

Università degli studi di Napoli Federico II



Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Ingegneria Strutturale

Università degli studi di Pavia



Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Meccanica Strutturale

In collaborazione con  
Centro di Simulazione Numerica Avanzata – CeSNA  
Istituto Universitario di Studi Superiori

*SEMINARIO:*

# **SIMULAZIONE NUMERICA DI PROVE DI IMPATTO SU LAMINATI IN VETRORESINA**

**Ing. Costantino Menna**

PhD student, Dipartimento di Ingegneria Strutturale

Università degli studi di Napoli Federico II

**Ing. Domenico Asprone**

PhD, Dipartimento di Ingegneria Strutturale

Università degli studi di Napoli Federico II

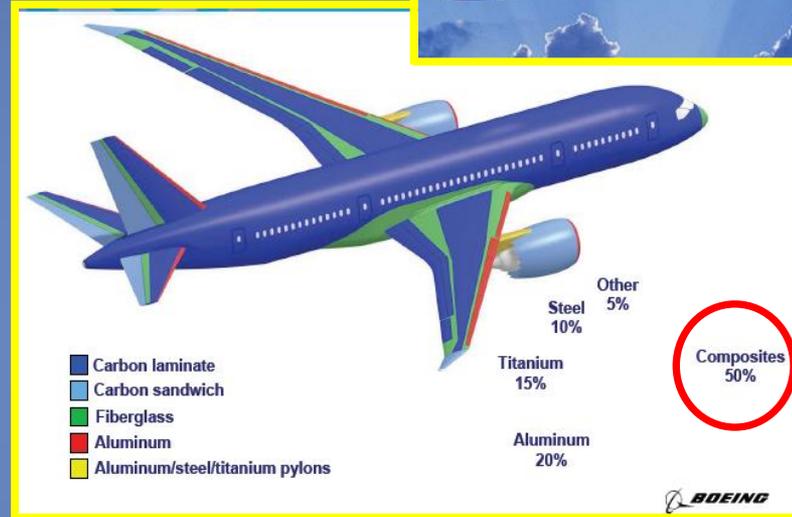
***Giovedì 6 Maggio 2010***

# COMPOSITI ED IMPATTO

**MATERIALI COMPOSITI:** materiali ad alte prestazioni



Proprietà meccaniche **specifiche** elevate  
→ riduzione di peso



**VULNERABILITA'** all'**IMPATTO**  
legata alla natura del materiale



Danni consistenti a bassi livelli  
di energia di impatto

**Vita di esercizio:** carichi accidentali in opera, crash di frammenti e particelle  
di ghiaccio, fenomeno del birdstrike ecc.



**IMPORTANZA DELLO STUDIO** in ambito progettuale

# CLASSIFICAZIONE DELLE TIPOLOGIE DI IMPATTO

**IMPATTO** → PROPAGAZIONE DI ONDE DI SOLLECITAZIONE → DURATA DEL FENOMENO



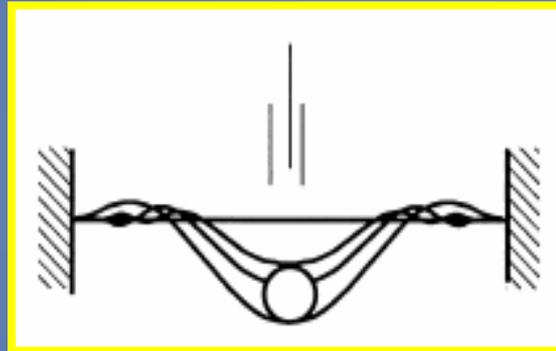
RISPOSTA DINAMICA DELLA STRUTTURA

Regime **ALTA VELOCITA'**

Durata  $\approx T$  dell'onda



Danno fortemente localizzato

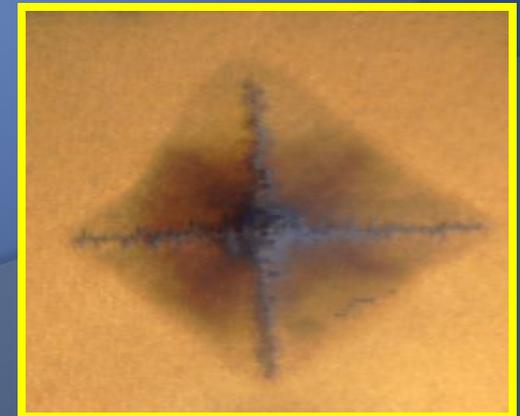
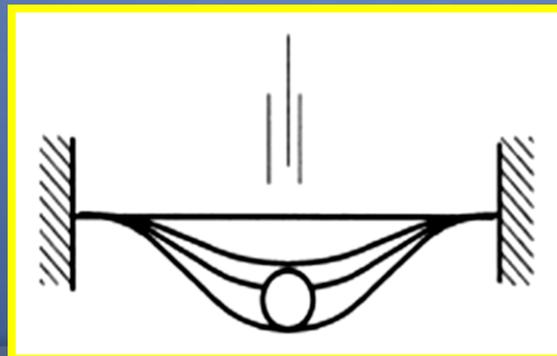


Regime **BASSA VELOCITA'**

Durata  $\gg T$  dell'onda



Danno esteso

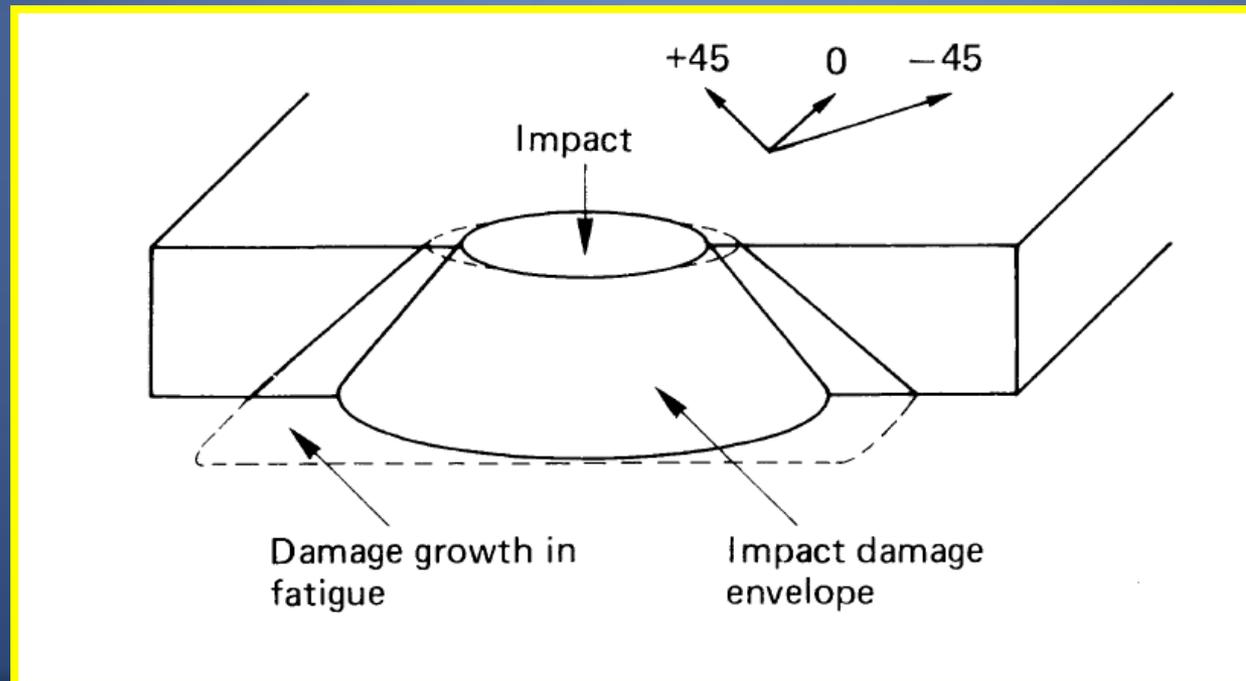


# DANNI DA IMPATTO A BASSA VELOCITA'

Danno nei **METALLI** → dissipazione di energia mediante deformazione **plastica**

Danno nei **COMPOSITI** → natura **eterogenea** → meccanismi di **danneggiamento**

Il danno da impatto nel composito sottoposto a impatti a bassa velocità si concentra in un certo volume, detto **ZONA DI INFLUENZA**:

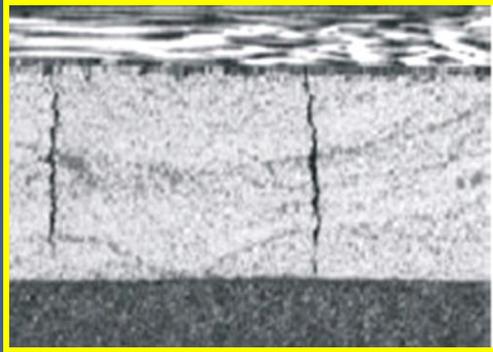


# DANNI DA IMPATTO A BASSA VELOCITA'

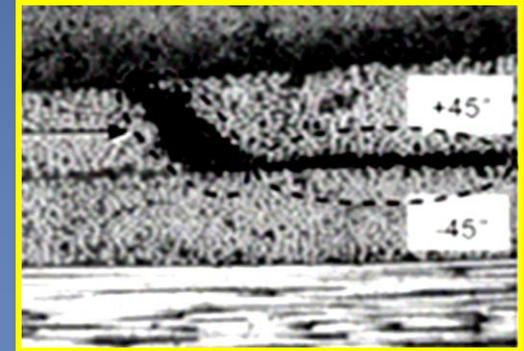
E limite

Energia di impatto

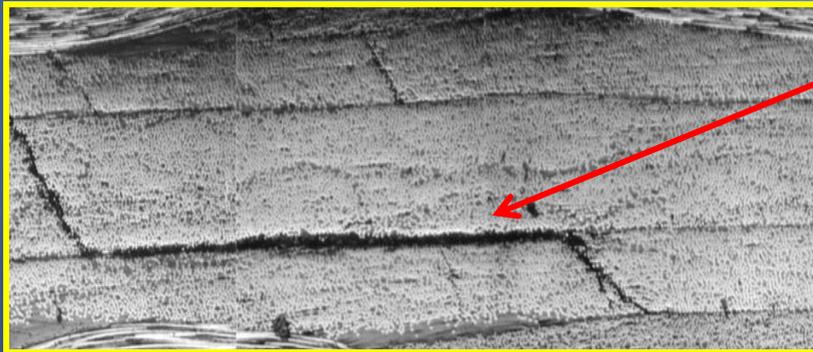
## 1) Danneggiamento **INTRALAMINARE**



Fratture **NORMALI/TAGLIANTI** nella matrice



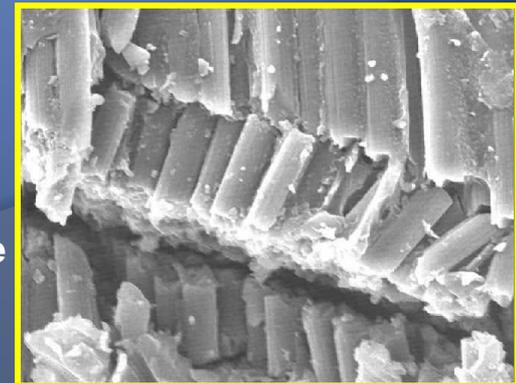
## 2) Danneggiamento **INTERLAMINARE**



**DELAMINAZIONI**

Crescita:  $\sigma_{13}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{23}$

