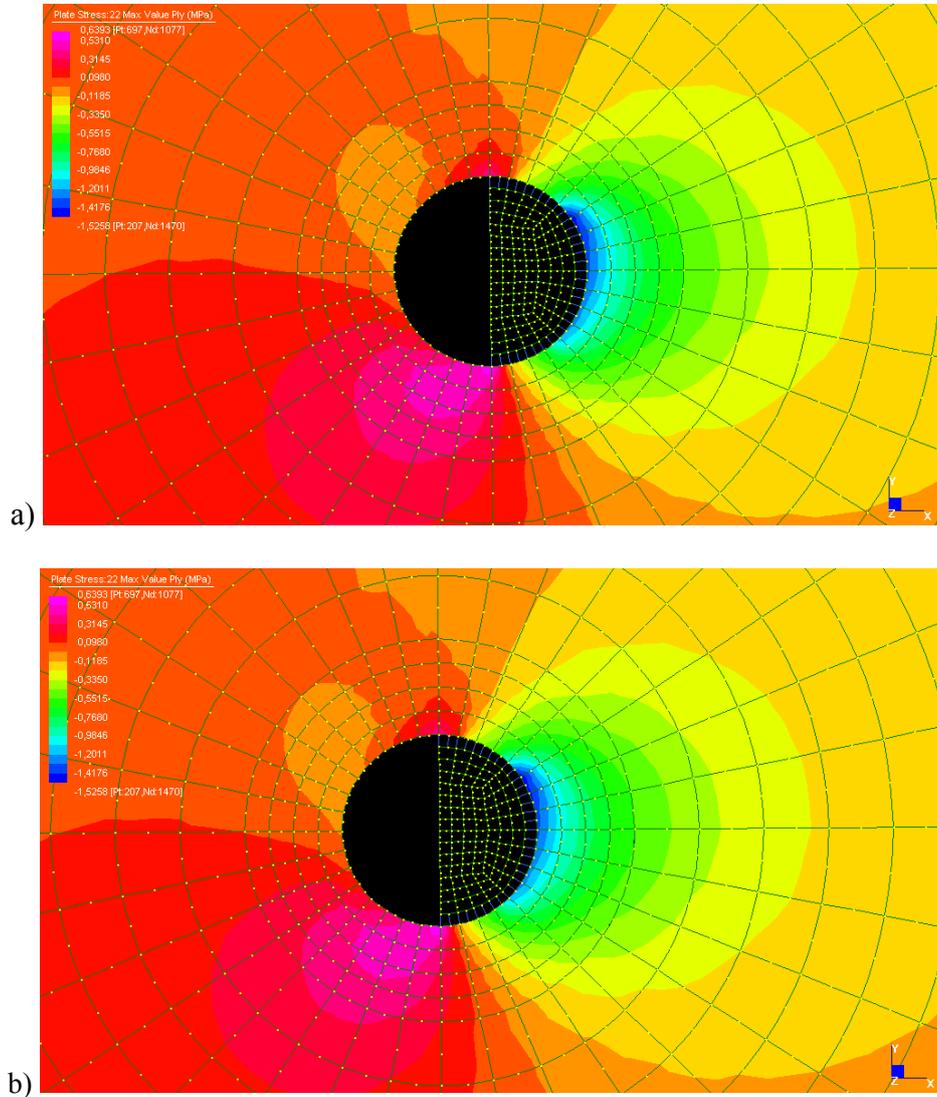


Figura 4.16 - Mappa delle tensioni: a) $\sigma_{11} - \alpha = 60^\circ$; b) $\sigma_{22} - \alpha = 60^\circ$.

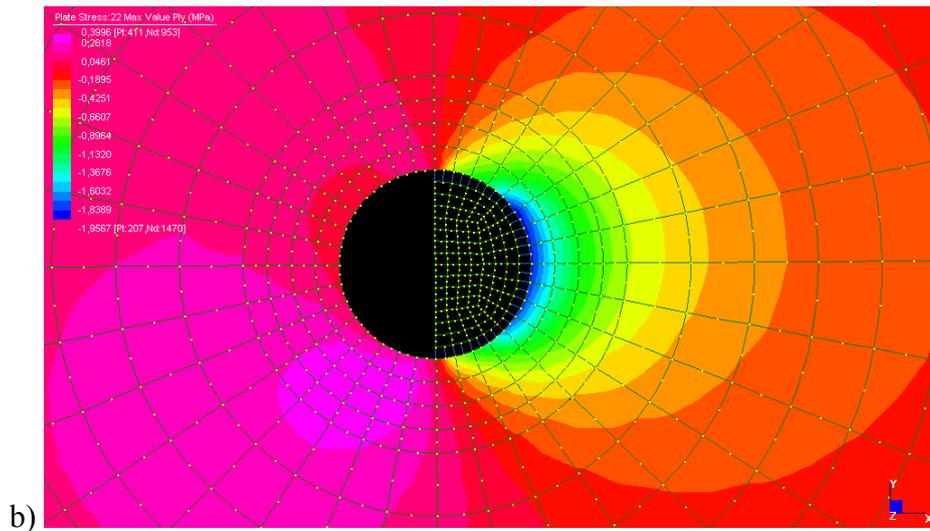
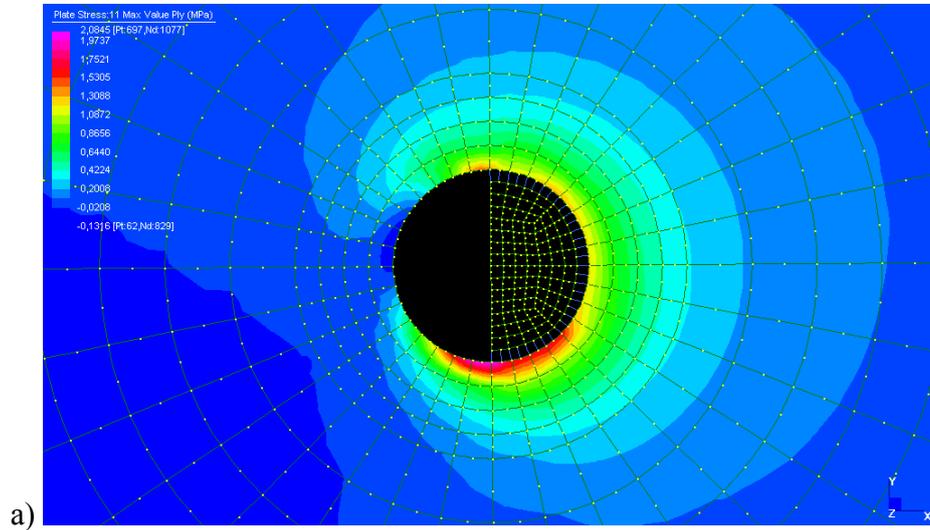


Figura 4.17 - Mappa delle tensioni: a) $\sigma_{11} - \alpha = 75^\circ$; b) $\sigma_{22} - \alpha = 75^\circ$.

