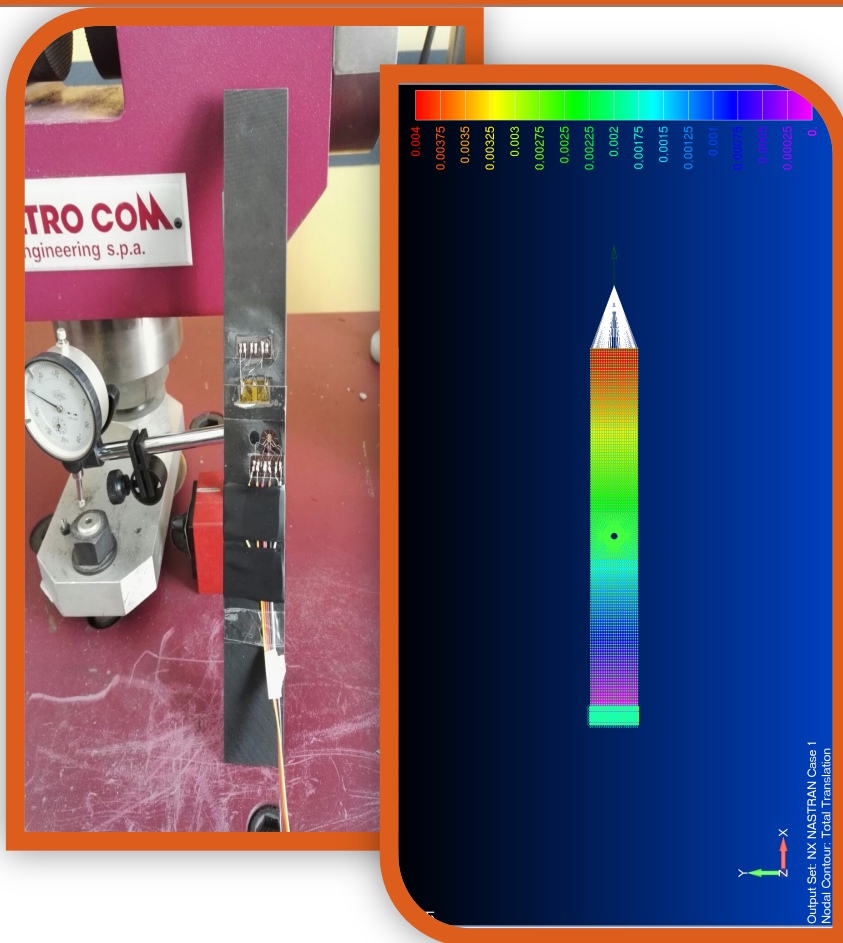


**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI
NAPOLI FEDERICO II**

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA
AEROSPAZIALE**

**CONFRONTO TRA DATI NUMERICI E SPERIMENTALI PER UN
PROVINO IN COMPOSITO LAMINATO**



GIUSEPPE ALFERI M53000548

INTRODUZIONE

È stato eseguito un confronto tra i valori sperimentali, ricavati in laboratorio per un provino tester forato, e un modello numerico realizzato apposta per essere quanto più attinente possibile al modello reale.

Sono state apportate varie modifiche al modello numerico al fine di poter raggiungere una buona fiducia nel modello realizzato.

È stato poi ricavato l'andamento del fattore di concentrazione degli stress nell'intorno del foro.

SOMMARIO

INTRODUZIONE.....	1
SOMMARIO.....	2
MODELLO DA ANALIZZARE E RISULTATI DELL'ANALISI SPERIMENTALE.....	3
REALIZZAZIONE DEL MODELLO NUMERICO	6
CONFRONTO TRA MODELLO NUMERICO E SPERIMENTALE.....	10
RIDUZIONE ERRORE PRODOTTO DAL MODELLO.....	12
ANDAMENTO DEL FATTORE DI CONCENTRAZIONE DEGLI STRESS INTORNO AL FORO.....	15



MODELLO DA ANALIZZARE E RISULTATI DELL'ANALISI SPERIMENTALE

Il modello realizzato per la prova sperimentale ha una geometria rettangolare con lato maggiore di 12 pollici e un lato minore di 1,5 pollici.

Il foro è stato realizzato sul centro geometrico del provino con un diametro di 0,25 pollici.

L'acquisizione dati dalla prova sperimentale è stata realizzata mediante un estensimetro triassiale posizionato sulla ply più esterna del provino orientata a -45° rispetto alla direzione di tiro del carico.

L'estensimetro triassiale è stato collocato a una distanza mediana rispetto alla lunghezza predominante del provino e a una distanza di 0.25 pollici dal bordo foro.

È possibile vedere, dall'ingrandimento della foto, la zona intorno al bordo foro comprendente anche l'estensimetro triassiale.



Le caratteristiche meccaniche della lamina in esame non sono state caratterizzate mediante appositi test, ma sono state ricavate con l'uso di teorie micromeccaniche. Ciò comporta che rispetto alle proprietà reali della lamina, queste assunte potranno essere affette da errori del 10-20%.