## 3) Rottura delle **FIBRE** e **PENETRAZIONE** del percussore



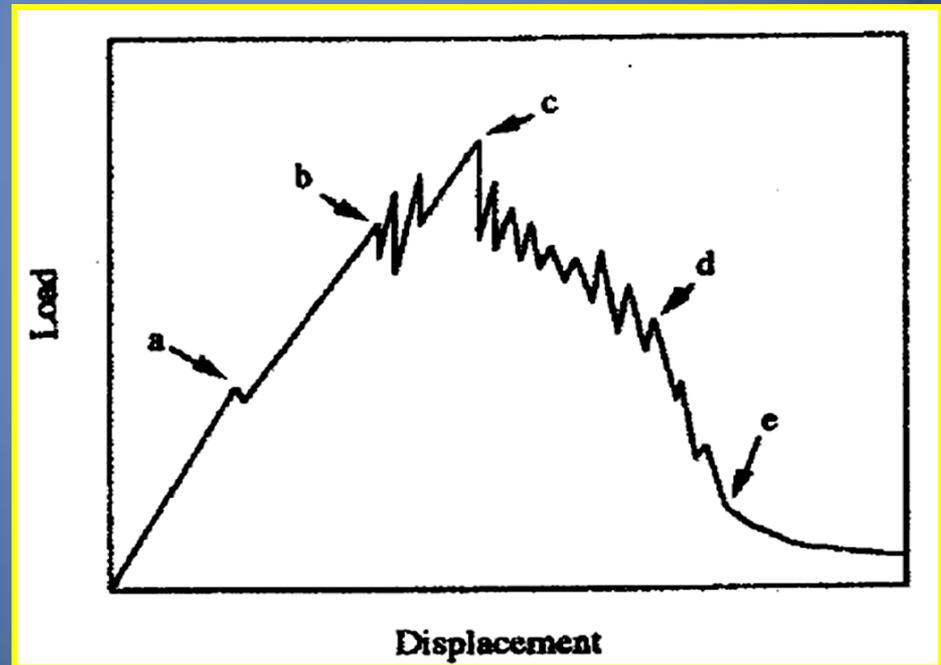
# CURVA DI IMPATTO

→ la storia dell'urto è ricostruita attraverso la curva **FORZA-SPOSTAMENTO**

→ i modi di rottura si riflettono nell'andamento della curva **F vs S**

Curva a completa penetrazione

- a**: Inizio delaminazione
- b-c**: Inizio cedimento fibre
- c**: Forza massima
- d**: Rotture di fibre negli strati –  
Energia di perforazione
- d-e**: Perforazione totale



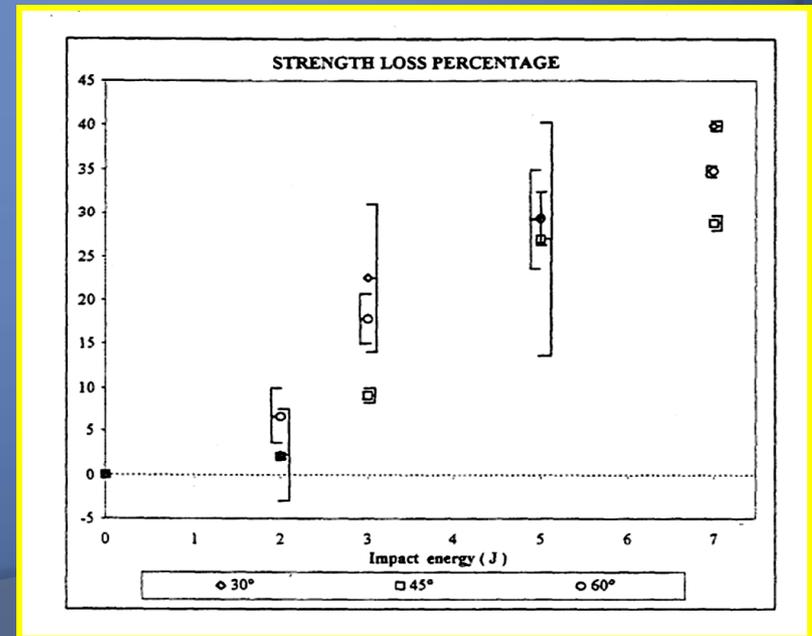
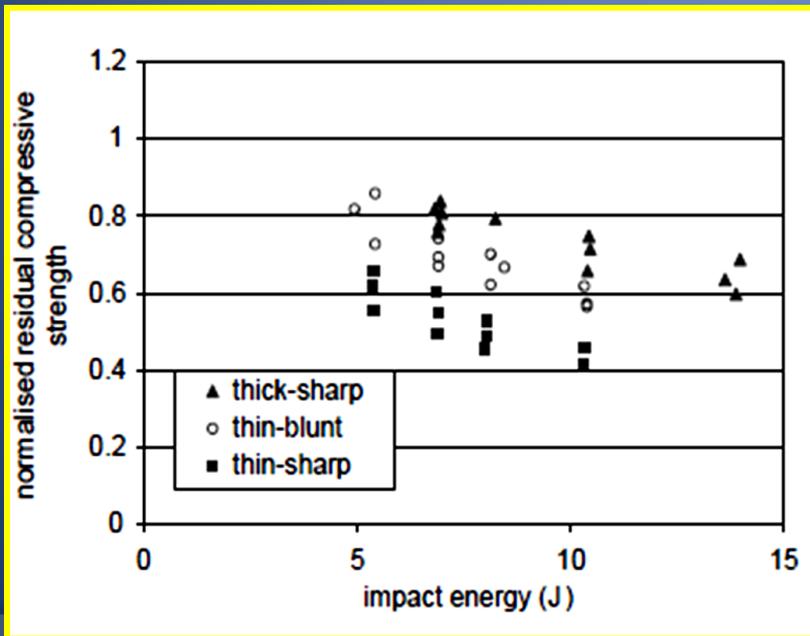
# RESISTENZA RESIDUA POST - IMPATTO

## IMPORTANZA DELLO STUDIO DI IMPATTO

Danno “nascosto” → Quantificare il danno → dipendenza dall’energia



Valutazione modellazione delle proprietà meccaniche residue AI (after impact) allo scopo di comprendere l’effettiva **capacità portante** di una struttura che ha subito fenomeni di tal genere → **BVID**



# OBIETTIVI

MODELLARE IL FENOMENO IN BASE A PROVE SPERIMENTALI



COSTRUZIONE MODELLO FEM → CODICE LS DYNA



**PREVISIONE**



CURVA FORZA-SPOSTAMENTO

MODI DI ROTTURA INTERNI



parametri caratteristici



previsione della geometria,  
entità del danno



**CONFRONTO NUMERICO SPERIMENTALE**  
qualitativo - quantitativo

# MATERIALI E PROVE DI RIFERIMENTO

## ➤ MATERIALI

GFRP rinforzato con *tessuto* di fibre di vetro (295 g/m<sup>2</sup>) a base di resina epossidica (CYCOM 7701 Epoxy Resin)

rinforzo fibroso di tipo *tessuto* (0;90) costituito da fibre di vetro E stile (7781)