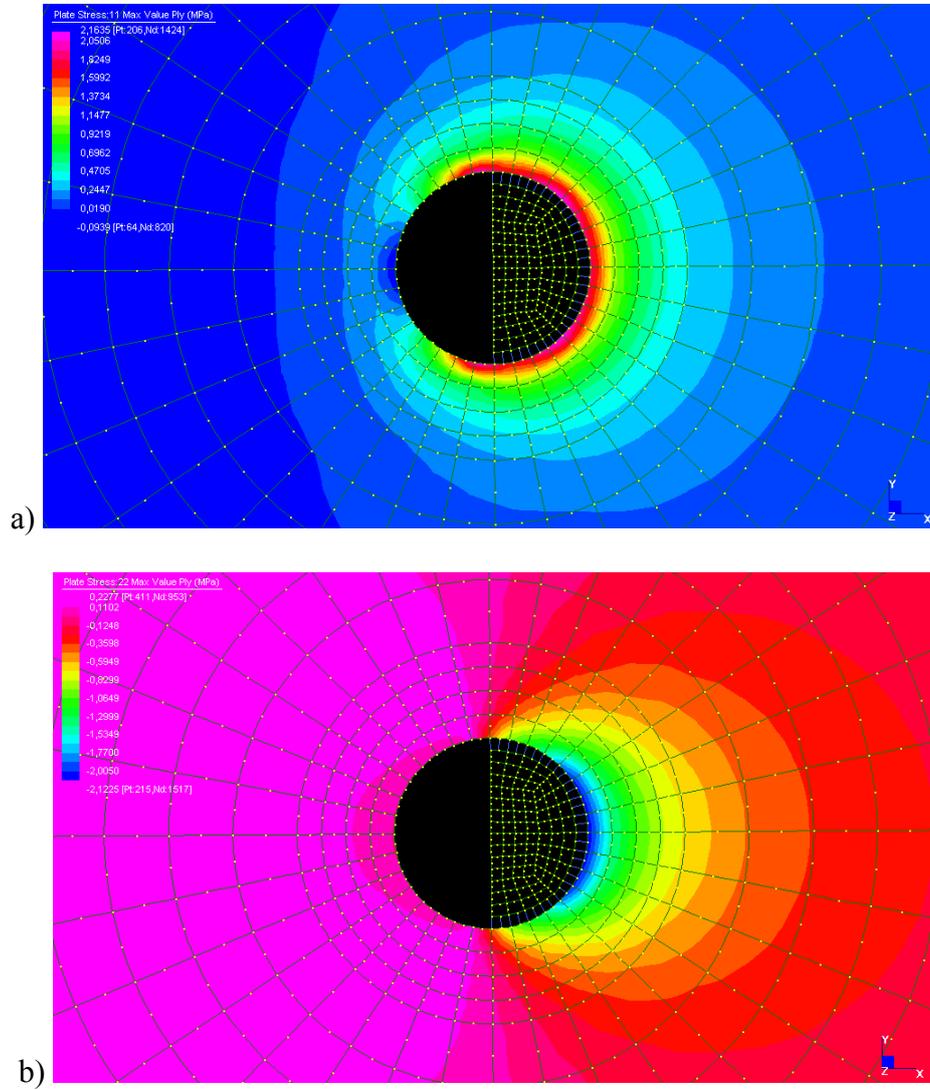


Figura 4.18 - Mappa delle tensioni: a) $\sigma_{11} - \alpha = 90^\circ$; b) $\sigma_{22} - \alpha = 90^\circ$.

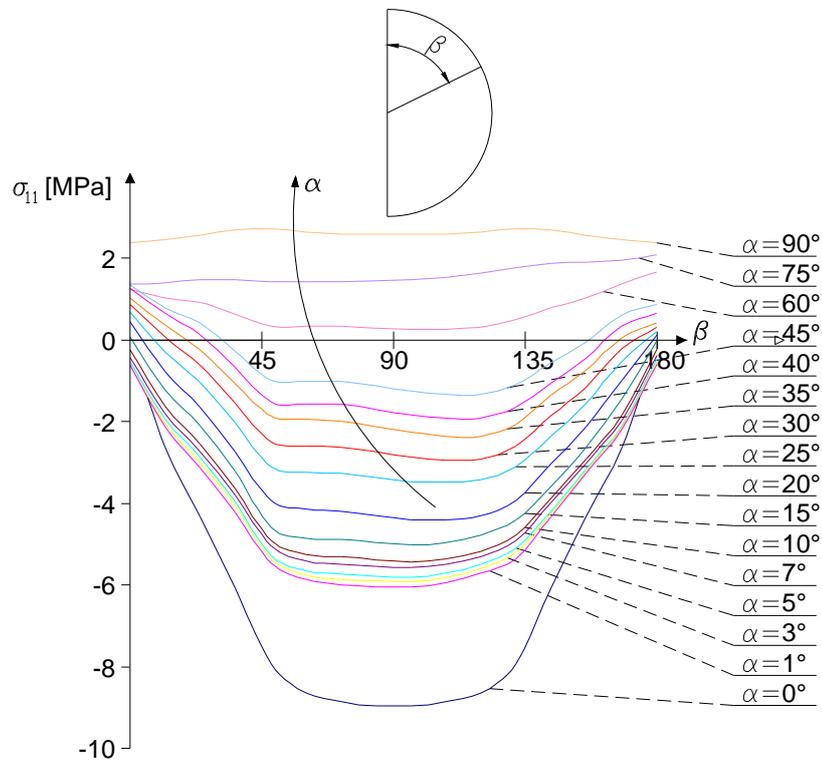


Figura 4.19 - Distribuzione delle tensione σ_{11} lungo la superficie di contatto ($0^\circ < \beta < 180^\circ$) al variare dell'angolo α .

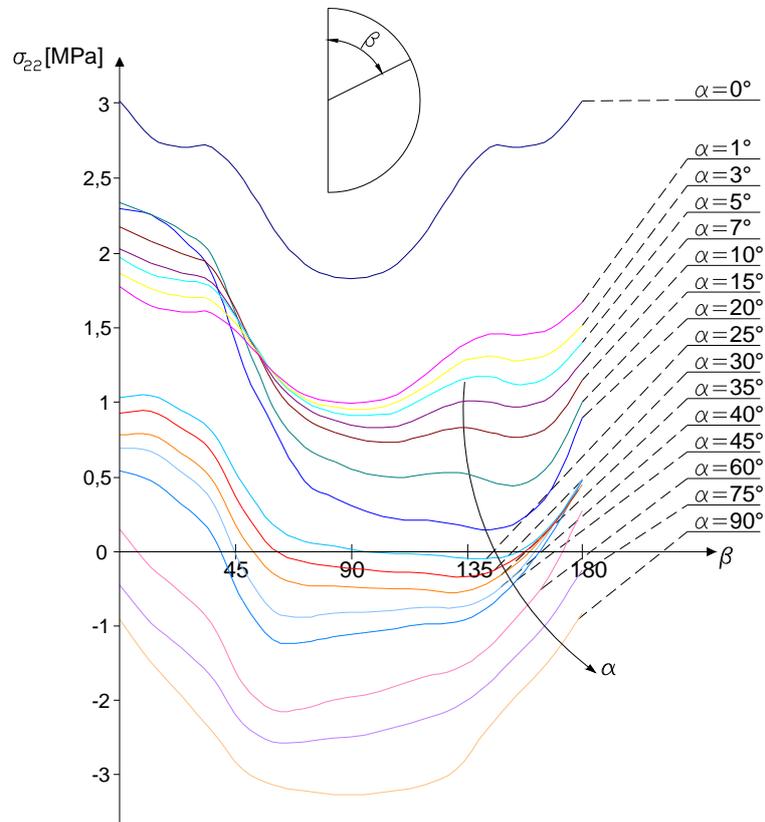


Figura 4.20 - Distribuzione delle tensione σ_{22} lungo la superficie di contatto ($0^\circ < \beta < 180^\circ$) al variare dell'angolo α .

5. Risultati dell'indagine sperimentale

In questo paragrafo si presentano i risultati dell'indagine sperimentale svolta, fornendo i valori del carico di rottura, $F_u^{(\alpha)}$ di tutti i provini monostrato delle tre serie, sottoposti a prova, nonché la distribuzione delle deformazioni intorno al foro centrale del provino n°0, le cui fibre formano un angolo $\alpha = 0^\circ$ con la direzione dello sforzo sollecitante. Si rileva, come già osservato al §3, che la differenza tra i valori nominale e reale dell'angolo α è pari, al più, in termini assoluti a 0.2° . Nel prosieguo, per brevità, si ometterà tale precisazione.