Il laminato è stato realizzato con 14 lamine in una sequenza di laminazione simmetrica e bilanciata:

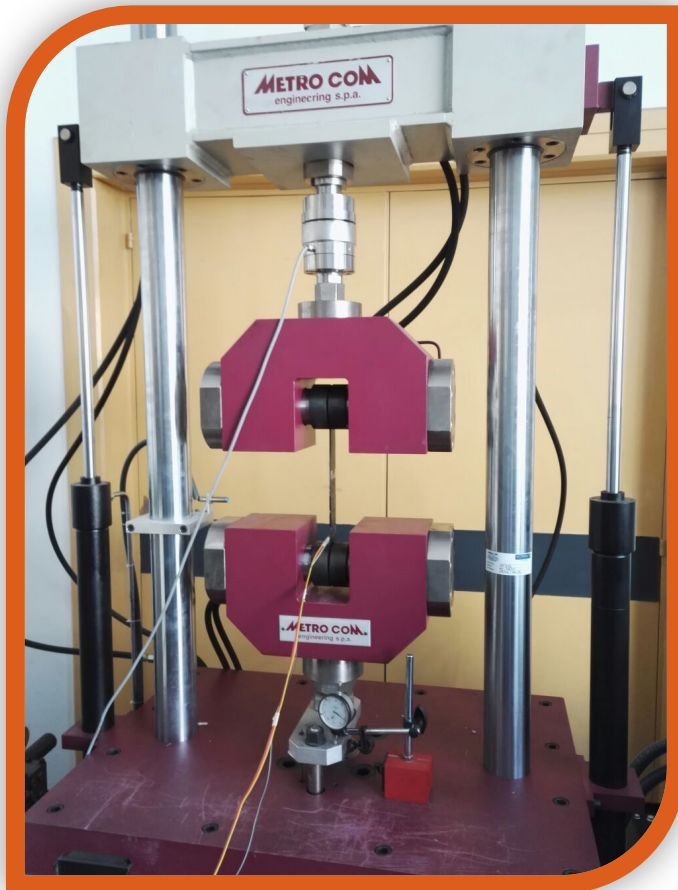
$$[\pm 45 \ 90 \ 0 \ \pm 45 \ 90]_S$$

L'estensimetro triassiale fornirà 3 misure estensimetriche ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3 le quali dovranno essere opportunamente modificate per poter essere confrontate con le misure ingegneristiche fornite in output dal software

di analisi femap.

La seguente tabella riporta le caratteristiche meccaniche del modello in analisi.

MODULO ELASTICO E_1	21756000 PSI
MODULO ELASTICO E_2	1189310 PSI
MODULO DI TAGLIO G_{12}	580151 PSI
SHEAR (G_{12})	580151 PSI
SHEAR (G_{22})	435113 PSI
POISSON RATIO (ν)	0.3
TENSION LIMIT (1)	377098 PSI
TENSION LIMIT (2)	7977,08 PSI
COMPRESSION LIMIT (1)	232060 PSI
COMPRESSIONE LIMIT (2)	34809,1 PSI
SHEAR LIMIT	15954,2 PSI



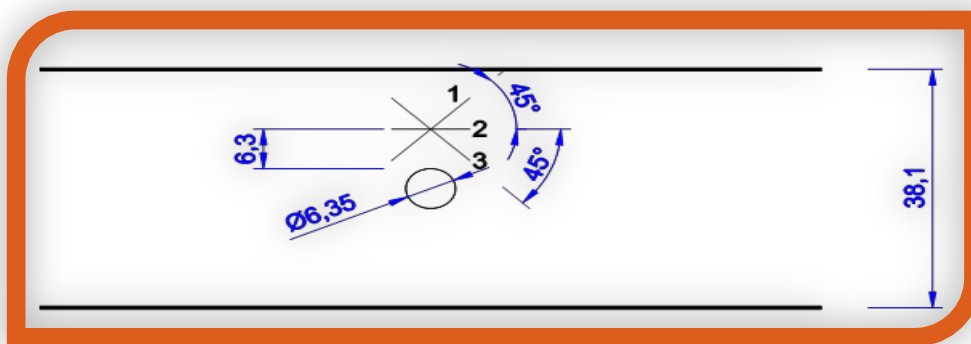
La prova sperimentale è stata condotta a trazione lungo la direzione principale del provino ed è stata eseguita mediante un martinetto idraulico con sistema di controllo retroazionato capace di fornire e controllare una specifica sequenza di carico preimpostata.

Nel nostro caso la prova di trazione è stata condotta sottoponendo il provino a un carico che rientrasse nel campo elastico lineare del materiale.

Di seguito è riportata la tabella con gli output emessi dal software *labview* che ha consentito l'esecuzione della prova secondo una specifica sequenza di carico.

CARICO (N)	CARICO(LB)	SPOSTAMENTO (mm)	ESTENSIMETRO 1 SG1	ESTENSIMETRO RO 2 SG2	ESTENSIMETRO RO 3 SG3
127,3	28,61	0,000	2,1	1,5	0,0
195,7	43,98	0,001	7,2	15,1	5,2
308,6	69,35	0,006	17,3	35,3	14,2
405,9	91,21	0,013	26,3	59,0	22,4
514,1	115,53	0,018	34,1	77,7	29,8
615,3	138,27	0,024	45,1	100,2	39,9
716,5	161,01	0,028	53,5	120,9	47,9
824,0	185,17	0,034	61,3	141,5	53,8
917,8	206,25	0,039	72,4	164,5	63,5
1020,0	229,21	0,044	79,6	185,2	71,8
1123,6	252,49	0,050	88,8	208,1	79,5
1216,4	273,35	0,056	98,5	227,8	87,2
1322,5	297,19	0,060	108,6	251,2	97,5
1429,5	321,24	0,068	117,8	274,7	107,0
1525,6	342,83	0,072	129,2	296,6	115,0

È riportata una schermata che mostra com'è stato posizionato l'estensimetro triassiale. Inoltre, sono state numerate singolarmente le tre direzioni così da tenere traccia delle loro misure.



Si può notare che, per com'è stato posizionato l'estensimetro, la misura rilevata dall'estensimetro 1 corrisponderà alla direzione lungo la fibra della prima lamina posta sul laminato, quindi tale misura sarà corrispondente a quella fornita in output dal solutore lungo la direzione *x normal strain* per la prima ply.

Analogo discorso potrà essere fatto per la misura fornita dall'estensimetro 3, che così per com'è posizionato potrà essere confrontato con la misura fornita in output dal solutore lungo la direzione *y normal strain* (direzione ortogonale alla fibra) per la prima ply.