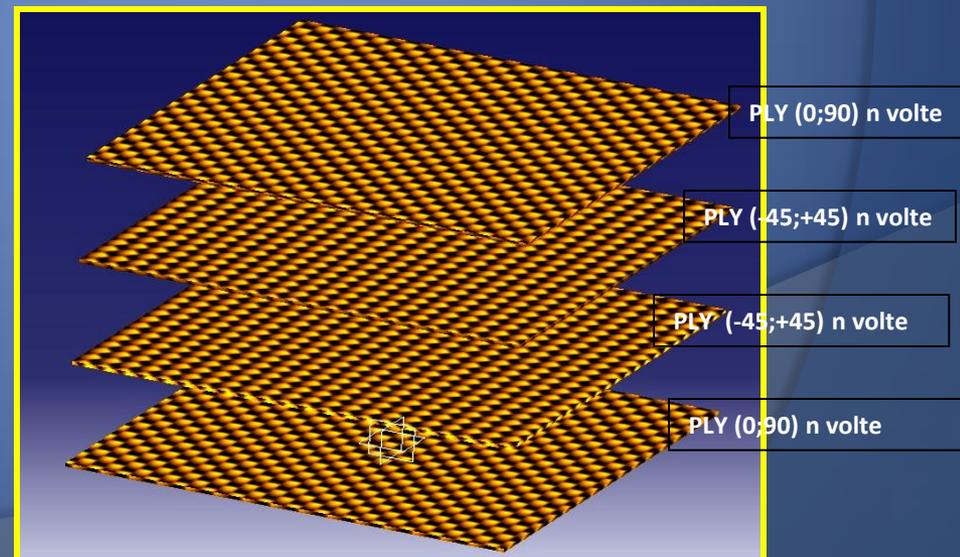
## sequenza di LAMINAZIONE

$[(0;90)_n/(-45;+45)_n/(-45;+45)_n/(0;90)_n]$

spessore singola lamina: 0,24 mm

n=1, 2 → spessori provini 1,2 mm

Provini quadrati: 70 x 70 mm



# MATERIALI E PROVE DI RIFERIMENTO

## ➤ MACCHINA DI PROVA

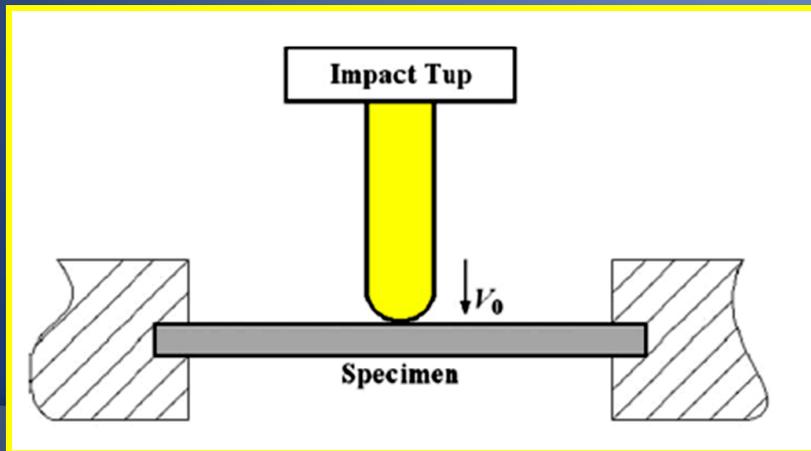
Prove di impatto con carico dinamico

Macchina: Ceast Fractovis

Massa e diametro del penetratore variabili

$d = 16 \text{ mm}$

Diametro del supporto circolare: 50 mm



Energie di prova:  $U = mgh$

Range di energia considerato

**0,41J-8,3J**

*Regime di bassa velocità, no penetrazione*

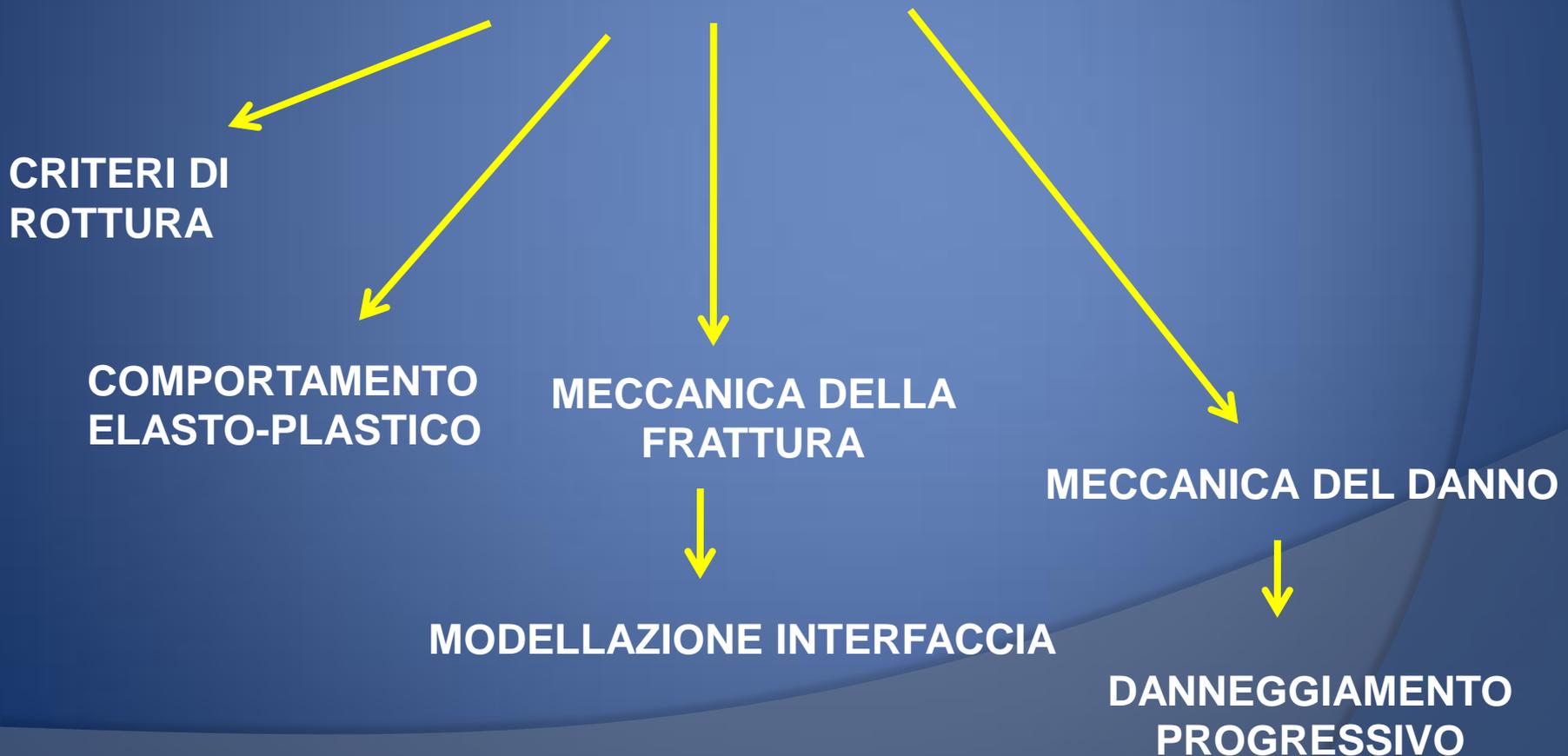
# MODELLI PER LO STUDIO DELL'IMPATTO

Metodologia completa e validata per lo studio dell'impatto:  
il processo di modellazione dell'intero evento di impatto su materiali compositi  
presenta numerosi **ASPETTI CRITICI**

- **NATURA ETEROGENEA** → FIBRA /MATRICE → POSSIBILI INTERAZIONI  
→ SCALA DI GRANDEZZA
- **EVENTO DINAMICO** → CONOSCENZA DELLA RISPOSTA DEL  
MATERIALE E EFFETTI DELLA VELOCITA' DI APPLICAZIONE DEL CARICO
- **DIFFERENTI MECCANISMI DI DANNO** → COSTITUENTI → POSSIBILI  
INTERAZIONI → ENERGIA DISSIPATA
- **COMPORTAMENT POST-ELASTICO** → POSSIBILI NON LINEARITA' →  
EVOLUZIONE DEI VARI TIPI DI DANNO → DEGRADAZIONE PROPRIETA'  
DI RIGIDEZZA DEL MATERIALE
- **DISTRIBUZIONE COMPLESSA DEL PATTERN DI DANNEGGIAMENTO** →  
DIFFICILE PREVISIONE DELLO STATO DI DEGRADAZIONE

# MODELLI PER LO STUDIO DELL'IMPATTO

- Approcci **ANALITICI** → soluzioni limitate a casi semplici
- Approcci **NUMERICI, METODO FEM** → superare le restrizioni dei modelli analitici



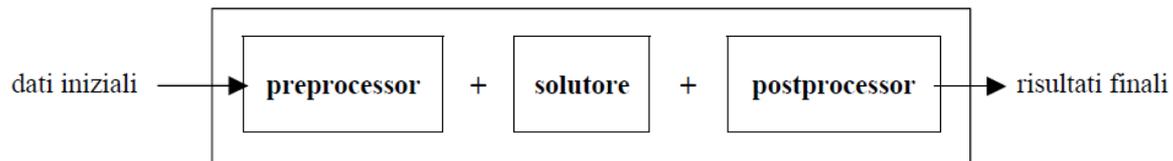
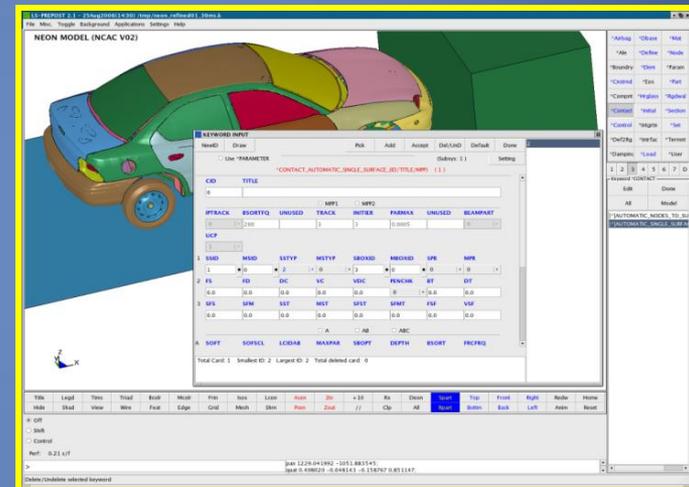
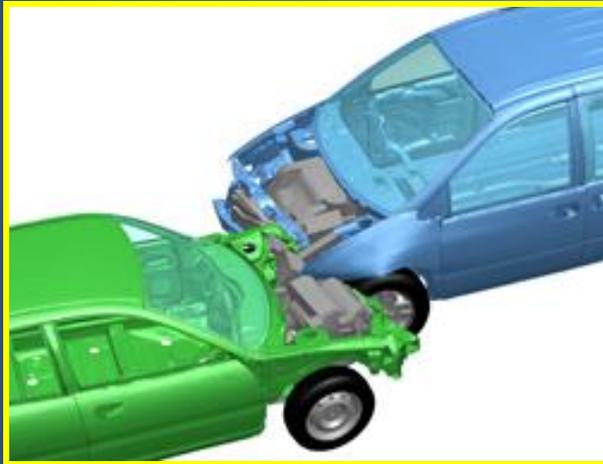
# IL CODICE LS DYNA

LS-DYNA , un codice di calcolo FEM di applicazione multidisciplinare (esplicito, implicito),

→ simulazione di fenomeni fisici altamente non lineari, grandi deformazioni ecc,

→ studio di fenomeni che si evolvono molto velocemente nel tempo: crash automobilistici,

→ vasta gamma di modelli di materiale e di contatto.



Il codice FEM

# COSTRUZIONE DEL MODELLO

Complessità intrinseca del problema → di ridurre il più possibile il grado di dettaglio geometrico del modello → le caratteristiche principali dei test di laboratorio sono state pienamente conservate → tempi di calcolo ragionevoli.

## ➤ MODELLAZIONE DEL PERCUSSORE

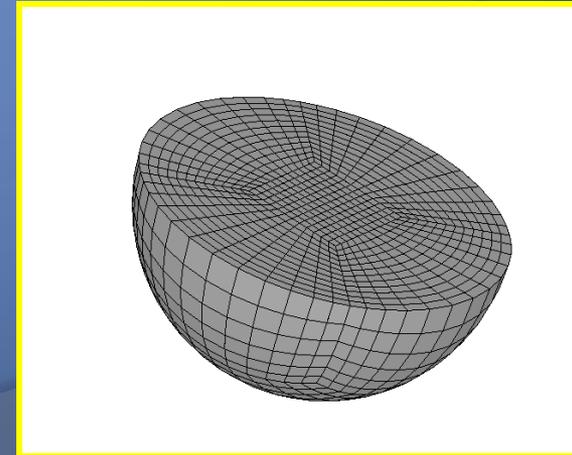
prova sperimentale: un unico corpo cilindrico solido, in acciaio, estremità emisferica, diametro di 16mm

Prova simulata: estremità emisferica a contatto con la superficie superiore del laminato.



Proprietà MAT\_RIGID - Percussore -

Densità	Variabile a seconda della prova	Kg/m <sup>3</sup>
Modulo elastico	210	GPa
Modulo di poisson	0.3	-



# COSTRUZIONE DEL MODELLO

## ➤ **MODELLAZIONE DELLE LAMINE: ambito FEM**

modellazione mediante elementi di tipo **shell** → i modi di rottura dovuti a sollecitazioni fuori dal piano della lamina e a sollecitazioni normali in direzione dello spessore vengono trascurati.



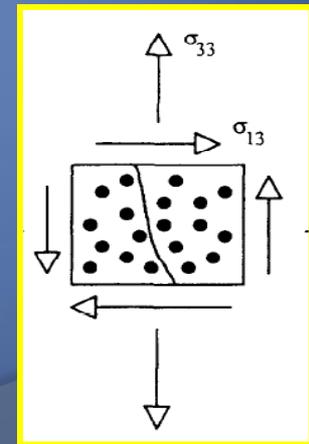
modellazione attraverso elementi di tipo **SOLIDO**.