In figura 5.1 è mostrato l'andamento del rapporto $F_u^{(\alpha)} / F_u^{(0)}$ al variare dell'angolo α , essendo $F_u^{(0)}$ il carico di rottura del provino le cui fibre sono parallele alla direzione dello sforzo applicato ($\alpha=0$). Si precisa che i valori riportati sono quelli medi.

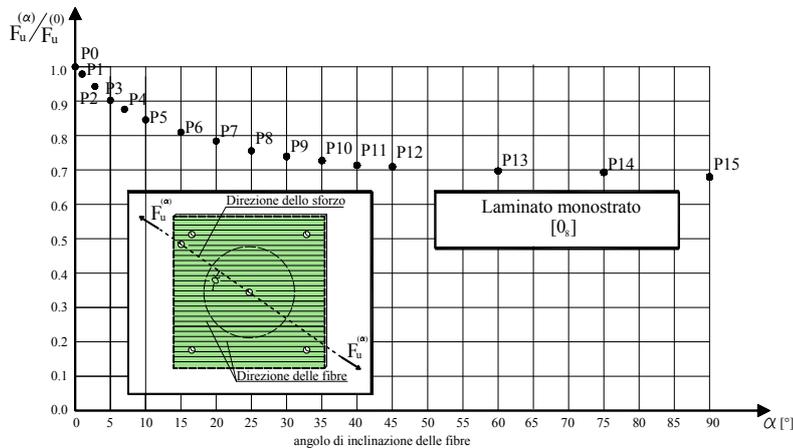


Figura 5.1 – Curva del rapporto $F_u^{(\alpha)} / F_u^{(0)}$ in funzione dell'angolo α .

Com'è possibile osservare, la resistenza a rifollamento decresce sensibilmente nell'intervallo di valori dell'angolo α compresi tra 0° e 10° . In particolare, il rapporto $F_u^{(\alpha)} / F_u^{(0)}$ assume il valore 0.845 nel caso del provino P5 ($\alpha=10^\circ$), corri-

spondente ad una riduzione del carico di rottura per rifollamento pari a circa il 15% rispetto al valore massimo registrato (provino P0 - $\alpha = 0^\circ$).

Per valori superiori dell'angolo α , ($10^\circ < \alpha < 90^\circ$) si osserva una ulteriore riduzione della resistenza a rifollamento dei provini di GFRP, sebbene la curva $F_u^{(\alpha)} / F_u^{(0)}$ sia caratterizzata da una pendenza meno accentuata rispetto a quella relativa al primo tratto ($0^\circ < \alpha < 10^\circ$). Come prevedibile, la resistenza a rifollamento attinge il valore minimo in corrispondenza del provino P15, le cui fibre sono disposte a 90° rispetto alla direzione dello sforzo sollecitante, con un abbattimento del valore del carico di rottura pari a circa il 32% rispetto a quello del provino P0 ($\alpha = 0^\circ$).

In Tabella 25 sono riportati i valori medi del carico di rottura per rifollamento, $F_u^{(\alpha)}$, delle tre serie previste, mentre in Tabella 26, per completezza, sono riportati i valori del suddetto carico per tutti i provini testati e la relativa varianza.

Tabella 25 – Valori medi del carico ultimo.

Sigla	Ang. α	$F_{u,medio}^{(\alpha)}$	$F_u^{(\alpha)} / F_u^{(0)}$	Differenza percentuale rispetto al carico ultimo del provino n°0
	[°]	[kN]		[%]
Provino n°0 (P0)	0±0.2	33.28	1.000	-
Provino n°1 (P1)	1±0.2	32.58	0.979	2.10
Provino n°2 (P2)	3±0.2	31.38	0.943	5.70
Provino n°3 (P3)	5±0.2	30.03	0.902	9.76
Provino n°4 (P4)	7±0.2	29.17	0.877	12.34
Provino n°5 (P5)	10±0.2	28.15	0.846	15.41
Provino n°6 (P6)	15±0.2	27.01	0.812	18.84
Provino n°7 (P7)	20±0.2	26.22	0.788	21.21
Provino n°8 (P8)	25±0.2	25.64	0.770	22.95
Provino n°9 (P9)	30±0.2	25.15	0.756	24.42
Provino n°10 (P10)	35±0.2	25.15	0.746	25.33
Provino n°11 (P11)	40±0.2	24.84	0.740	25.96
Provino n°12 (P12)	45±0.2	24.44	0.734	26.56
Provino n°13 (P13)	60±0.2	23.60	0.709	29.00
Provino n°14 (P14)	75±0.2	23.06	0.692	30.70
Provino n°15 (P15)	90±0.2	22.62	0.679	32.00

Tabella 26 – Valori del carico ultimo.

Sigla	Ang. α	$F_u^{(\alpha)}$ 1 ^a serie	$F_u^{(\alpha)}$ 2 ^a serie	$F_u^{(\alpha)}$ 3 ^a serie	Varianza
	[°]	[kN]	[kN]	[kN]	
Provino n°0 (P0)	0±0.2	33.22	32.92	33.52	0.0468
Provino n°1 (P1)	1±0.2	32.60	32.44	32.94	0.0172
Provino n°2 (P2)	3±0.2	32.76	30.24	31.74	0.0972
Provino n°3 (P3)	5±0.2	31.13	30.07	30.12	0.0133
Provino n°4 (P4)	7±0.2	29.90	29.90	27.71	0.0433
Provino n°5 (P5)	10±0.2	28.22	29.13	25.90	0.0948
Provino n°6 (P6)	15±0.2	25.72	28.01	26.73	0.0813
Provino n°7 (P7)	20±0.2	25.92	27.52	25.22	0.0841
Provino n°8 (P8)	25±0.2	26.46	26.46	24.00	0.0075
Provino n°9 (P9)	30±0.2	25.20	26.42	25.33	0.0616
Provino n°10 (P10)	35±0.2	24.67	25.96	23.92	0.0886
Provino n°11 (P11)	40±0.2	24.01	25.40	24.51	0.022
Provino n°12 (P12)	45±0.2	24.57	23.82	24.93	0.0283
Provino n°13 (P13)	60±0.2	23.62	23.63	23.55	0.0019
Provino n°14 (P14)	75±0.2	22.99	23.00	23.19	0.0127
Provino n°15 (P15)	90±0.2	22.68	22.42	22.76	0.0316

Con riferimento al provino n°0 ($\alpha=0^\circ$), in figura 5.2 è illustrato l'andamento del rapporto $\varepsilon_f^{(i)}/\varepsilon_f^{(0)}$ relativo ad una delle due facce strumentate del provino, in funzione della distanza al bordo del foro: il suddetto rapporto è tra la deformazione nella direzione delle fibre, $\varepsilon_f^{(i)}$, misurata dall'i-esimo estensimetro posto alla distanza d_i rispetto al bordo del foro centrale, e la deformazione massima $\varepsilon_f^{(0)}$ letta in corrispondenza del trasduttore disposto in prossimità del foro, per un valore dello sforzo applicato pari a 16.43 kN, corrispondente al 49.3% del carico di rottura per rifollamento del provino in esame.

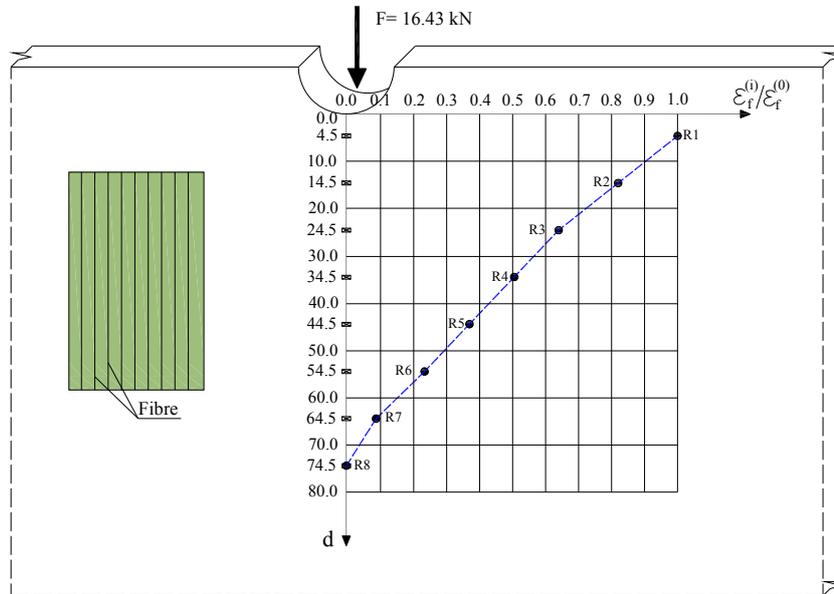


Figura 5.2 – Andamento della deformazione lungo la verticale sotto il foro del piatto (distanze in mm).

