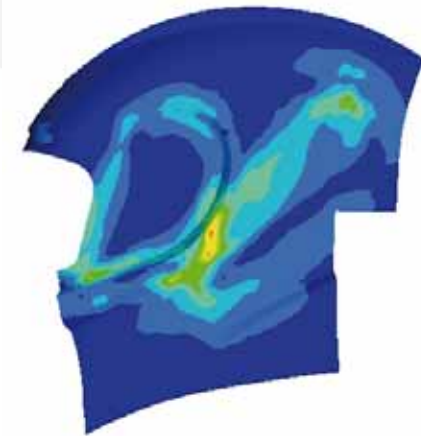
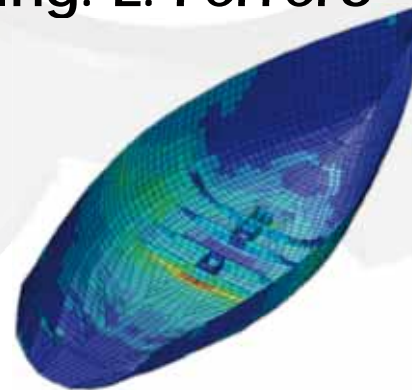
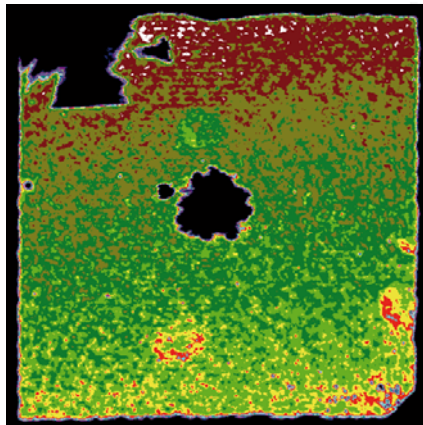


**Simulazione crash di modelli
full-scale con componenti in
composito a partire dalla
caratterizzazione dei materiali**

Ing. L. Ferrero



1. Introduzione alle problematiche

2. Tipo di analisi

3. Danneggiamento

4. Prove di caratterizzazione

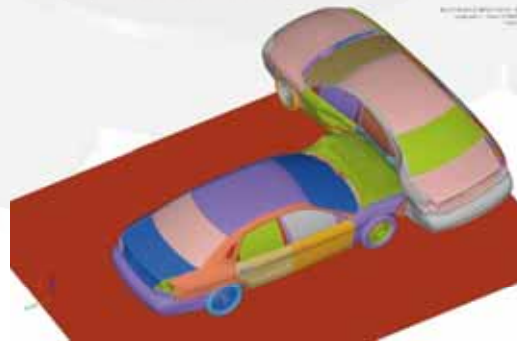
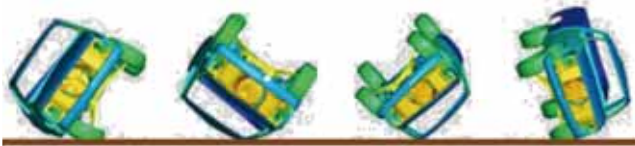
5. Modello di materiale Law 25, Radioss

6. Identificazione dei parametri

7. Esempio 1: fabric, T300

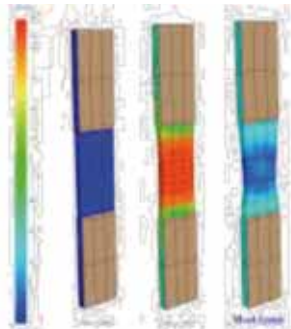
8. Esempio 2: unidirezionale M40

9. Conclusioni

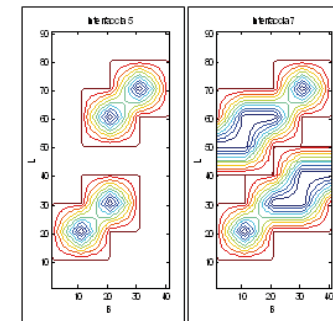


Tradizionalmente, con qualunque materiale si decida di progettare una parte, per impostare una simulazione FEM occorre introdurre le caratteristiche principali del materiale, secondo lo schema proposto dai modelli implementati nei codici commerciali.

Vengono eseguiti dei test sui provini, secondo norme e da essi si ricavano, in modo piuttosto diretto, i parametri richiesti dal modello di materiale scelto.



Cosa cambia quando si parla di compositi?