Nei danni interlaminari, quali le delaminazioni, svolgono un ruolo rilevante proprio le sollecitazioni (sia di taglio che normali) nella direzione dello spessore



Modellazione più accurata e possibilità di prevedere l'intero pattern di danneggiamento



# COSTRUZIONE DEL MODELLO

## ➤ MODELLAZIONE DELLE LAMINE

### *Proprietà geometriche*

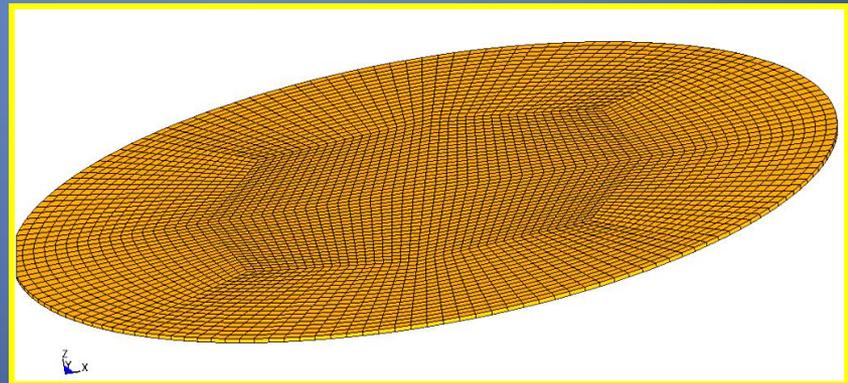
disco solido di diametro pari a 50mm, avente lo spessore di 0,24mm

1 elemento in direzione dello spessore dello spessore

### *Mesh*

160 elementi lungo la circonferenza

elementi approssimativamente di forma quadrata  $\approx 0,657\text{mm} \times 0,657\text{mm}$



# COSTRUZIONE DEL MODELLO

## ➤ MODELLAZIONE DELLE LAMINE

**Proprietà del materiale:** modelli a disposizione in LS Dyna



- Modelli shell, solidi;
- Capacità di modellare il comportamento ortotropo dei compositi → danneggiamento;
- Mat022 → criteri di rottura → lamine unidirezionali;
- Mat161 → meccanica del danno → licenza MSC → incremento tempo di calcolo;



## **MAT\_59 SOLID COMPOSITE FAILURE**

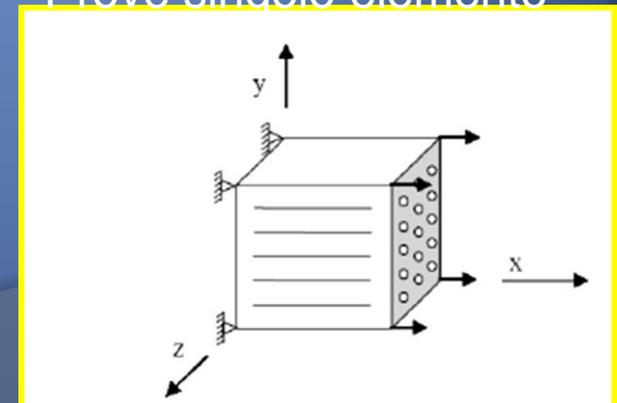
MODELLO SOLIDO

CRITERIO MASSIMA TENSIONE 3D

SCORRIMENTO PLASTICO

RAGIONEVOLE TEMPO DI CALCOLO

Prove singolo elemento



# COSTRUZIONE DEL MODELLO

## ➤ MODELLAZIONE DELLE LAMINE

*Proprietà del materiale richieste*

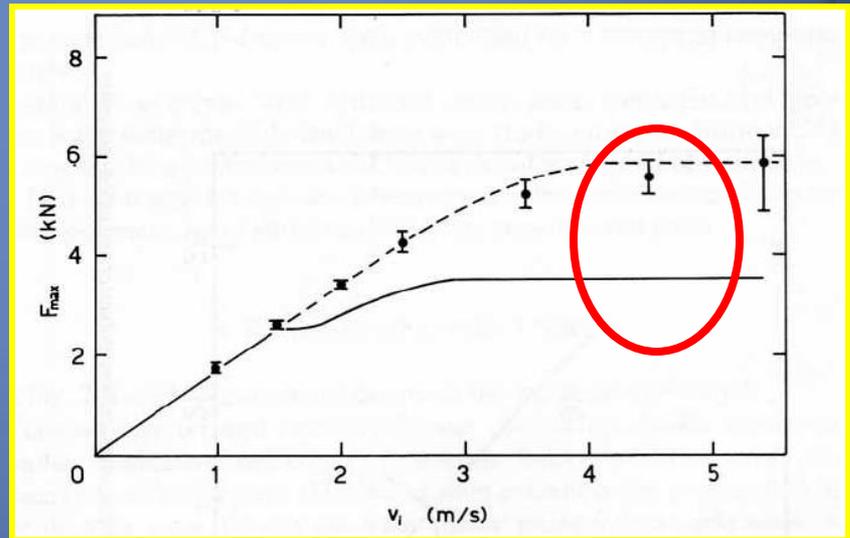
PROPRIETA' ELASTICHE: *MODULI ELASTICI*

RESISTENZE: *Trazione, Compressione, Taglio*  
- 3D -

Non tutti i dati richiesti sono forniti dal  
produttore

Effetto velocità di deformazione legato  
alle fibre di vetro: incremento fino al 70%  
rispetto a prove in regime quasi statico

Necessità di **calibrare** il modello  
Valori in letteratura e prove sperimentali



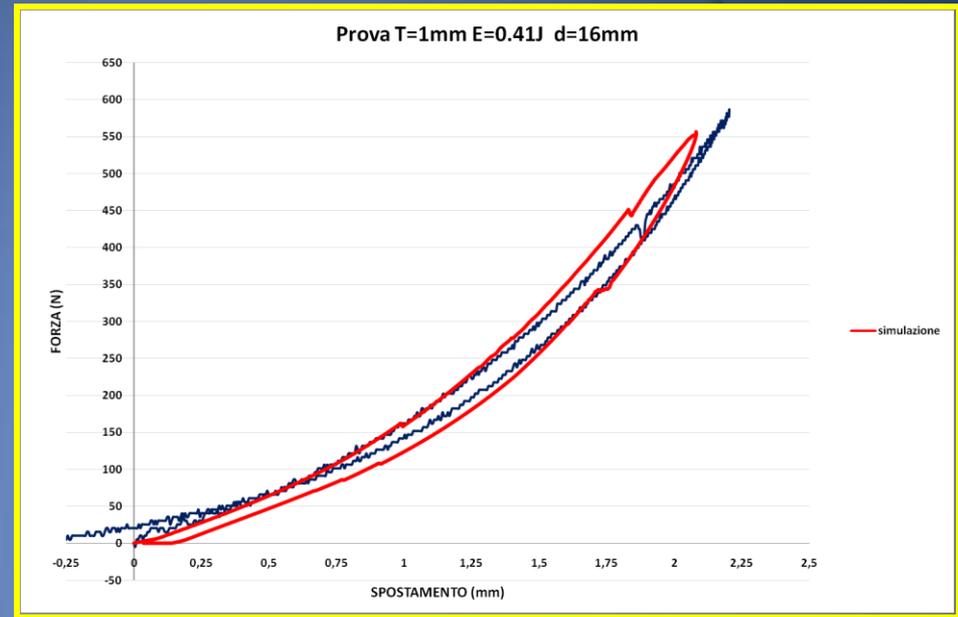
# COSTRUZIONE DEL MODELLO

## ➤ MODELLAZIONE DEI LAYER

Riferimento calibrazione:

Spessore 1mm

Energia 0,41J



Moduli Elastici	(GPa)	Moduli di Taglio	(GPa)	Moduli di Poisson	(-)
$E_1$	26	$G_{12}$	3.8	$\nu_{12}$	0.1
$E_2$	26	$G_{23}$	2.8	$\nu_{31}$	0.1
$E_3$	8	$G_{31}$	2.8	$\nu_{32}$	0.25

Trazione	(MPa)	Compression e	(MPa)	Taglio	(MPa)
$X_T$	850	$X_C$	720	$S_{12}$	105
$Y_T$	850	$Y_C$	720	$S_{31}$	65
$Z_T$	120	$Z_C$	500	$S_{32}$	65

Incremento rispetto ai valori presunti

**Resistenze trazione:** natura viscoelastica del rinforzo

**Resistenze a compressione:** stabilità contatto concentrato

# COSTRUZIONE DEL MODELLO

## ➤ MODELLAZIONE INTERFACCE

No elementi coesivi ma relazione di contatto puntuale:

**AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE\_TIEBREAK**

connessione basata su sollecitazioni di tipo normale e tagliante in relazione ai nodi delle lamine che vengono “legati” → proprietà di resistenza interlaminare del laminato

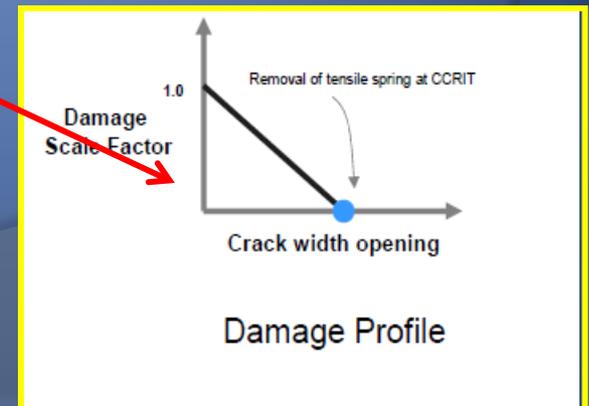
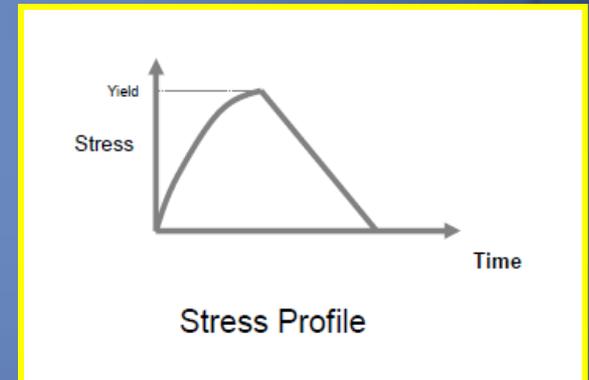
**criterio di rottura** 
$$\left(\frac{|\sigma_n|}{NFLS}\right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{SFLS}\right)^2 \geq 1$$

sollecitazione scalata linearmente fino a valore critico **CCRIT**

valori noti di resistenza interlaminare (Fase di calibrazione)