Il risultato ottenuto evidenzia come alla distanza di 74.5mm rispetto al bordo del foro non si registrino apprezzabili valori della suddetta deformazione e consente di concludere che, se la direzione delle fibre coincide con quella dello sforzo sollecitante, i punti situati ad una distanza compresa tra 3.5 e 4 volte il diametro del foro non risentono più dell'effetto del carico esterno applicato.

In Tabella 27 sono inoltre riportati i valori del suddetto rapporto $\varepsilon_f^{(i)}/\varepsilon_f^{(0)}$ in funzione della distanza, d_i , su entrambe le facce del provino (indicate con a e b), del punto di misura rispetto al bordo del foro centrale.

Tabella 27 – Valori delle deformazioni.

Rosetta estens.	Distanza dal bordo (d_i)	$\varepsilon_f^{(i)}$	$\varepsilon_f^{(i)}$	$\varepsilon_f^{(i)} / \varepsilon_f^{(0)}$	$\varepsilon_f^{(i)} / \varepsilon_f^{(0)}$
		lato a	lato b	lato a	lato b
	[mm]	[μm]	[μm]		
R1a,b	4.5	4436	4446	1.000	1.000
R2a,b	14.5	3637	3626	0.820	0.810
R3a,b	24.5	2839	2827	0.640	0.635
R4a,b	34.5	2262	2275	0.510	0.510
R5a,b	44.5	1641	1682	0.370	0.380
R6a,b	54.5	1020	981	0.230	0.220
R7a,b	64.5	399	415	0.090	0.100
R8a,b	74.5	≈ 0	≈ 0	-	-

Si rileva che i valori dei suddetti rapporti relativi alle due facce del provini differiscono tra loro al più del 5%. Tale circostanza costituisce una verifica della centratura del carico applicato.

Si rinvia il lettore all'ultimo paragrafo del presente Capitolo per una esaustiva rassegna di immagini riprese durante l'esecuzione delle prove.

5.1. Modalità di collasso locale e confronto con i risultati numerici

In questo paragrafo sono riportate alcune immagini relative alle modalità di collasso locale per rifollamento delle piastre monostrato in GFRP sottoposte a prova. Esse sono messe a confronto con le distribuzioni delle tensioni agenti in prossimità del foro centrale dei provini ottenute dall'analisi numerica agli elementi finiti. Com'è possibile osservare, la rottura del materiale interessa la zona del foro (evidenziata con un tratto rosso) in cui l'analisi numerica ha evidenziato i massimi valori delle tensioni. Nelle stesse figure, invece, il tratto nero indica la direzione dello sforzo.

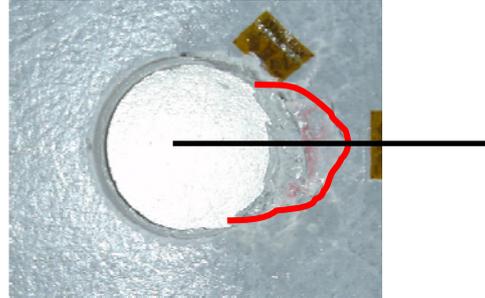
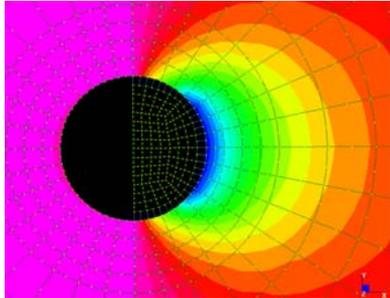


Figura 5.3 – Confronto tra la distribuzione delle tensioni ottenute con analisi FEM e deformazione a collasso nell'intorno del foro centrale- $\alpha=0^\circ$

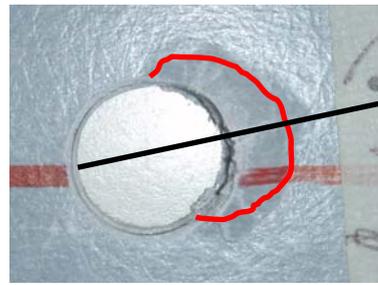
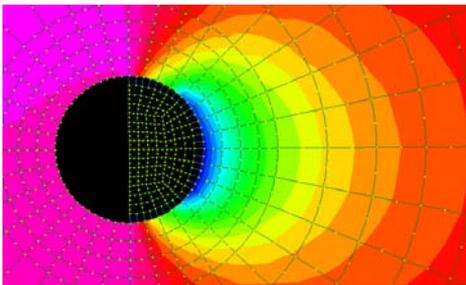


Figura 5.4 – Confronto tra la distribuzione delle tensioni ottenute con analisi FEM e deformazione a collasso nell'intorno del foro centrale- $\alpha=10^\circ$

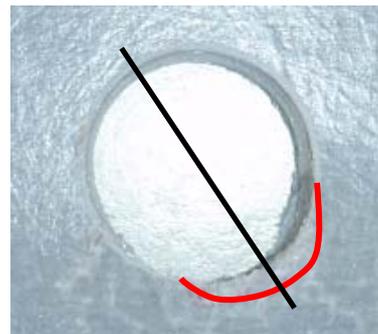
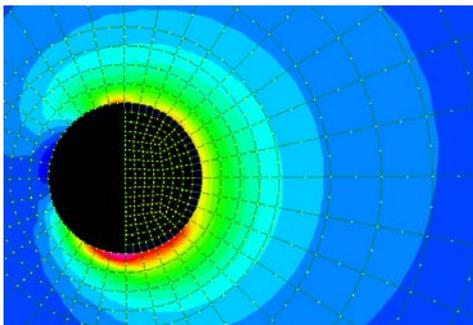


Figura 5.5 – Confronto tra la distribuzione delle tensioni ottenute con analisi FEM e deformazione a collasso nell'intorno del foro centrale- $\alpha=75^\circ$

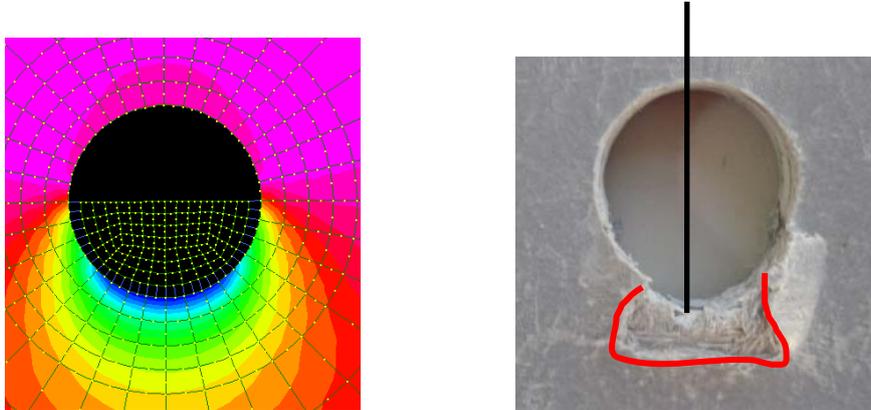


Figura 5.6 – Confronto tra la distribuzione delle tensioni ottenute con analisi FEM e deformazione a collasso nell'intorno del foro centrale- $\alpha=90^\circ$

5.2. Primi risultati sperimentali sui laminati pluristrato

Nel presente paragrafo si presentano i primi risultati sperimentali, in termini di carico di rottura, $F_u^{(\alpha)}$, di provini ricavati a partire da piastre pluristrato di GFRP. Queste ultime sono caratterizzate da due differenti schemi di laminazione: $[(0_6/90_6)]_s$ (laminato tipo 1), $[(0_3/90_3)_2]_s$ (laminato tipo 2).