- q I compositi sono generalmente ortotropi **proprietà nelle direzioni di ortotropia**
- q I compositi sono spesso utilizzati in configurazioni multi-strato (laminati o sandwich) **presenza di interfacce**
- q I compositi rispondono all'applicazione del carico sviluppando un danneggiamento locale e progressivo, la cui propagazione può portare alla rottura del componente **necessità di considerare il danneggiamento già dalle prime fasi dell'applicazione del carico**
- q I compositi presentano una grande influenza (spesso incontrollata) del processo sulle proprietà finali **grande variabilità delle proprietà con il processo**
- q I compositi assorbono una grande quantità di energia nel danneggiamento **lavorano molto bene come assorbitori di energia**

Si definiscono le proprietà di una lamina, che viene poi inserita secondo una stratificazione.

TUTTAVIA:

Tutti gli elementi shell disponibili nei codici commerciali si basano su modelli strutturali Equivalent Single Layer

Quando si considerano multistrato, in cui ogni strato ha proprietà diverse (stesso materiale, orientazione diversa) i modelli ESL non sono capaci di cogliere in maniera esaustiva:

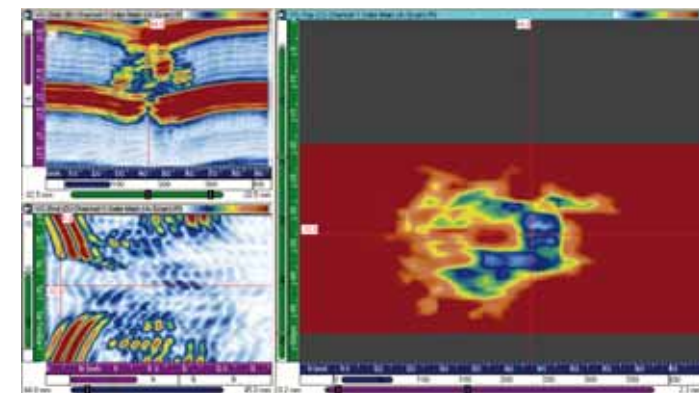
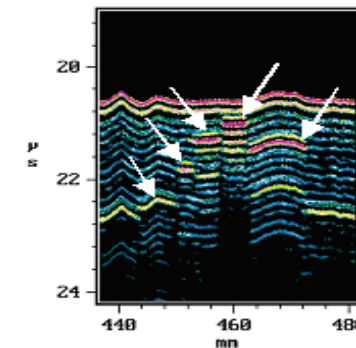
- il campo di spostamento trasversale (che viene considerato indipendente dalla coordinata di spessore)
- Il campo di deformazione e tensione trasversale
- Le tensioni interlaminari

Modelli più complessi (Layerwise) non sono attualmente disponibili nei codici commerciali a causa di un elevato costo computazionale

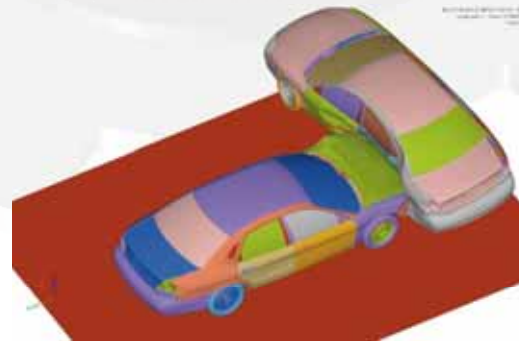
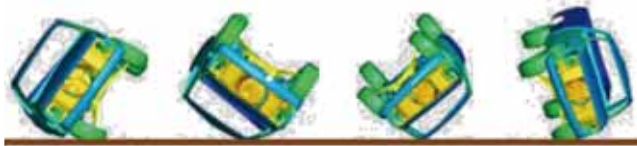
Le interfacce fisiche tra strati adiacenti non possono essere prese in considerazione (calcolo delle tensioni interlaminari)

Tutti i fenomeni di danneggiamento che interessano le interfacce (e.g. delaminazione) non possono avere una descrizione completa a causa della formulazione delle shell

Occorre impostare il modello di materiale in modo tale che sopperisca alle mancanze dell'elemento



1. Introduzione alle problematiche
2. Tipo di analisi
3. Danneggiamento
4. Prove di caratterizzazione
5. Modello di materiale Law 25, Radioss
6. Identificazione dei parametri
7. Esempio 1: fabric, T300
8. Esempio 2: unidirezionale M40
9. Conclusioni



CAMPO ELASTICO

- Ortotropia
- Prove di trazione 0°, 90°, 45°
- Pre-failure, no danneggiamento

DESIGN FOR STIFFNESS

INNESCO DI FAILURE NELLE COMPONENTI

- Fiber breakage, fiber kinking, matrix cracking
- Degrado locale e progressivo delle proprietà meccaniche
- Prove trazione/compressione 0°, 90°, 45°