$$NFLS = 35 \text{ Mpa}$$

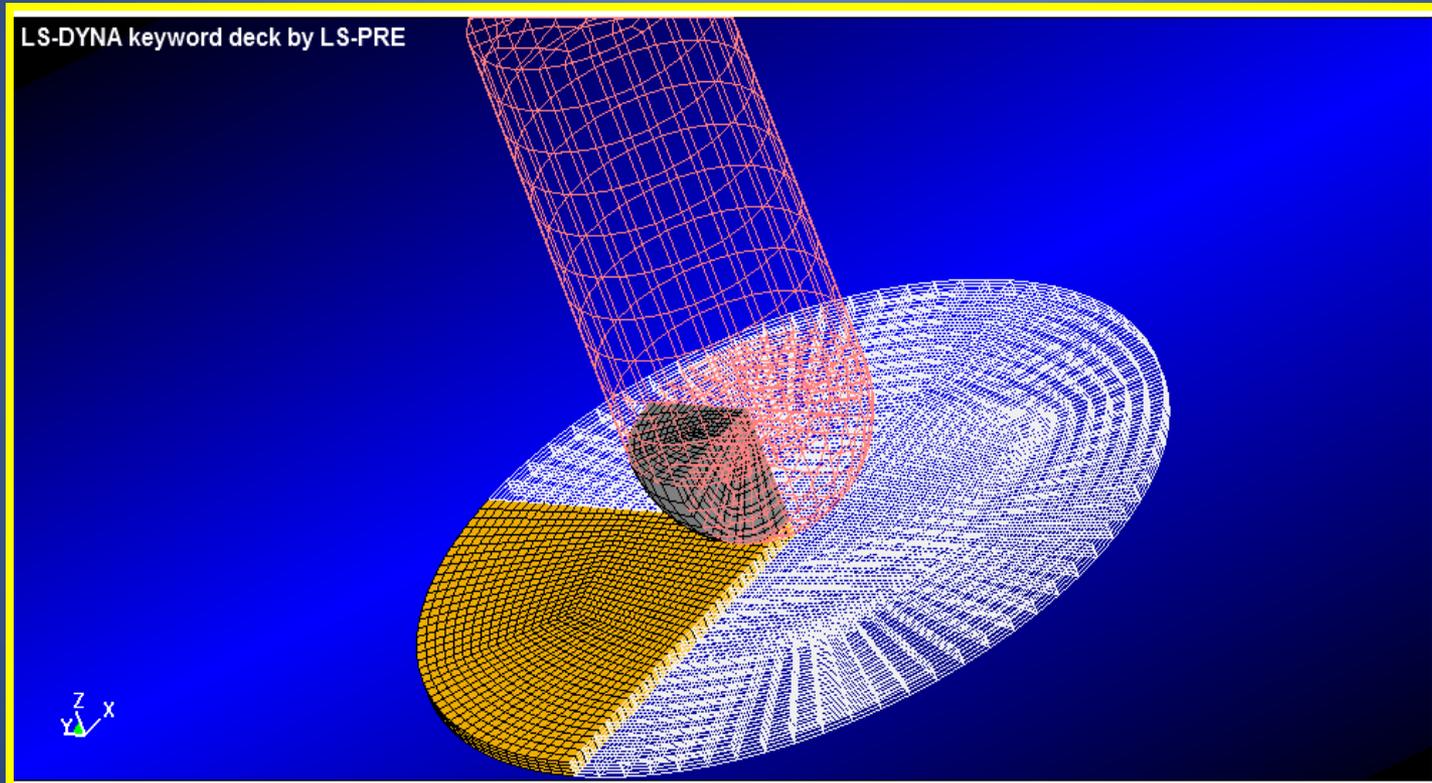
$$SFLS = 65 \text{ MPa}$$



# COSTRUZIONE DEL MODELLO

## ➤ CONDIZIONI DI SIMMETRIA

Il problema in esame presenta delle proprietà di simmetria

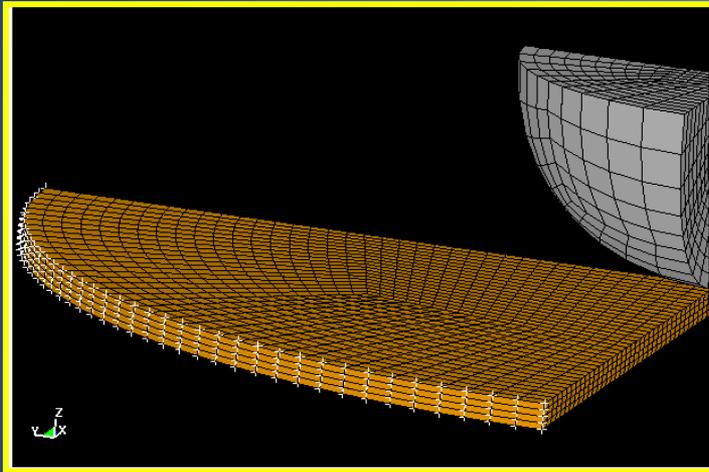


**POSSIBILITA' DI ANALIZZARE UN  
QUARTO DELL'INTERO SISTEMA**

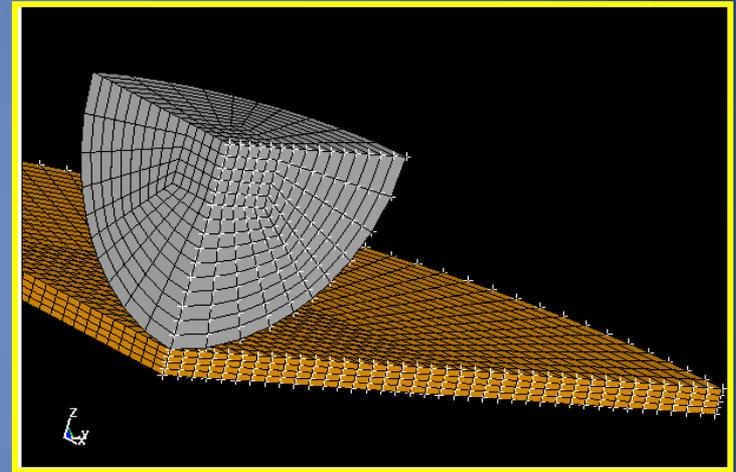
# COSTRUZIONE DEL MODELLO

## ➤ CONDIZIONI A CONTORNO

### Vincoli di afferraggio



### Vincoli di simmetria



**Velocità iniziale** → non elevata → vibrazioni evidenti → instabilità e oscillazioni output dei dati.

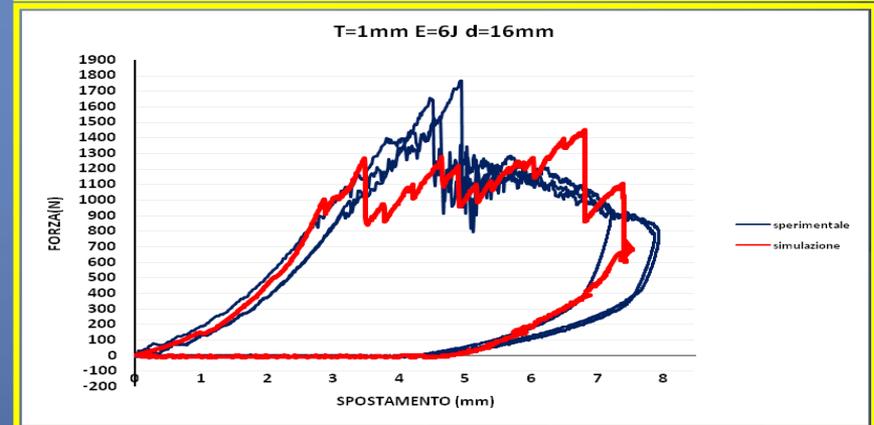
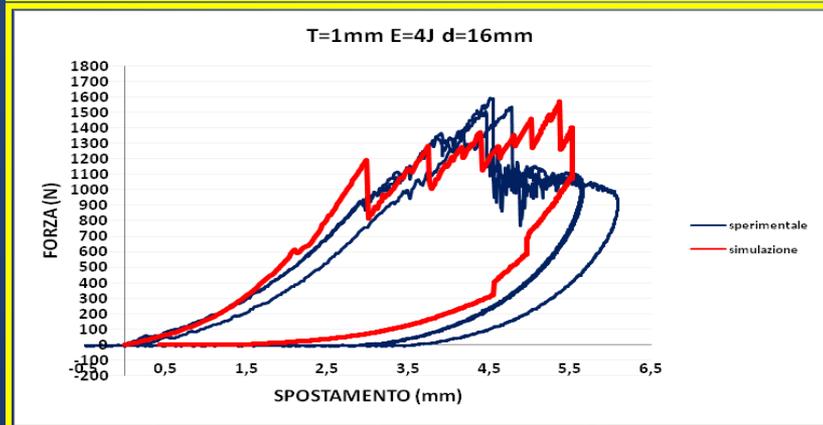
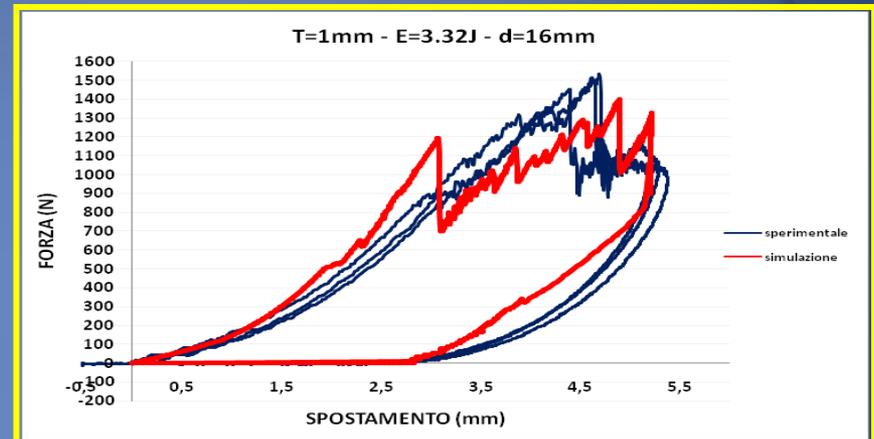
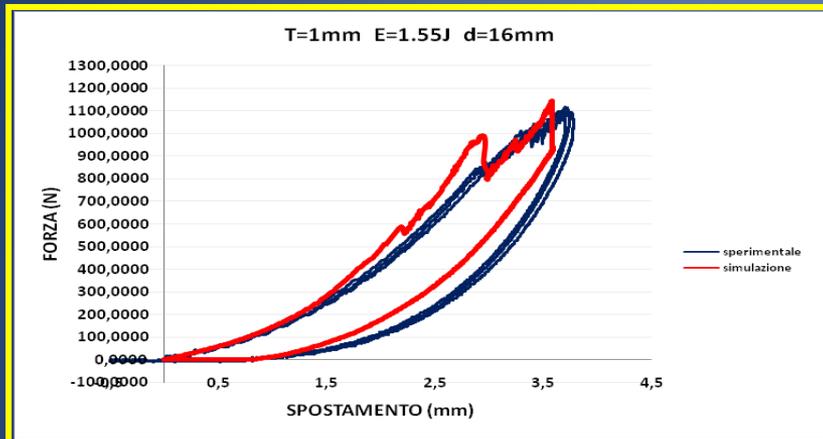
**Energia iniziale** → associata alla densità del percussore  $\rho_{perc} = \frac{3E_i}{\pi R_{sf}^3 v_0^2}$

**Analisi** → tempo di calcolo ragionevole: 2h – 8h, processore 8 core

# CONFRONTO NUMERICO-SPERIMENTALE

## Analisi diagrammi Forza vs Spostamento

### SPESSORE 1mm



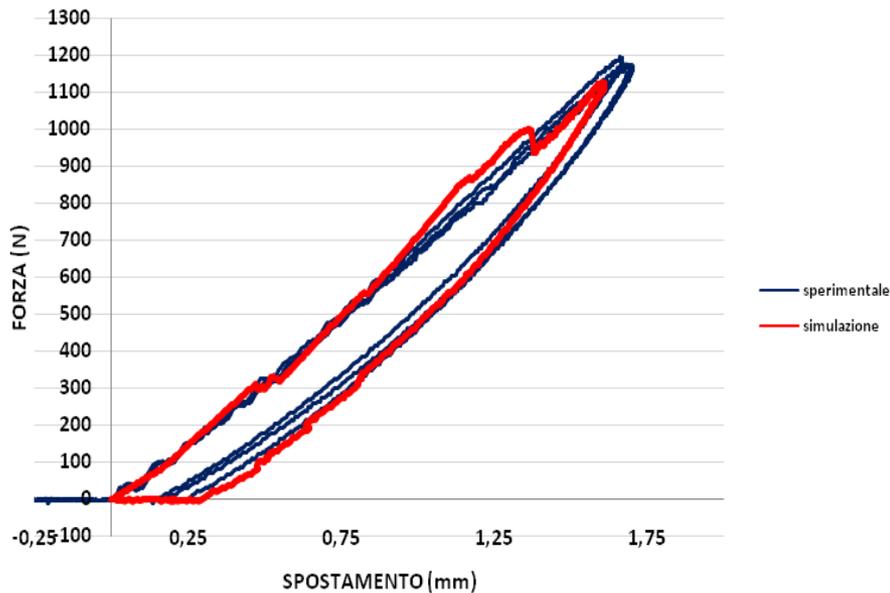
curva di carico ben approssimata; buona riproduzione della forma della curva;  
differenze legate al modello di materiale.