Per entrambe le tipologie di laminato sono state confezionate due serie di nove provini ricavati a partire dalle suddette piastre pluristrato di GFRP (*Glass-FRP*). Tali piastre sono state ottenute per laminazione sottovuoto di 24 strati di tessuto in fibra di vetro, più due strati di tessuto tipo *mat*, impregnati con resina epossidica. Le frazioni volumetriche delle fibre e della matrice sono pari in entrambi i casi, rispettivamente, al 65% e al 35%, circa.

I provini di GFRP presentano forma quadrata di lato 500mm e spessore pari a 15mm. Così come fatto per gli analoghi provini monostrato, su ciascun provino pluristrato sono stati praticati quattro fori d'angolo ed altri due fori, di diametro pari a 21mm, necessari per ottenere un angolo α di prefissato valore, tra la direzione dello sforzo sollecitante e quello delle fibre nella direzione 0° (Fig. 5.7). I nove provini di ciascuna serie corrispondono ai seguenti nove valori nominali del suddetto angolo α : 0° , 1° , 5° , 15° , 20° , 25° , 45° , 75° e 90° .

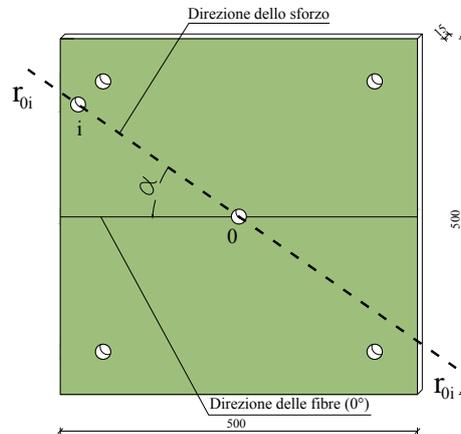


Figura 5.7 – Provino pluristrato di GFRP (dimensioni in mm).

I valori nominali delle principali caratteristiche meccaniche delle fibre e della matrice costituenti le due tipologie di laminati compositi sono riportati, rispettivamente, nelle Tabelle 28 e 29.

Tabella 28 – Caratteristiche meccaniche delle fibre.

Valori nominali forniti dal produttore	Unità di misura	Valore
Densità volumetrica	g/cm ³	2.59-2.62
Diametro filamento	µm	14
Carico di rottura a trazione delle fibre	MPa	2600
Modulo di elasticità a trazione delle fibre	GPa	73
Allungamento a rottura	%	3.5 - 4.0

Tabella 29 – Caratteristiche meccaniche della resina.

Valori nominali forniti dal produttore	Unità di misura	Valore
Resistenza a trazione	MPa	40
Modulo di elasticità normale a trazione	MPa	2500
Resistenza a compressione	MPa	65
Modulo di elasticità normale a compressione	MPa	1900

Si è proceduto, analogamente al caso dei laminati monostrato, ad una verifica del valore del modulo elastico delle fibre e quello della percentuale volumetrica delle stesse attraverso prove in laboratorio.

In Tabella 30 si riportano, le caratteristiche meccaniche dei due laminati composti pluristrato.

Tabella 30 – Caratteristiche meccaniche del laminato composito.

Valori sperimentali	Unità di misura	Valore
Resistenza a trazione, 0°	MPa	310
Resistenza a trazione, 90°	MPa	310
Resistenza a compressione, 0°	MPa	381
Resistenza a compressione, 90°	MPa	381
Modulo di elasticità normale a compr., 0°	MPa	25000
Modulo di elasticità normale a compr., 90°	MPa	25000
Modulo di elasticità normale a traz., 0°	MPa	23000
Modulo di elasticità normale a traz., 90°	MPa	23000

In figura 5.8a-b è mostrato l'andamento del rapporto $F_u^{(\alpha)}/F_u^{(0)}$ al variare dell'angolo α , essendo $F_u^{(0)}$ il carico di rottura del provino le cui fibre sono disposte nella direzione 0°, sia per il laminato 1 che per quello 2. Si precisa che i valori riportati sono quelli medi.

In Tabella 30 sono riportati i suddetti valori medi del carico di rottura per rifollamento, $F_u^{(\alpha)}$, delle due serie previste per ogni tipologia di laminato, mentre in Tabella 31, per completezza, sono riportati i valori del suddetto carico per tutti i provini testati e la relativa varianza.

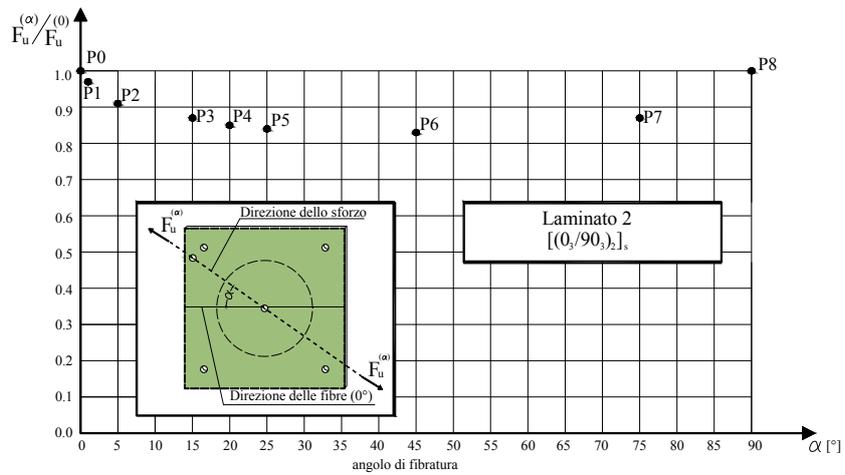
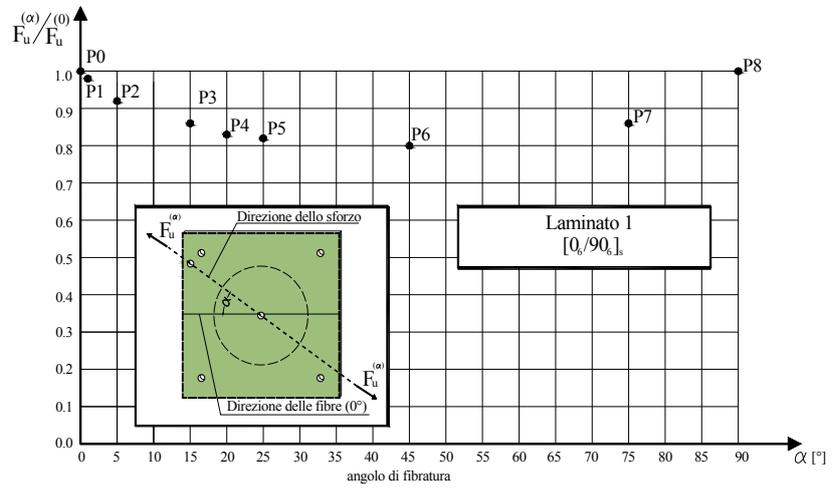


Figura 5.8 - Curva del rapporto $F_u^{(\alpha)}/F_u^{(0)}$ in funzione dell'angolo α : a) laminato 1; b) laminato 2 .

Tabella 30 – Valori medi del carico ultimo.