REALIZZAZIONE DEL MODELLO NUMERICO

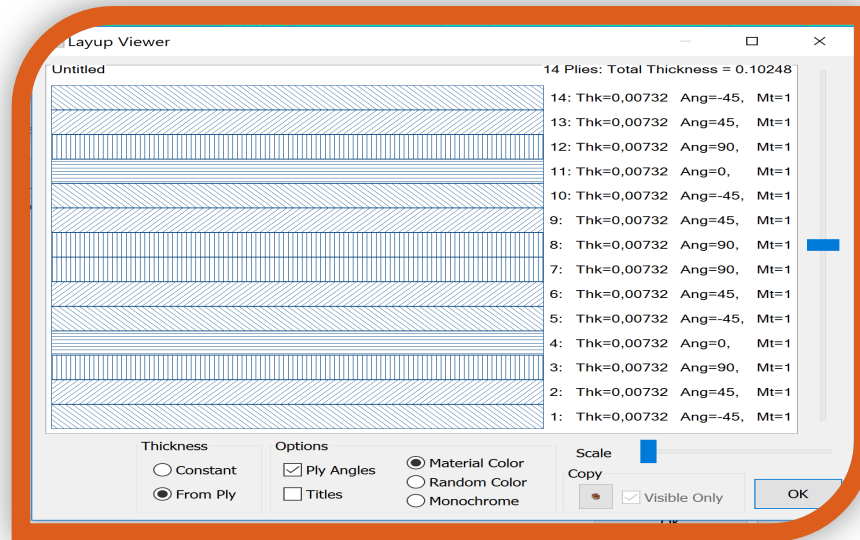
Realizzare un modello numerico che emulasse le caratteristiche di quello reale ha richiesto la completa conoscenza del modello.

Sono state fornite in input al software le schede informative inerenti al materiale:

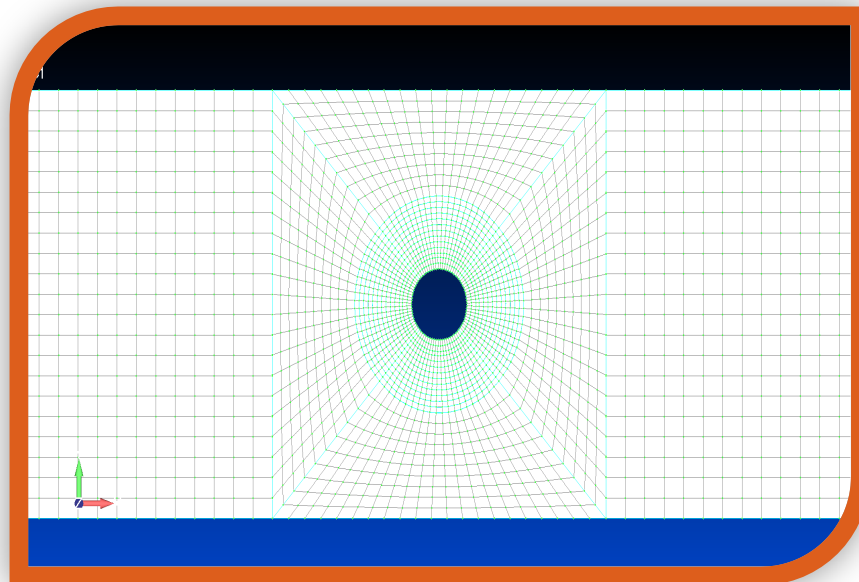
Sono state fornite in input al software le schede inerenti all'orientazione e spessore per ogni lamina utilizzate:

Ply ID	Global Ply	Material	Thickness	Angle
14		1..IMS	0,00732	-45,
13		1..IMS	0,00732	45,
12		1..IMS	0,00732	90,
11		1..IMS	0,00732	0,
10		1..IMS	0,00732	-45,
9		1..IMS	0,00732	45,
8		1..IMS	0,00732	90,
7		1..IMS	0,00732	90,
6		1..IMS	0,00732	45,
5		1..IMS	0,00732	-45,
4		1..IMS	0,00732	0,
3		1..IMS	0,00732	90,
2		1..IMS	0,00732	45,
1		1..IMS	0,00732	-45,

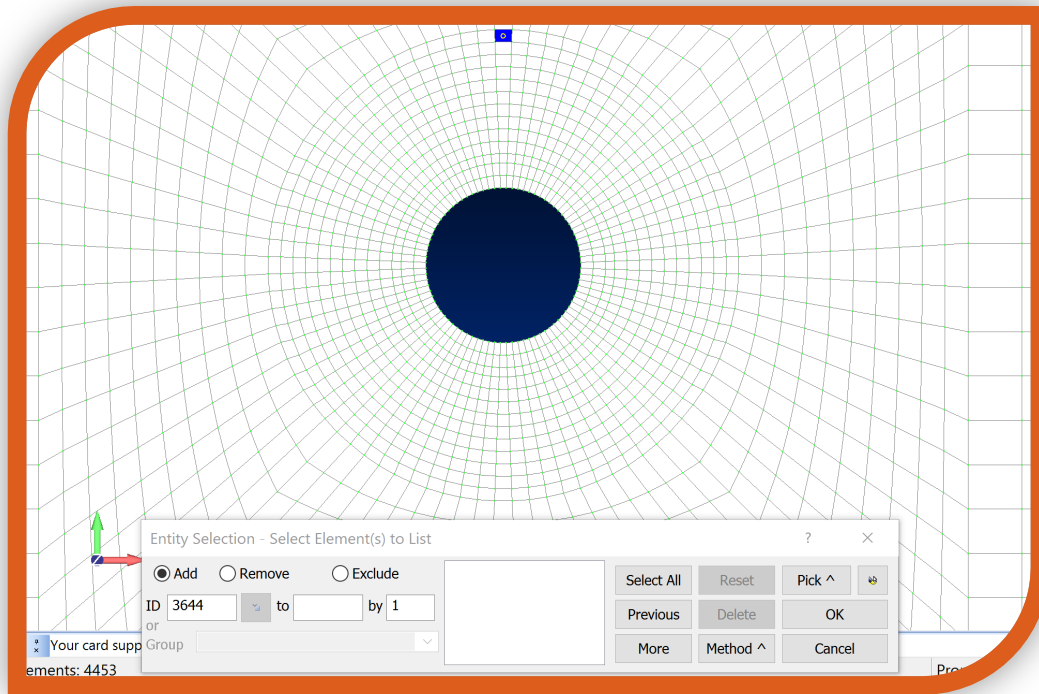
In questa rappresentazione grafica prodotta dal *Femap* è possibile visualizzare una rappresentazione grafica dell'orientazione delle varie lamine:



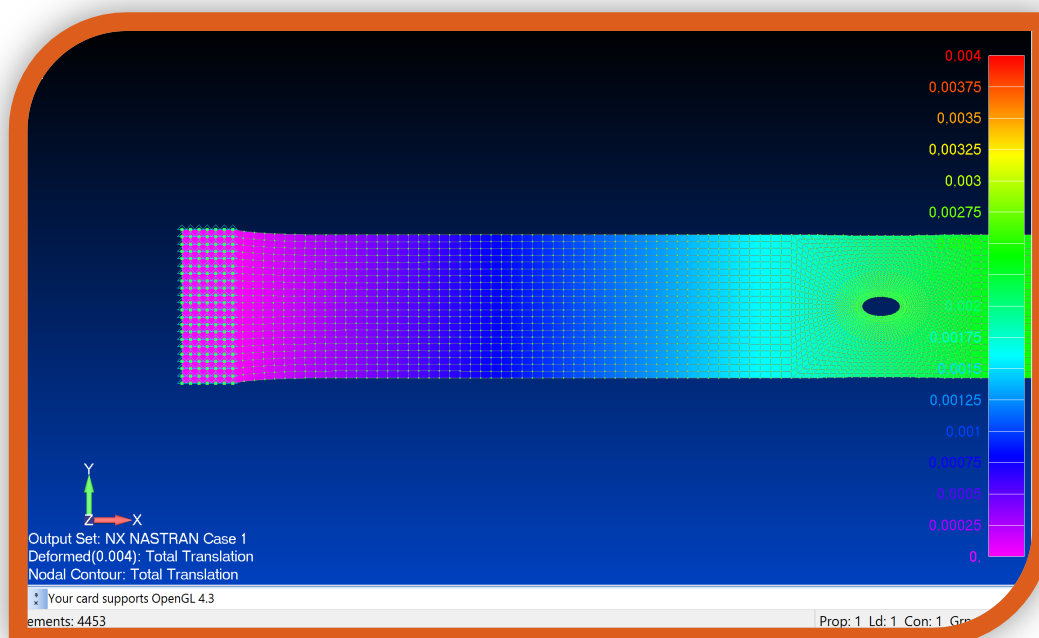
È stata realizzata una mesh con elementi quadrangolari e maggiormente infittita nella regione del foro fino alla distanza di 0,25 pollici dal bordo foro. La mesh è stata realizzata e divisa in modo che la posizione in cui è stato collocato l'estensimetro (a 0,25 pollici dal bordo foro) capitasse al centro di un elemento.



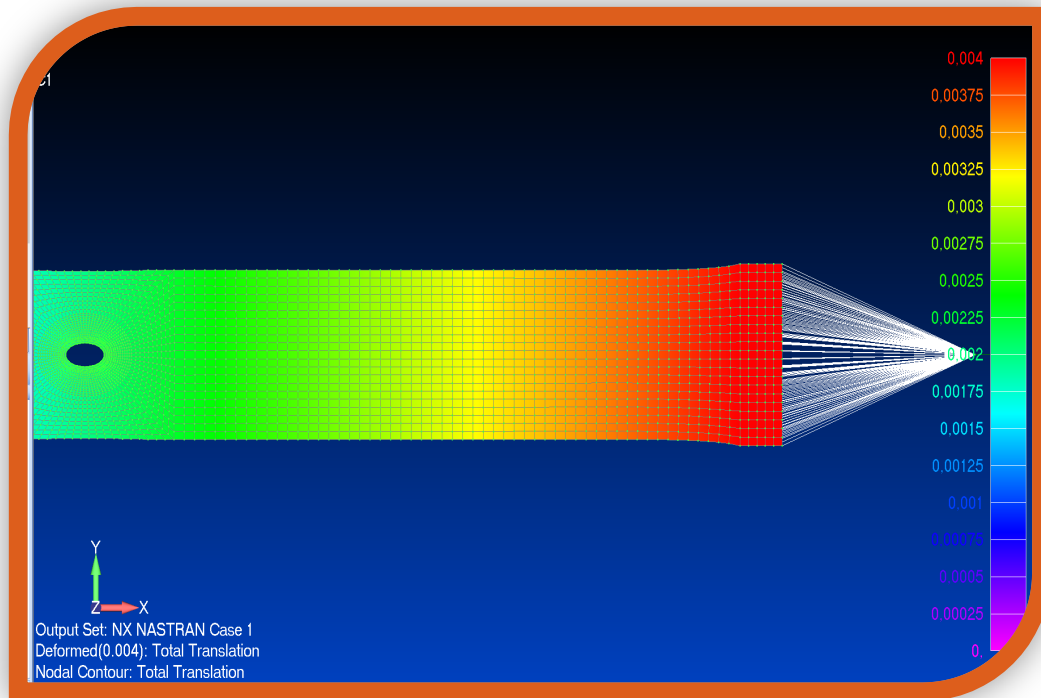
Nel caso particolare l'elemento della mesh, oggetto del nostro confronto numerico sperimentale, è stato contrassegnato con l'ID 3644 evidenziato nell'immagine seguente:



La modellazione del vincolo e del carico è sempre una condizione molto difficile da realizzare in ambito numerico, per questo report è stato realizzato un vincolo che bloccasse le traslazioni e le rotazioni per tutti i nodi selezionati. Sono stati inseriti nodi interni al modello e non solo quelli perimetrali per il vincolo per meglio simulare l'azione delle morse della macchina pneumatica che ha eseguito il test di carico, come si può vedere dalla figura:

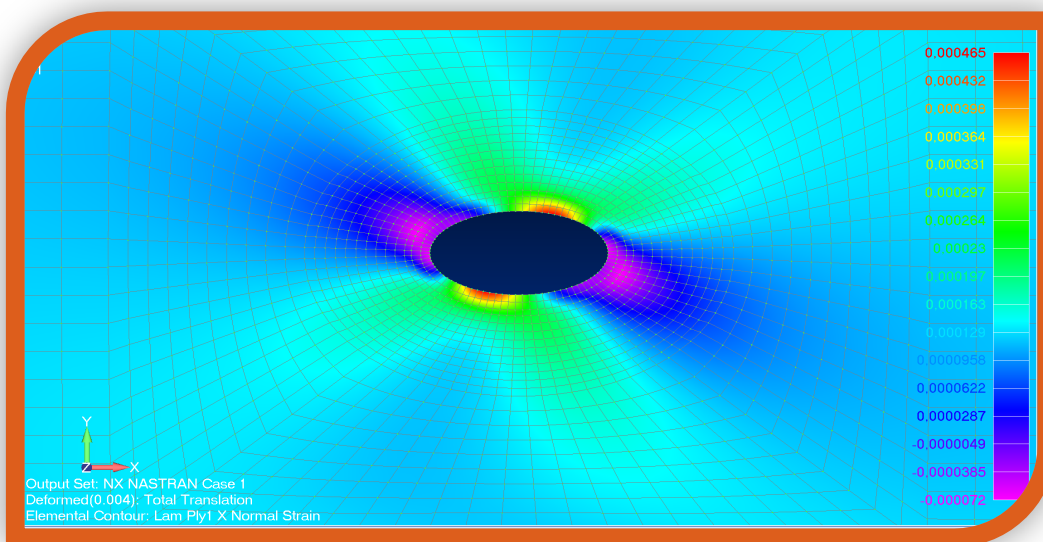


La modellizzazione del carico è stata realizzata tenendo sempre presente la fisica della prova reale, la pressa che trasla, quindi è stato realizzato un carico mediante un collegamento rigid-body sui nodi selezionati:



Una volta preparato tutto il modello agli elementi finiti, è possibile lanciare l'analisi e andare a visualizzare i dati di nostro interesse.

Si è mostrato il *contour* della lamina 1 che si analizzerà nella seguente immagine:



CONFRONTO DATI TRA MODELLO NUMERICO E SPERIMENTALE

In seguito alle due prove eseguite, è stato fatto il confronto tra i dati di output. Per selezionare dati dello stesso caso è stato necessario confrontare i dati della prova sperimentale, relativi alla posizione in cui era posto l'estensimetro triassiale; con i dati della prova numerica riferenti all'elemento ID 3644, riferente alla ply più esterna del laminato, orientata a -45° .

Data la linearità della prova condotta, ci troviamo in campo elastico lineare, andremo a confrontare solamente l'ultima sequenza di carico applicata al provino reale con i dati in output al modello fem, quindi:

VALORI PROVA SPERIMENTALE					
CARICO (N)	CARICO(LB)	SPOSTAMENTO (mm)	ESTENSIMETRO 1 SG1	ESTENSIMETRO 2 SG2	ESTENSIMETRO 3 SG3
1525,6	342,83	0,072	129,2	296,6	115,0

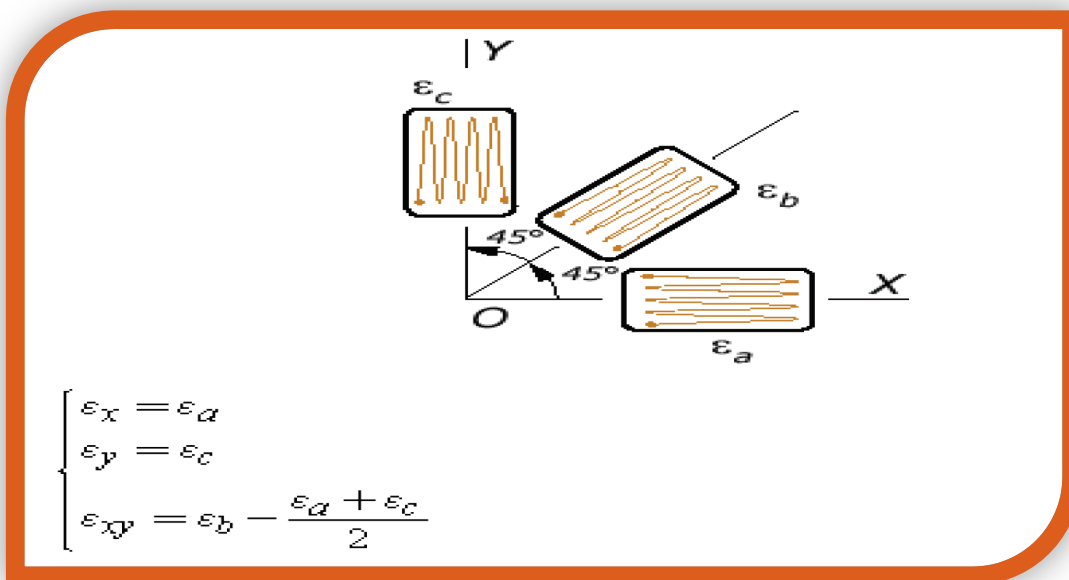
È emerso dall'analisi dell'elemento ID 3644 (il centro di tale elemento corrisponde al punto nominale in cui è stato applicato l'estensimetro) che:

VALORI PROVA NUMERICA					
CARICO (N)	CARICO(LB)	SPOSTAMENTO (mm)	X NORMAL STRAIN PLY 1 = DIREZIONE DELL' ESTENSIMETRO 1	XY SHEAR STRAIN PLY 1 = DIREZIONE DELL' ESTENSIMETRO 2	Y NORMAL STRAIN PLY 1 = DIREZIONE DELL' ESTENSIMETRO 3
1525,6	342,83	0,051	147,62	307,94	147,62

Per comparare i dati si è dovuto tenere presente che le misure estensimetriche sono misure lungo direzioni sfalsate di 45° . Quindi così per com'è stata realizzata la prova sperimentale i valori misurati provenienti dall'estensimetro 1 possono essere comparati direttamente al valore emesso in output dal fem col nome di *x normal strain*; analogo discorso per la comparazione dell'estensimetro lungo la direzione 3 con il valore plottato in output dal fem col nome di *normal strain*.

Per il confronto del valore misurato dall'estensimetro lungo la direzione 2 con il valore emesso in output dal fem, si è reso necessario convertire la misura data dall'estensimetro 2 in scorrimento angolare in forma ingegneristica.

Al fine di ottenere tale risultato è stato utilizzato lo schema riportato nella figura sottostante:



Solo dopo l'ultima conversione in formato di scorrimento angolare ingegneristico è stato possibile confrontare i due scorrimenti ingegneristici (il femap emette dati di output in forma ingegneristica).

CONVERSIONE MISURA ESTENSIMETRICA IN DEFORMAZIONE INGEGNERISTICA		
VALORE MISURATO	DEF. TENSORIALE	DEF. INGEGNERISTICA
296,6	174,5	349

È stato riportato quindi per comodità tutto in un'unica tabella:

CONFRONTO					
CARICO	SPOSTAMENT O (MM)	X NORMAL STRIAN	XY NORMAL STRAIN	Y NORMAL STRAIN	
1525,6 N = 342,8 LB	0.072	129,2	349	115,0	SPERIMENTALE
1525,6 N = 342,8 LB	0.051	147,6	307,9	147,6	NUMERICA
	41	14	12	28	ERRORE (%)

Dal confronto dei dati è emersa una discreta qualità del modello numerico con quello reale, è tuttavia possibile applicare delle correzioni al caso per cercare di migliorarne la qualità e quindi la fiducia che si può riporre nel modello.

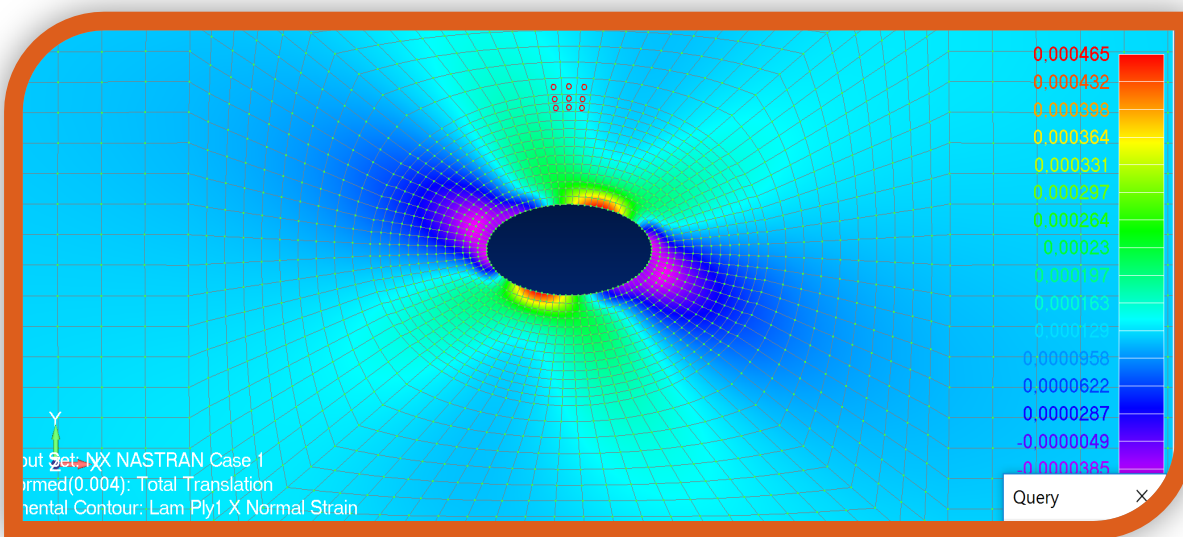
RIDUZIONE DEGLI ERRORI

Dal confronto dei dati si può notare come in ogni direzione il solutore fem tende sempre a sovrastimare i valori ottenuti dalla prova sperimentale.

Si cercherà di condurre un'indagine sulle possibili cause che hanno prodotto queste discordanze dei dati nel tentativo di pervenire a un modello più accurato.

Potrebbe essere successo che la disposizione dell'estensimetro sia avvenuta in una posizione che non sia perfettamente confrontabile con la posizione dell'elemento che si è scelto per condurre la prova sperimentale. Perseguendo l'obiettivo si cercherà di prendere in considerazione valori mediati provenienti dagli elementi di mesh confinanti quello analizzato.