# CONFRONTO NUMERICO-SPERIMENTALE

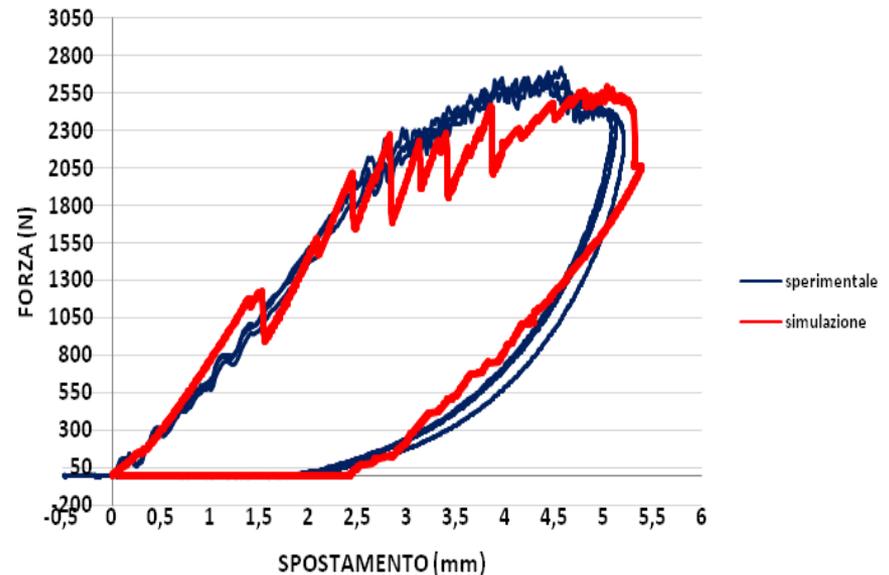
## Analisi diagrammi Forza vs Spostamento

### SPESSORE 2mm

T=2mm E=0,9J d=16mm



T=2mm E=8.3J d=16mm - SPERIMENTALE -



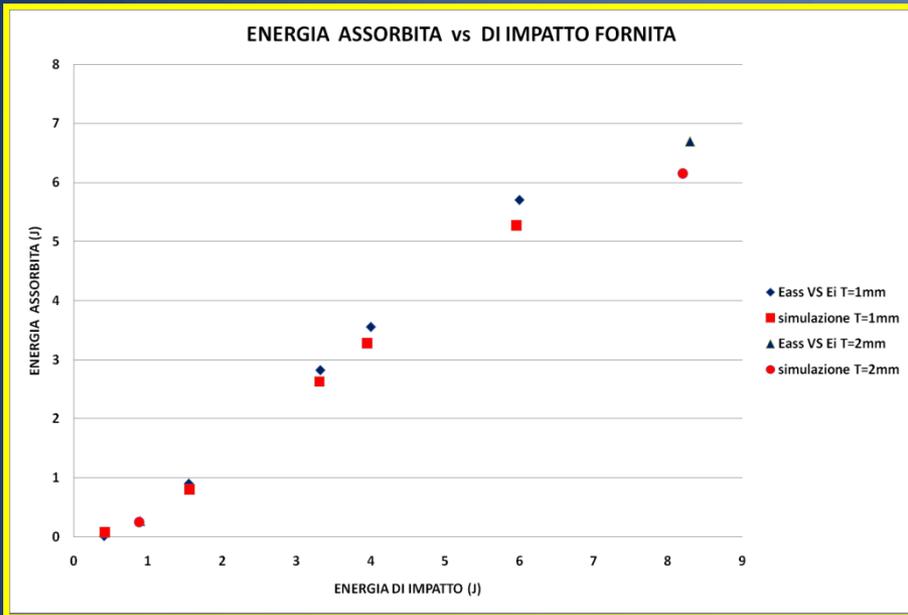
Stessi parametri dello spessore 1mm;

No ulteriore calibrazione;

curva ben approssimata;

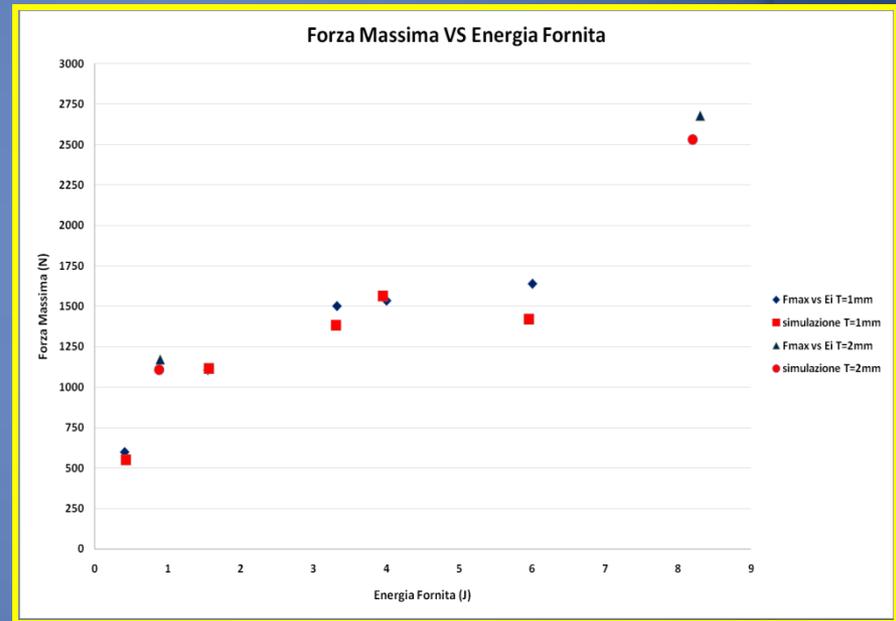
# CONFRONTO NUMERICO-SPERIMENTALE

*Analisi diagrammi Energia assorbita e Fmax vs Energia fornita*



Buona corrispondenza

Aumento di E → ERRORE MAX di circa **13%**



Buona corrispondenza

Aumento di E → ERRORE MAX di circa **10%**

→ modello materiale

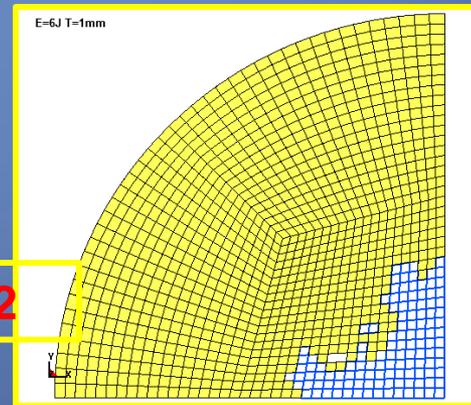
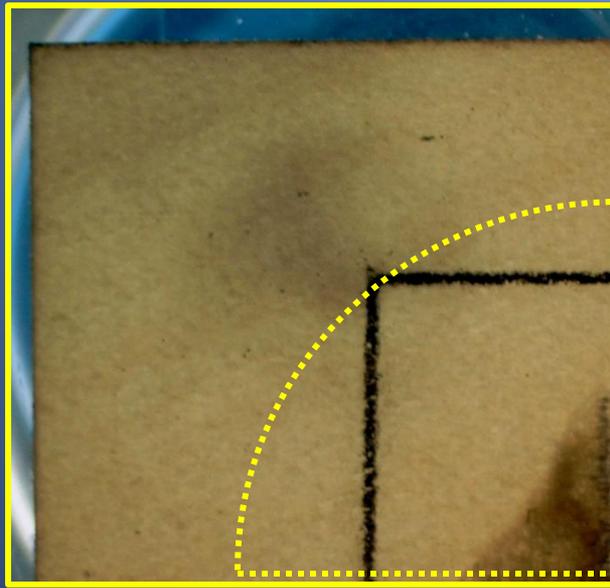
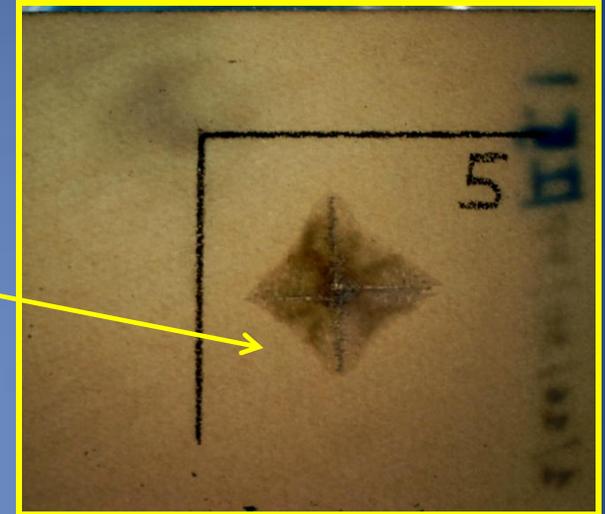
# CONFRONTO NUMERICO-SPERIMENTALE