Sigla	Ang. α	Laminato 1		Laminato 2	
		$F_{u,medio}^{(\alpha)}$	$F_u^{(\alpha)} / F_u^{(0)}$	$F_{u,medio}^{(\alpha)}$	$F_u^{(\alpha)} / F_u^{(0)}$
		[°]	[KN]	[KN]	
Provino n.0 (P0)	0±0.2	75.94	1.00	72.22	1.00
Provino n.1 (P1)	1±0.2	74.40	0.98	70.00	0.97
Provino n.2 (P2)	5±0.2	70.00	0.92	66.00	0.91
Provino n.3 (P3)	15±0.2	65.00	0.86	63.00	0.87
Provino n.4 (P4)	20±0.2	63.00	0.83	62.00	0.86
Provino n.5 (P5)	25±0.2	62.00	0.82	61.00	0.84
Provino n.6 (P6)	45±0.2	61.00	0.80	60.00	0.83
Provino n.7 (P7)	75±0.2	65.00	0.86	63.00	0.87
Provino n.8 (P8)	90±0.2	75.94	1.00	72.22	1.00

Tabella 31 – Valori del carico ultimo.

Sigla	Ang. α	Laminato 1			Laminato 2		
		$F_u^{(\alpha)}$ 1ª serie	$F_u^{(\alpha)}$ 2ª serie	Varianza	$F_u^{(\alpha)}$ 1ª serie	$F_u^{(\alpha)}$ 2ª serie	Varianza
		[°]	[KN]	[KN]	[-]	[KN]	[KN]
P0	0±0.2	76.10	75.78	0.052	72.40	72.04	0.063
P1	1±0.2	74.20	74.60	0.080	70.34	69.66	0.231
P2	5±0.2	70.10	69.90	0.020	65.88	66.12	0.028
P3	15±0.2	64.91	65.09	0.016	63.22	62.78	0.096
P4	20±0.2	63.32	62.68	0.20	62.17	61.83	0.057
P5	25±0.2	61.85	62.15	0.045	60.91	61.09	0.016
P6	45±0.2	60.87	61.13	0.033	60.11	59.89	0.024
P7	75±0.2	65.21	64.79	0.088	62.89	63.11	0.024
P8	90±0.2	76.00	75.88	0.0078	72.4	72.04	0.06

Come è possibile osservare, la curva del rapporto $F_u^{(\alpha)} / F_u^{(0)}$ in funzione dell'angolo α presenta un asse di simmetria in corrispondenza di $\alpha=45^\circ$ sia per il laminato 1 che 2.

Inoltre, in termini di resistenza al rifollamento, i valori relativi alle due tipologie di laminato pluristrato considerate differiscono tra di loro al più del 5%.

Così come osservato per i laminati monostrato, anche nel caso dei laminati pluristrato si ha un sensibile decremento della resistenza a rifollamento per valori dell'angolo α compresi tra 0° e 15° . In particolare, riferendosi per esempio al la-

minato tipo 1, il rapporto $F_u^{(\alpha)}/F_u^{(0)}$ assume il valore 0.86 nel caso del provino P3 ($\alpha=15^\circ$), corrispondente ad una riduzione del carico di rottura per rifollamento pari a circa il 14% rispetto al valore massimo registrato (provino P0 – $\alpha=0^\circ$).

Per valori dell'angolo α superiori, si osserva una ulteriore riduzione della resistenza a rifollamento anche se la curva $F_u^{(\alpha)}/F_u^{(0)}$ è caratterizzata da una pendenza meno accentuata rispetto a quella relativa al primo tratto ($0^\circ < \alpha < 15^\circ$).

La resistenza al rifollamento attinge il valore minimo in corrispondenza del provino P6, per entrambe le tipologie di laminato pluristrato considerate, le cui fibre sono disposte a 45° rispetto alla direzione dello sforzo sollecitante, con un abbattimento del carico di rottura pari a circa il 20%.

6. Formule di progetto

Nel presente paragrafo si intende fornire formule di progetto del carico di rottura per rifollamento di laminati simmetrici, sia monostrato che pluristrato, in funzione dell'angolo di fibratura α .

Una prima formula proposta è la seguente:

$$F_{u,\alpha} = F_{u,0} \left[\left(1 - \frac{F_{u,(\pi/2m)}}{F_{u,0}} \right) \left(\frac{\pi/2 - (m \alpha)}{\pi/2} \right)^5 + \frac{F_{u,(\pi/2m)}}{F_{u,0}} + C (m \alpha)^3 \left(\frac{\pi/2 - (m \alpha)}{\pi/2} \right)^3 \right], \quad (6.1a)$$

dove la costante C assume il seguente significato:

$$C = \frac{\left[\frac{F_{u,(\pi/4)}}{F_{u,0}} - \left(1 - \frac{F_{u,(\pi/2m)}}{F_{u,0}} \right) \left(\frac{1}{2} \right)^5 - \frac{F_{u,(\pi/2m)}}{F_{u,0}} \right]}{\left(\frac{\pi}{4} \right)^3 \left(\frac{1}{2} \right)^3}. \quad (6.1b)$$

Nella (6.1a) $F_{u,0}$ è il valore del carico di rottura per α pari a 0° , $F_{u,(\pi/4)}$ quello per α pari a 45° . Il coefficiente m , detto modulo di replicabilità, rappresenta il numero di rotazioni uguali intorno all'asse perpendicolare al piano del laminato, necessarie per riportare quest'ultimo su se stesso. Nel caso del laminato monostrato m assume il valore 1, mentre nel caso del laminato pluristrato considerato (del tipo cross-ply), esso assume il valore 2. Si precisa che nelle formule (6.1) l'angolo α si intende espresso in radianti.

In figura 6.1 e 6.2 è mostrato il confronto tra l'andamento di $F_{u,\alpha}$ determinato sperimentalmente e quello ottenibile con l'ausilio delle formule (6.1), sia nel caso di laminati monostrato (Fig. 6.1) che nel caso di laminati pluristrato (Fig. 6.2).

Nel primo vi è un ottimo accordo tra i valori del suddetto carico così determinato, per valori dell'angolo di fibratura compresi tra 0° e 10° , con differenze percentuali pari al più al 2%. Per valori maggiori del suddetto angolo ($10^\circ < \alpha < 90^\circ$), vi è invece un perfetto accordo. Anche nel secondo caso, le differenze in termini percentuali tra i valori sperimentali e quelli ottenibili dalla (6.1), sono pari al più al 2%.

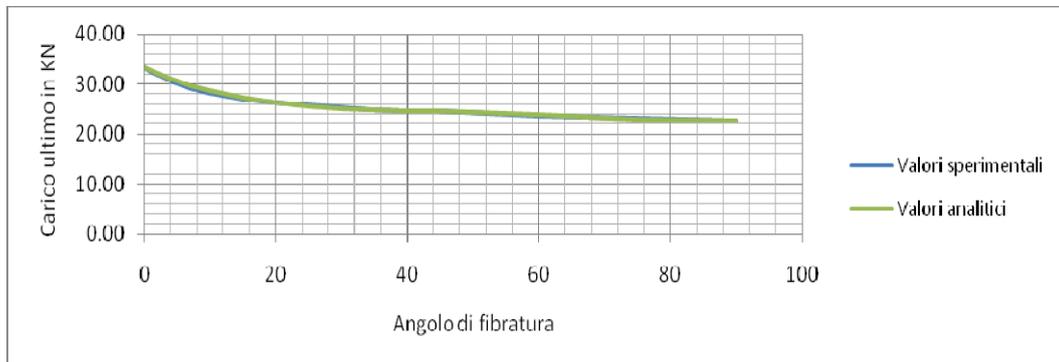


Figura 6.1 – Confronto tra valori sperimentali e analitici nel caso di laminati monostrato.