Si vede dalla seguente immagine quali sono gli elementi considerati per la nuova acquisizione:



nella tabella sono stati riportati gli identificativi degli elementi considerati

4673	4674	4675
3643	3644	3645
3664	3665	3666

Producendo una media aritmetica di tutti i valori considerati per le tre direzioni sono state prodotte le seguenti misure:

VALORI PROVA NUMERICA					
CARICO (N)	CARICO(LB)	SPOSTAMENTO (mm)	X NORMAL STRAIN PLY 1 = DIREZIONE DELL' ESTENSIMETRO 1	XY NORMAL STRAIN PLY 1 = DIREZIONE DELL' ESTENSIMETRO 3	Y SHEAR STRAIN PLY 1 = DIREZIONE DELL' ESTENSIMETRO 2
1525,6	342,83	0,051	147,39	407,32	147,39

Si è riproposto il confronto in termini di errore percentuale tra la misura sperimentale e quella numerica aggiornata con i valori mediati:

CONFRONTO					
CARICO	SPOSTAMENT O (MM)	X NORMAL STRIAN	XY NORMAL STRAIN	Y NORMAL STRAIN	
1525,6 N = 342,8 LB	0.072	129,2	349	115,0	SPERIM.
1525,6 N = 342,8 LB	0.051	147,4	407,3	147,4	NUMERICA
	41	14	17	28	ERRORE (%)

Si evince come l'introduzione di un valore mediato non ha contribuito alla riduzione dell'errore, si indagherà pertanto nella ricerca di una nuova causa che potrebbe aver generato questo scostamento di errore.

Un altro modo di ricerca dell'errore potrebbe essere dato dai moduli elastici errati presenti all'interno del modello fem, infatti, sono stati stimati dalla micromeccanica e quindi su tali valori potrebbe essere presente un'incertezza. Se a parità di carico andremo a modificare i valori dei moduli elastici, allora potremo pensare di giungere a delle deformazioni quasi comparabili con quelle ottenute nella prova sperimentale.

Bisogna considerare, però, che una modifica del modulo elastico E_1 comporterà inevitabilmente una modifica del comportamento del materiale lungo la direzione della matrice, così come anche una modifica del modulo elastico E_2 comporterà una modifica del comportamento del materiale lungo la direzione della fibra, le modifiche prodotte daranno degli effetti incrociati.

Nella seguente schermata sono riportati i valori per cui i moduli elastici sono stati modificati:

MODULO E_1 (PSI)	MODULO E_2 (PSI)	MODULO G_{12} (PSI)	
21756000	1189310	580151	SPERIMENTALE
26107200 (+20%)	1308241 (+10%)	580151	NUMERICO

Sono stati confrontati i valori delle deformazioni tra il caso sperimentale e quello numerico modificato:

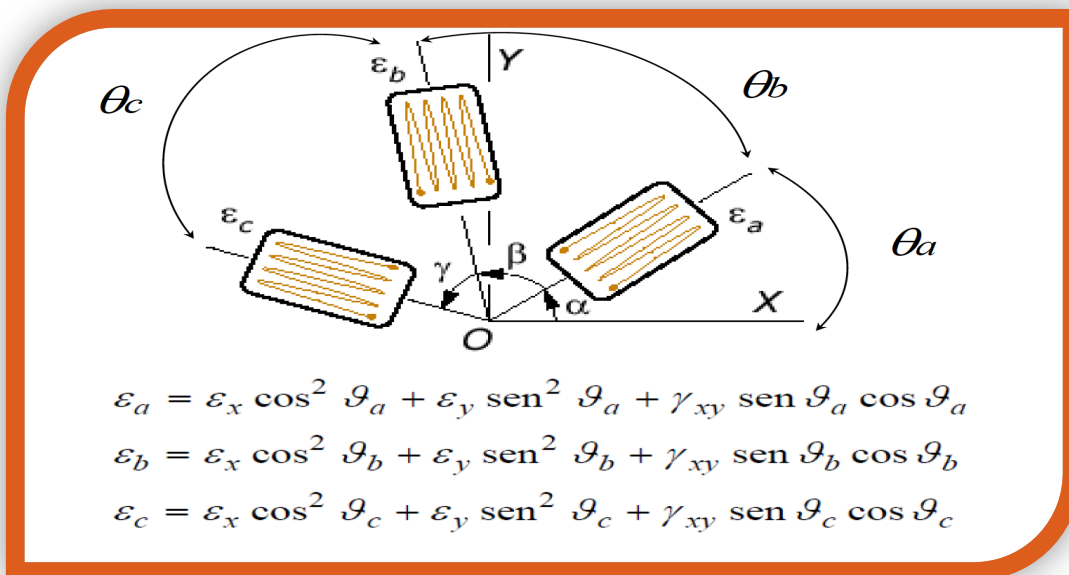
X NORMAL STRAIN	XY SHEAR STRAIN	Y NORMAL STRAIN	
129,2	349	115,0	SPERIMENTALE
124,7	400	124,7	NUMERICO
-3,4	+12,7	+8,4	ERRORE (%)

Come mostrato, al variare dei moduli elastici, si sono ottenuti dei valori delle deformazioni tali che lungo la direzione x si è ottenuto un valore sottostimato rispetto al reale comportamento del materiale, viceversa per le altre due direzioni.

Si evince come modificando i valori dei moduli elastici si sono ottenuti valori dell'errore inferiori al di sotto del 10% per le deformazioni lungo le x normal strain e le y normal strain, mentre per la deformazione lungo la xy si è ottenuto un errore sotto il 15%.

Perseguendo l'obiettivo della ricerca dell'errore si è pensato di supporre che le misure fornite dall'estensimetro, non siano perfettamente centrate sulle direzioni delle fibre e quelle della matrice. Pertanto si è ipotizzato che l'estensimetro triassiale fosse collocato con una deriva rispetto alla direzione delle fibre di -5°.