## Analisi del danno

Raffronto visivo area delaminata

$T=1\text{mm}$   $E_3=6\text{J}$

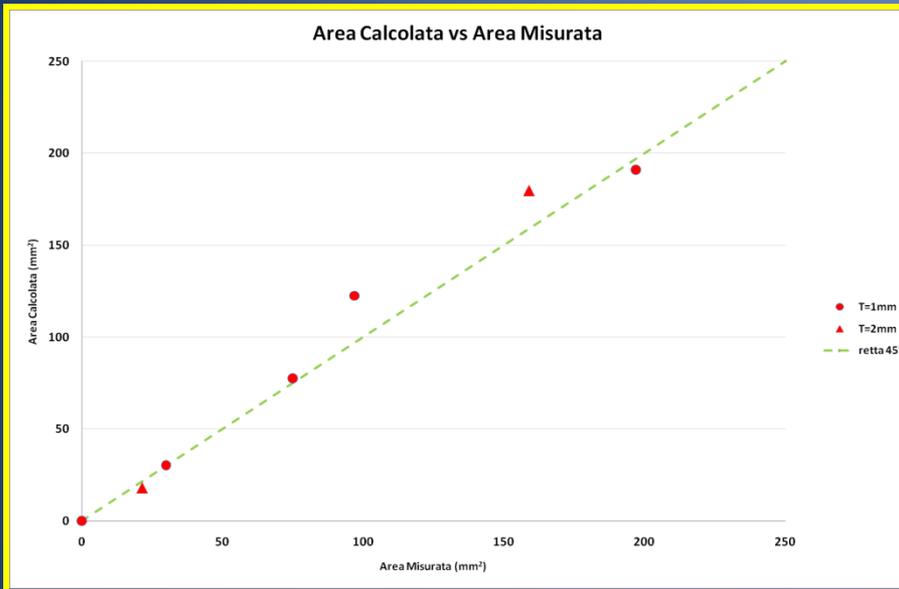
Superficie  
inferiore provino  
impattato



**Area delaminata**, Dimensione media area delaminata,  **$d$**

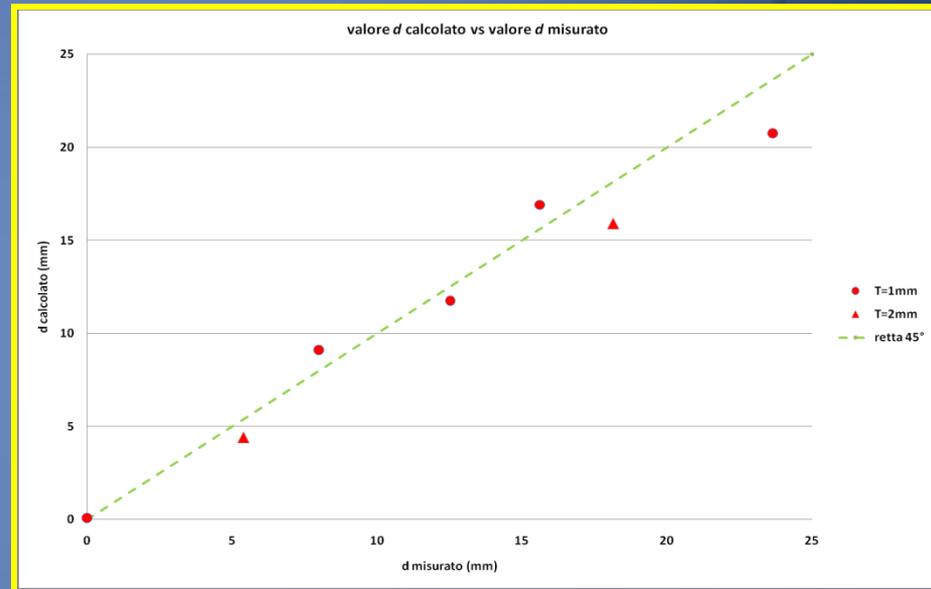
# CONFRONTO NUMERICO-SPERIMENTALE

## Analisi diagrammi Area delaminata



Buona corrispondenza  
Scostamento max **15%**

## Analisi diagrammi dimensione Area delaminata



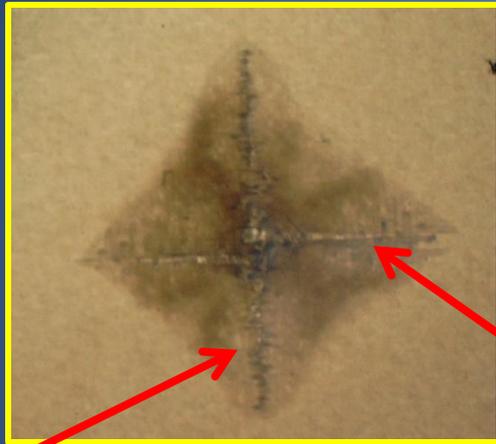
Buona corrispondenza  
Scostamento max **20%**

→ energia legata al modello di materiale

# CONFRONTO NUMERICO-SPERIMENTALE

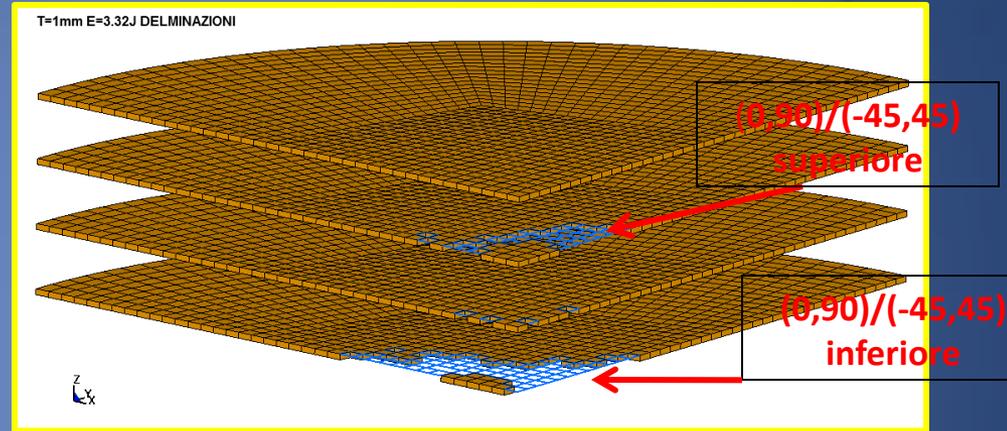
## Analisi del danno

Rottura fibre

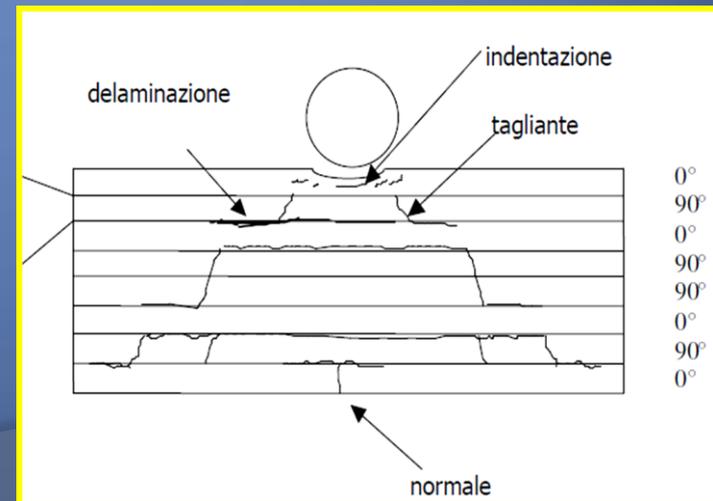
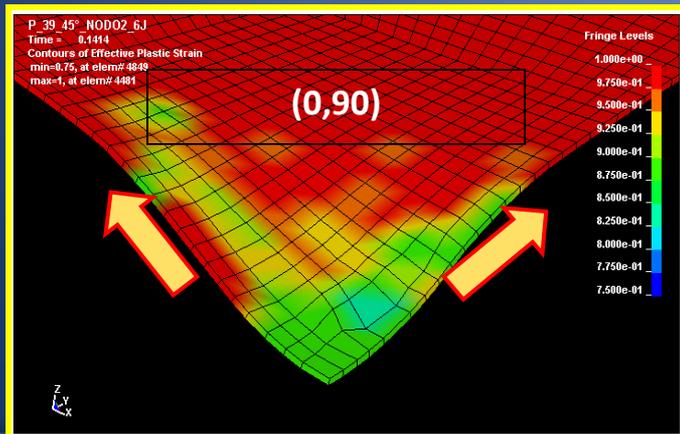


T=1mm E<sub>3</sub>=6J

Distribuzioni delaminazioni



T=1mm E<sub>3</sub>=4J



# ATTIVITA' DI RICERCA

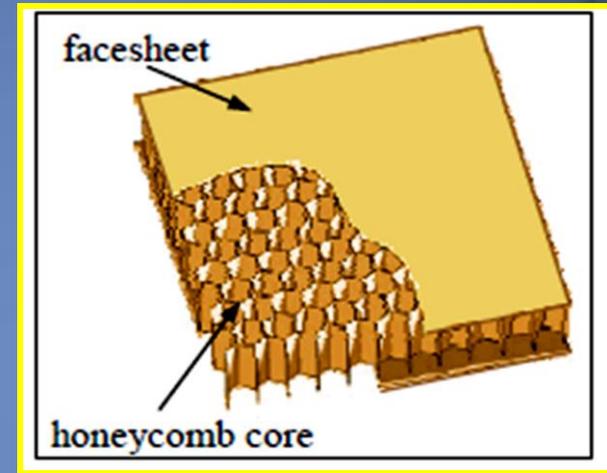
## IMPATTO SANDWICH

Simulazione di prove di impatto condotte attraverso drop weight machine

**MATERIALE:** tipo sandwich

**Core:** struttura a nido d'ape honeycomb costituita da fogli di fibra aramidica impregnati in resina fenolica:Nomex;

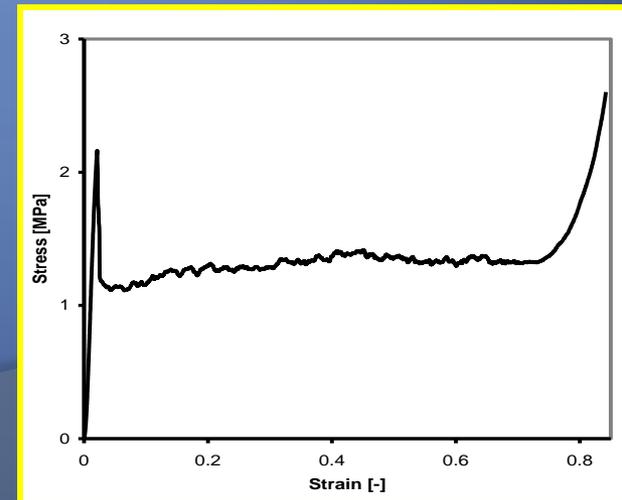
**Skins:** laminato in tessuto di fibra di vetro impregnato in resina fenolica



**COMPORAMENTO MECCANICO:** compressione uniassiale

**Plateau plastico:** elevate deformazioni → applicazioni nelle quali è richiesto un grande assorbimento di energia, come nel caso di impatti o di esplosioni.