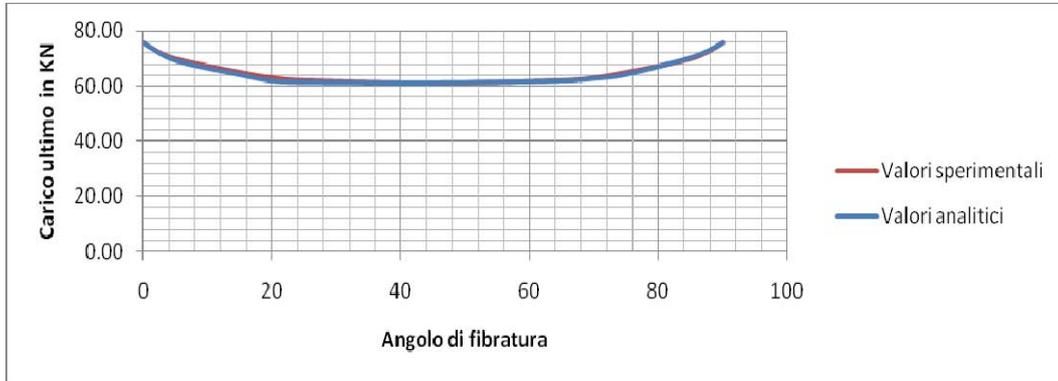


Figura 6.2 – Confronto tra valori sperimentali e analitici nel caso di laminati pluristrato.

Per il calcolo del carico di rottura per rifollamento è possibile fare riferimento anche alla ulteriore seguente formula di progetto.

$$F_{u,\alpha} = F_{u,0} \left[\left(1 - \frac{F_{u,(\pi/2m)}}{F_{u,0}} \right) \left(\frac{\pi/2 - (m \alpha)}{\pi/2} \right)^6 + \frac{F_{u,(\pi/2m)}}{F_{u,0}} \right]. \quad (6.2)$$

Le differenze tra i valori sperimentali e quelli ottenibili con l'ausilio della formula (6.2), in termini percentuali, sono pari al più al 5% per valori dell'angolo α compresi tra 10° e 90° ed inoltre sono a vantaggio di sicurezza. Nell'intervallo ($0^\circ < \alpha < 10^\circ$) vi è invece un perfetto accordo.

7. Conclusioni

Laminato monostrato

I risultati della sperimentazione consentono di trarre le seguenti due principali conclusioni. La prima attiene all'influenza della inclinazione delle fibre sulla resistenza a rifollamento; la seconda attiene alla distribuzione delle tensioni in prossimità del foro.

- La resistenza a rifollamento di una giunzione bullonata tra elementi strutturali di materiale composito fibrorinforzato unidirezionale dipende sensibilmente dall'angolo di inclinazione dello sforzo applicato rispetto alla direzione delle fibre.

In particolare, essa decresce sensibilmente nell'intervallo di valori del suddetto angolo, compresi tra 0° e 10° . Per angoli di ampiezza maggiore, la riduzione è caratterizzata da una pendenza meno accentuata. Infatti, il valore del carico di rottura per rifollamento del provino P5 ($\alpha=10^\circ$) è risultato pari a circa l'85% di quello massimo registrato (provino P0- $\alpha=0^\circ$), mentre quello del provino P15 ($\alpha=90^\circ$) è risultato pari al 68% circa di quello massimo.

- Nel caso di fibre parallele alla direzione dello sforzo applicato, i punti situati ad una distanza compresa tra 3.5 e 4 volte il diametro del foro non risentono più dell'effetto del carico.

Tale risultato sperimentale ha confermato le previsioni dall'analisi numerica agli elementi finiti, illustrata al §4., la quale ha inoltre evidenziato come l'entità e la distribuzione delle tensioni che si mobilitano in prossimità del foro sia marcatamente influenzata dall'angolo di fibratura.

Laminato pluristrato

I primi risultati sperimentali hanno evidenziato anche per questo tipo di laminato un marcata influenza dell'angolo di fibratura nei confronti della resistenza al rifollamento.

In particolare, quest'ultima presenta un sensibile decremento nell'intervallo dell'angolo α compreso tra 0° e 15° , in corrispondenza del quale si registra un abbattimento della suddetta resistenza del 14%, rispetto al suo valore massimo ($\alpha=0^\circ$). Per valori maggiori dell'angolo α , compresi tra 15° e 45° , la curva del rapporto $F_u^{(\alpha)} / F_u^{(0)}$ è caratterizzata da una pendenza meno accentuata con abbattimento ulteriore della resistenza al rifollamento pari a circa il 6%, per un valore complessivo del 20%.

La curve del rapporto $F_u^{(\alpha)} / F_u^{(0)}$ di figura 5.8 mostrano un asse di simmetria in corrispondenza dell'angolo α pari a 45° , in corrispondenza del quale il suddetto rapporto esibisce il suo valore minimo.

L'analisi sperimentale ha inoltre evidenziato che, in termini di carico di rottura per rifollamento, a parità di spessore e numero di strati costituenti il laminato pluristrato, vi è una differenza pari al più al 5% tra i due schemi di laminazione presi in considerazione.

Futuri avanzamenti della ricerca prevedono:

- proseguire l'analisi sperimentale sui laminati pluristrato, sia in termini di resistenza al rifollamento che in termini di distanza di estinzione dell'effetto del carico applicato;
- analisi dell'influenza prodotta sulla resistenza a rifollamento della pressione superficiale esercitata da rondelle rigide disposte sotto la testa dei bulloni a seguito del serraggio di questi ultimi, sia su elementi di composito di tipo monostrato che pluristrato;

Infine, si intende sottoporre a prova collegamenti bullonati caratterizzati dalla presenza di più file di bulloni in modo da valutare i coefficienti di attribuzione dello sforzo di taglio per ciascuna fila.

8. Immagini riprese durante l'esecuzione delle prove

In questo ultimo paragrafo sono raccolte le foto più significative riprese durante l'esecuzione delle prove di rifollamento, compressione e trazione per alcuni valori dell'angolo di fibratura α .

Piastra di GFRP con angolo di fibratura α pari a 0°

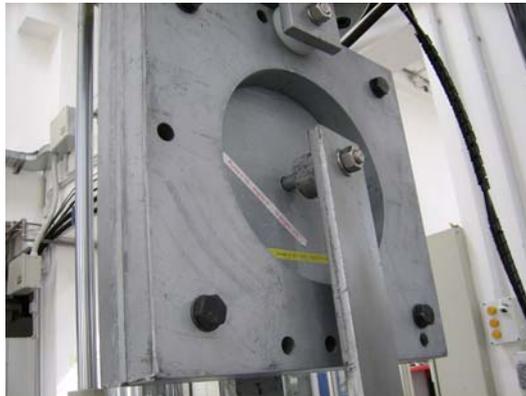


Figura 8.1 – Prototipo agganciato al dispositivo di prova.

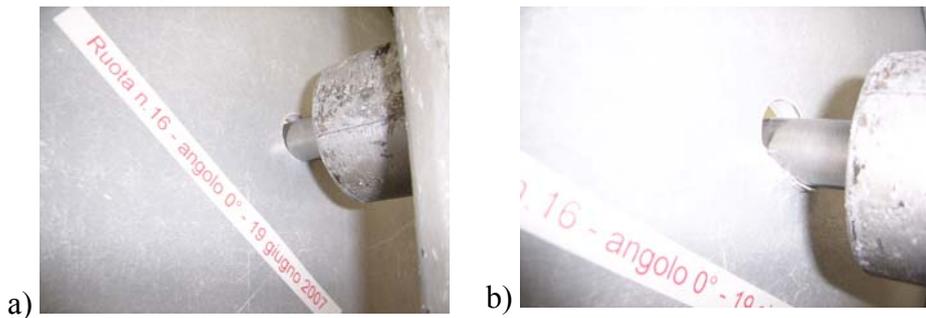


Figura 8.2 – a) e b) Particolari della crisi per rifollamento.