Utilizzando la relazione riportata di seguito sono stati ricavati nuovi valori per le misure estensimetriche.



X NORMAL STRAIN (ϵ_a)	XY SHEAR STRAIN (ϵ_b)	Y NORMAL STRAIN (ϵ_c)
98	295	145

È stato quindi per comodità ripresentato il confronto in tabella tra le misure fornite dalla prova numerica e quelle ottenute dalla prova sperimentale modificata per il seguente caso.

CONFRONTO -5°				
CARICO	X NORMAL STRIAN	XY NORMAL STRAIN	Y NORMAL STRAIN	
1525,6 N = 342,8 LB	98	295	145	SPERIM. MOD.
1525,6 N = 342,8 LB	147,6	307,94	147,62	NUMERICA
	50	4,4	1.8	ERRORE (%)

Come si evince dalle misure estensimetriche appena ricavate si può notare come l'idea di ruotare di 5° tutto il blocco estensimetrico non restituisca valori corretti, infatti, se verso una direzione il valore si avvicina di molto a quello ottenuto in fase numerica, si nota come nella direzione fibra si ottengono dei risultati scadenti.

Quindi si è supposto che le griglie estensimetriche non fossero ruotate perfettamente di 45°.

Un'ulteriore ricerca che andremo a fare sarà quella di ricercare la corretta posizione angolare tra le varie direzioni dei tre estensimetri che potrebbero essere sfalsate rispetto ai 45° nominali.

Abbiamo visto che sfalsando gli angoli delle direzioni degli estensimetri di qualche grado rispetto alle direzioni nominali, si hanno dei valori delle deformazioni prossimi a quelli numerici.

Più precisamente si è scelto di considerare la prima direzione dell'estensimetro ruotata di 3° rispetto a quella nominale, la seconda ruotata a 40° rispetto a quest'ultima, infine la terza direzione ruotata di 45° rispetto alla seconda direzione.

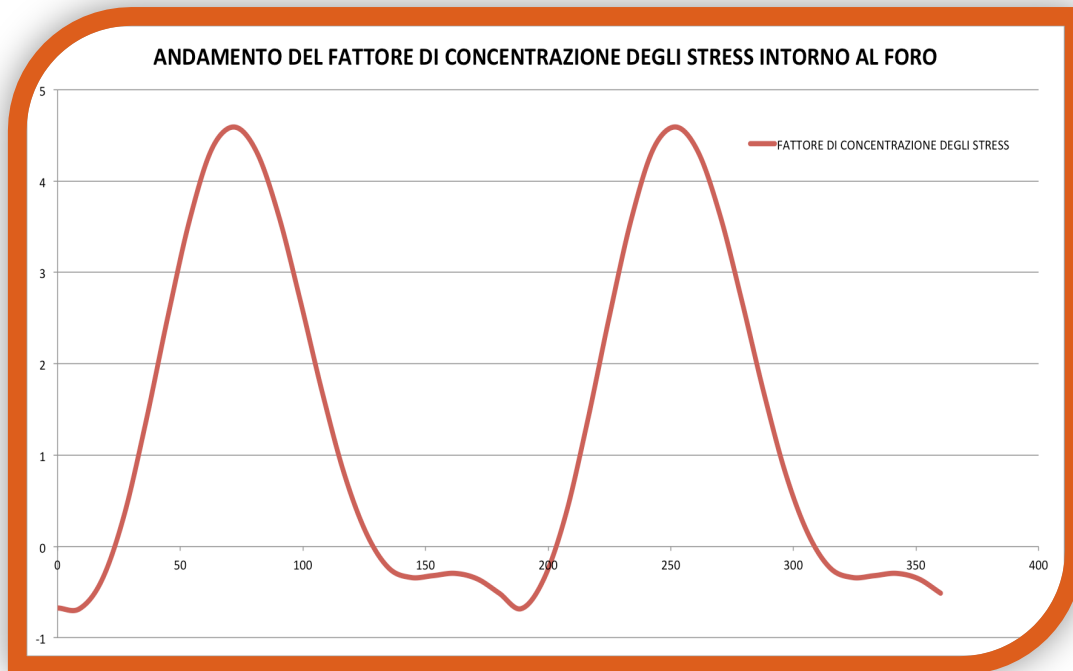
X NORMAL STRAIN (ϵ_a) 3° rispetto ai 0° nominali	XY SHEAR STRAIN (ϵ_b) -2° rispetto ai 45° nominali	Y NORMAL STRAIN (ϵ_c) -5° rispetto ai 90° nominali
147,40	297	145,50

È stato quindi ripresentato il confronto in tabella tra le misure fornite dalla prova numerica e quelle ottenute dalla prova sperimentale modificata per il seguente caso.

CONFRONTO 3°/-2°/-5				
CARICO	X NORMAL STRAIN	XY NORMAL STRAIN	Y NORMAL STRAIN	
1525,6 N = 342,8 LB	147,40	297	145,50	SPERIM. MOD.
1525,6 N = 342,8 LB	147,6	307,94	147,62	NUMERICA
	0.1	3.6	1.4	ERRORE (%)

ANDAMENTO DEL FATTORE DI CONCENTRAZIONE DEGLI STRESS INTORNO AL FORO

Si è tracciato l'andamento del fattore di concentrazione degli stress intorno al foro per tale provino, e quindi per tale sequenza di laminazione, riscontrando un adeguato incremento degli stress intorno al foro, infatti il fattore non supera mai il valore di circa 4,5.



A rigore avremmo dovuto produrre 3 grafici uno per ogni stato tensionale caratteristico (direzione della fibra, della matrice e taglio), si è scelto però di rappresentare solamente quello più rappresentativo, ovvero quello che rappresenta lo stato tensionale maggiore.