**Hardening:** Compattazione celle



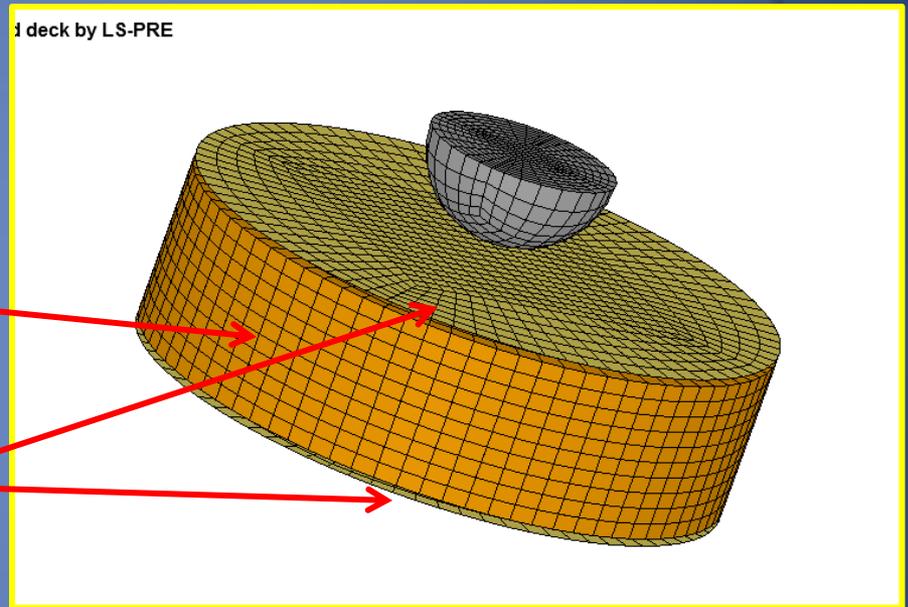
# IMPATTO SANDWICH

## Modello Numerico

### Modello Omogeneo

**Core:** la struttura a nido d'ape honeycomb è omogeneizzata in base alle proprietà MACRO ottenute dalle prove meccaniche sperimentali  
→ Formulazione solida MAT\_HONEYCOMB

**Skins:** proprietà ottenute da caratterizzazione meccanica --> Formulazione Shell MAT\_LAMINATE\_COMPOSITE\_FABRIC  
→ Teoria Continuum Damage Mechanics

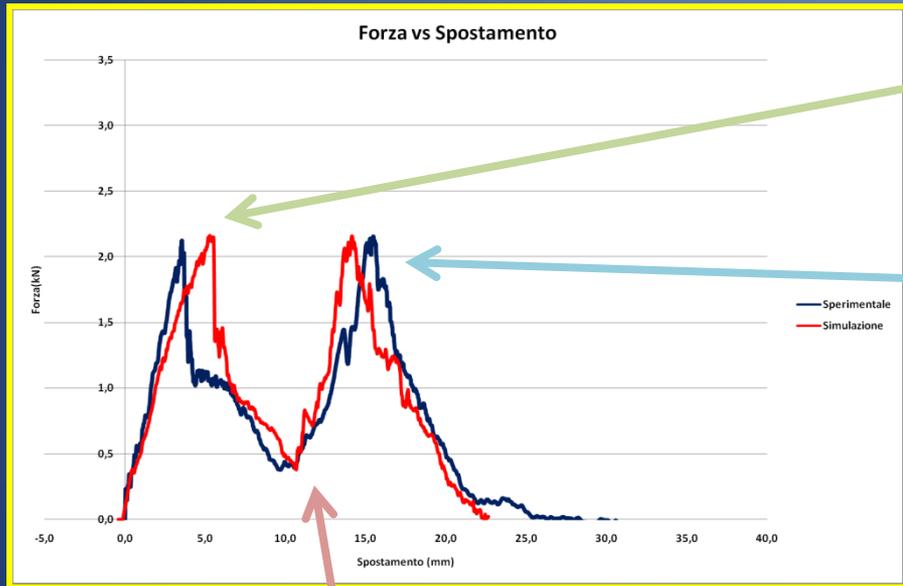


L'influenza dello **strain rate** valutata attraverso precedenti prove sperimentali è stata introdotta nella formulazione dei due materiali.

# IMPATTO SANDWICH

## Confronto Numerico Sperimentale

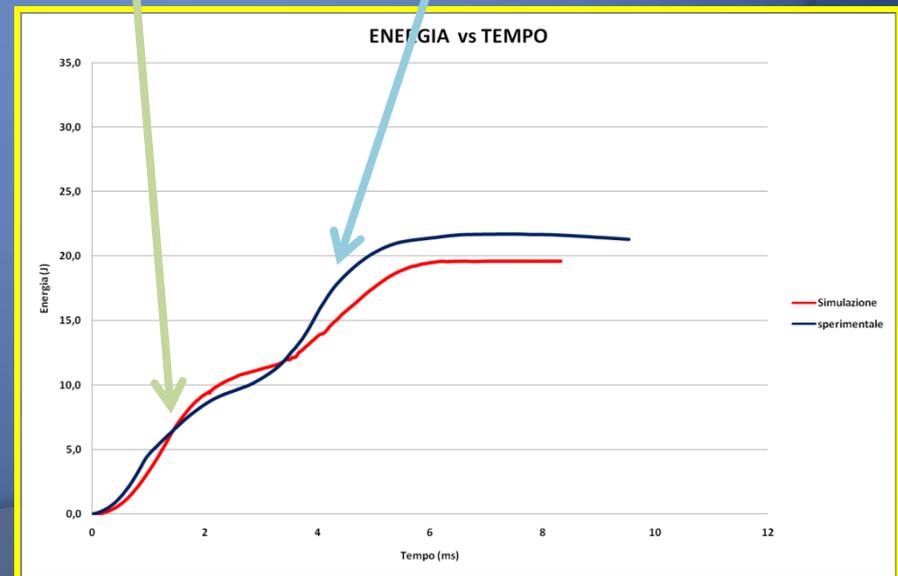
**Outcomes:** Curve vs Forza Spostamento e Energia Assorbita vs Tempo



Danneggiamento **CORE**

**TOP** skin failure

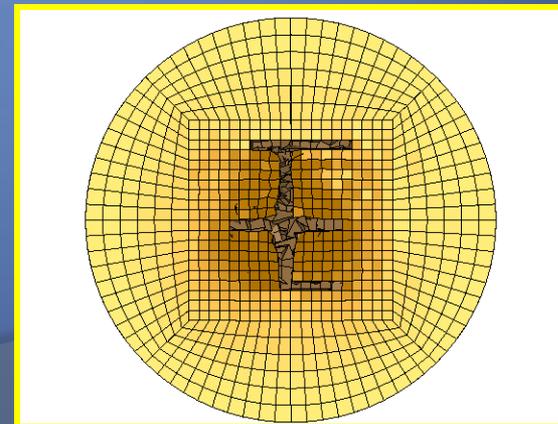
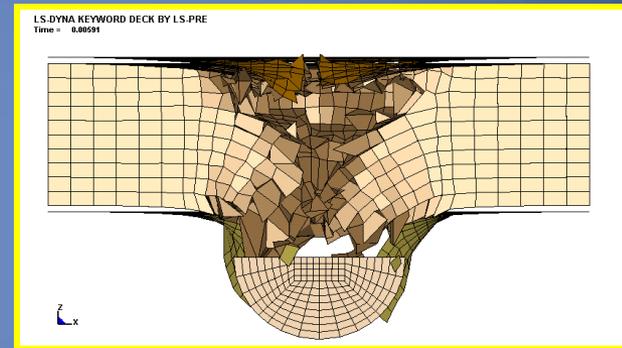
**BOTTOM** skin failure



# IMPATTO SANDWICH

## Confronto Numerico Sperimentale

**Outcomes:** Danneggiamento nella direzione dello spessore ed impronta top skin

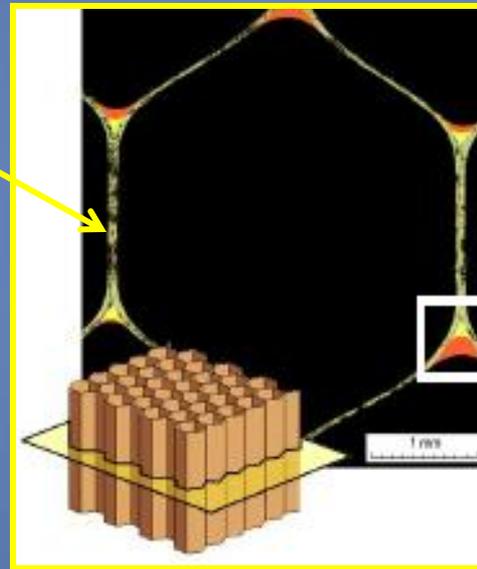
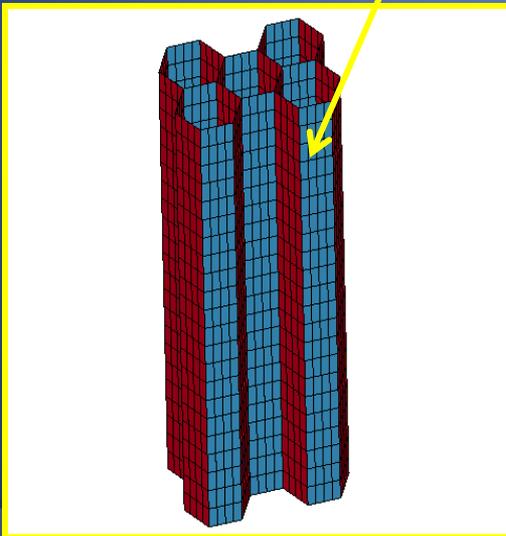


# IMPATTO SANDWICH

## Modello Cellulare

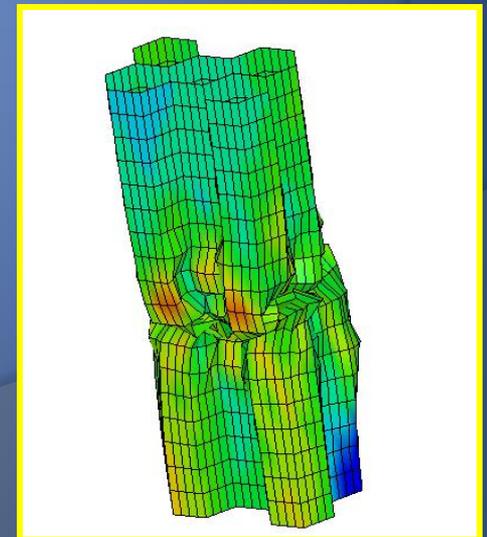
**Scopo:** Comprensione dipendenza dello Strain Rate sul Nomex e previsione di danneggiamento locale (ad esempio in caso di indentazione)

- **Sezione** struttura a celle esagonali
- **Doppio** spessore pareti celle



- Modello Shell, proprietà **Paper** Nomex
- Caratterizzazione a **SR**

- **Struttura Cellulare deformata** assialmente



# CONCLUSIONI

- Il modelli numerici FE creati sono in grado di riprodurre in modo efficiente il comportamento a impatto dei compositi analizzati in relazione al tempo di calcolo e sulla base di una opportuna operazione di calibrazione sperimentale
- Il confronto quantitativo dei parametri caratteristici delle prove è soddisfacente
- Viene riprodotto in modo soddisfacente il pattern di danno che hanno subito i provini
- Necessaria la validazione a livelli energetici e spessori differenti e uno studio accurato sulla riproduzione degli effetti SR



- Modelli più complessi → evoluzione danno → tempo di calcolo

Contesto generale **VIRTUAL TESTING, APPROCCIO MICRO-MACRO**  
→ ridurre il numero di prove sperimentali, implementazione casi reali