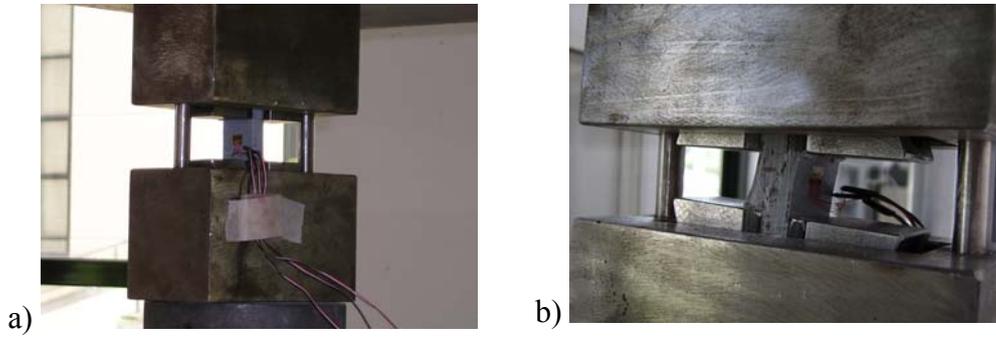


Figura 8.3 – a) foto del provino strumentato, ammorso alle ganasce del dispositivo di prova; b) foto della modalità di rottura del provino.

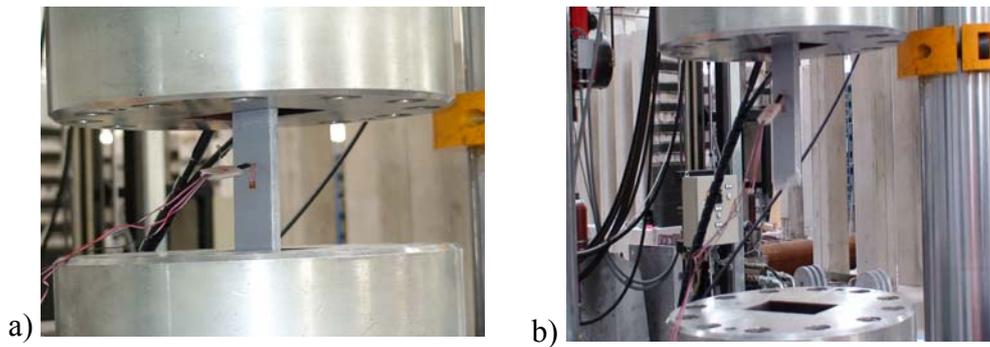


Figura 8.4 – a) provino di GFRP ammorso alle ganasce della macchina universale per la prova di trazione; b) modalità di rottura del provino.

Piastra di GFRP con angolo di fibratura α pari a 3°



Figura 8.5 – Particolare del foro centrale.

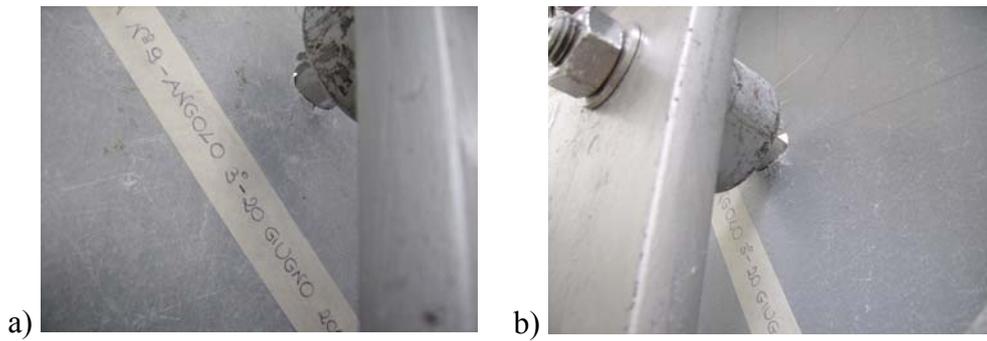


Figura 8.6 – a) e b) particolari della crisi per rifollamento.

Piastra di GFRP con angolo di fibratura α pari a 25°



Figura 8.7 – Particolare del foro centrale.

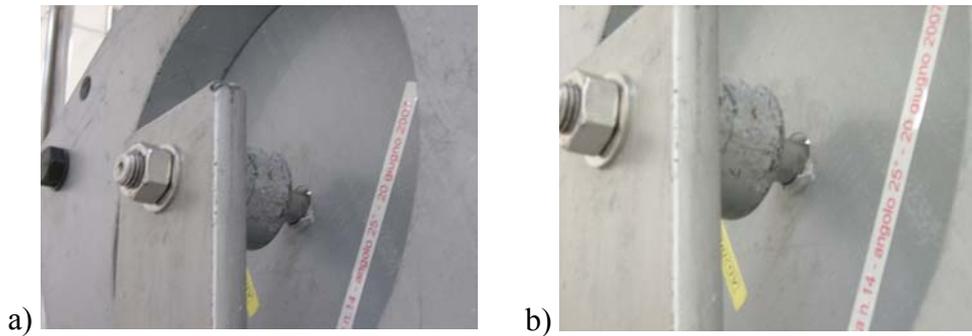


Figura 8.8 – a) e b) particolari della crisi per rifollamento.

Piastra di GFRP con angolo di fibratura α pari a 90°



Figura 8.9 – Disposizione trasduttori nell'intorno del foro centrale del piatto di GFRP.

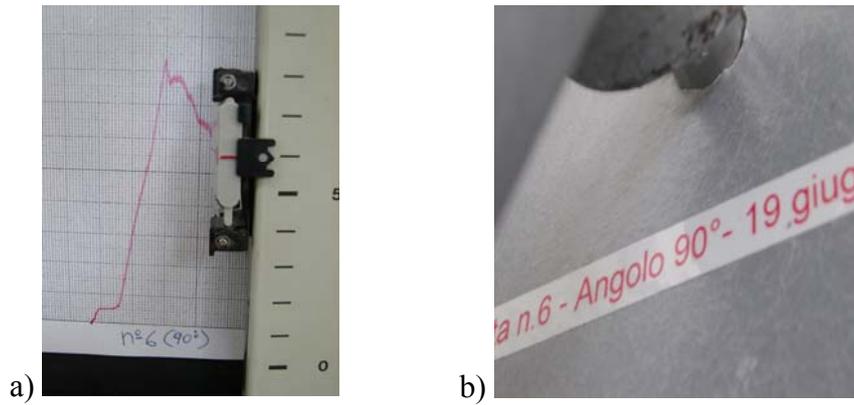


Figura 8.10 – Risultati della prova: a) Curva carico-spostamento; b) Particolare della crisi per rifollamento.

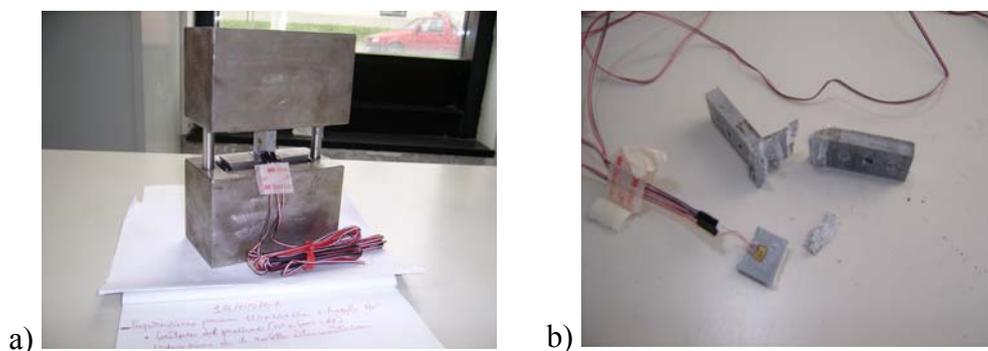


Figura 8.11 – a) Foto del dispositivo di prova a compressione; b) Particolare della modalità di rottura del provino a compressione.