DESIGN FOR STRENGTH

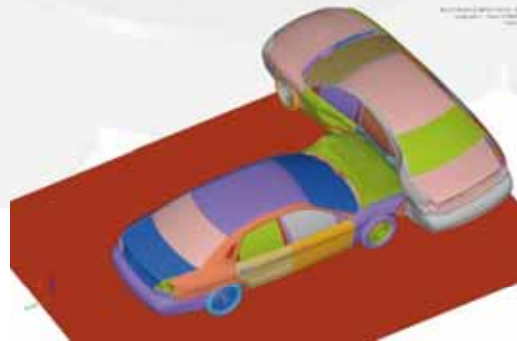
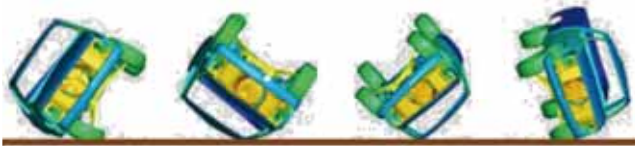
PROPAGAZIONE FAILURE E CEDIMENTO

- Macro-failure (coalescenza di micro-damages)
- Delaminazione alle interfacce, delaminazione tra fibre e matrice, cricche passanti
- Analisi delle proprietà residue e dell'energia assorbita nell'innescò e nella propagazione di failures

DESIGN FOR IMPACT / CRASHWORTHINESS

- Ispezioni C-scan, spettrografie, modi di apertura e il

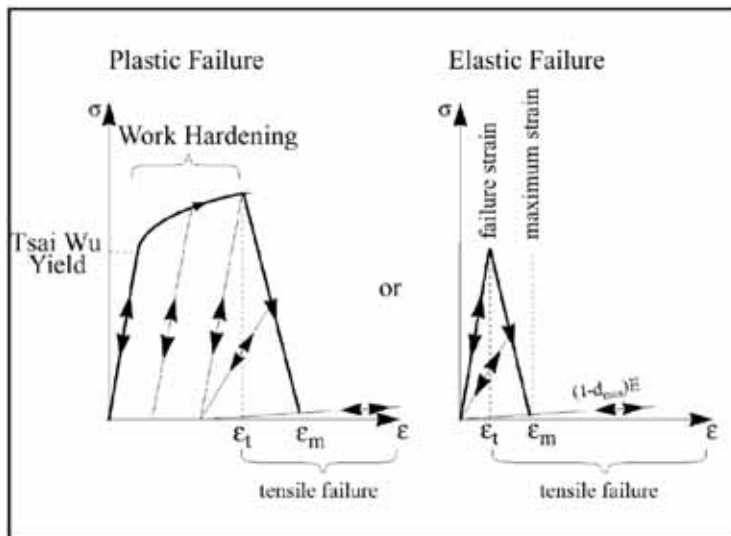
1. Introduzione alle problematiche
2. Tipo di analisi
3. Danneggiamento
4. Prove di caratterizzazione
5. Modello di materiale Law 25, Radioss
6. Identificazione dei parametri
7. Esempio 1: fabric, T300
8. Esempio 2: unidirezionale M40
9. Conclusioni



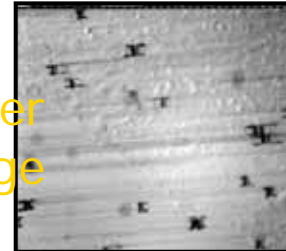
I tipi di danneggiamento più comuni nei codici commerciali per i compositi sono:

Tsai-Wu criterion:

à Yield phase and ductile failure



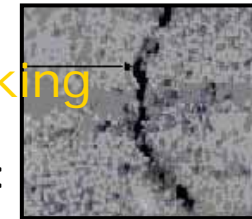
Fiber breakage



Crack propagation

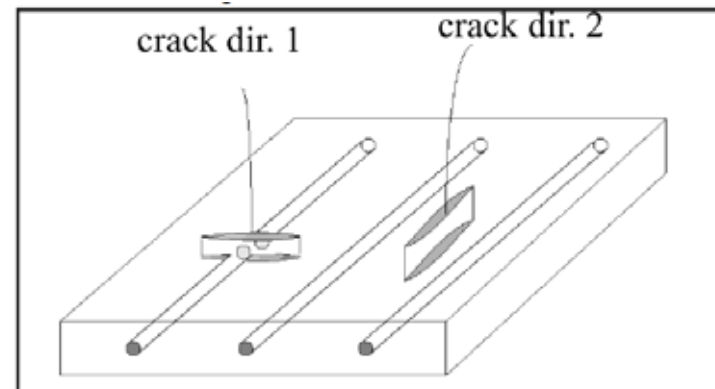


Matrix cracking

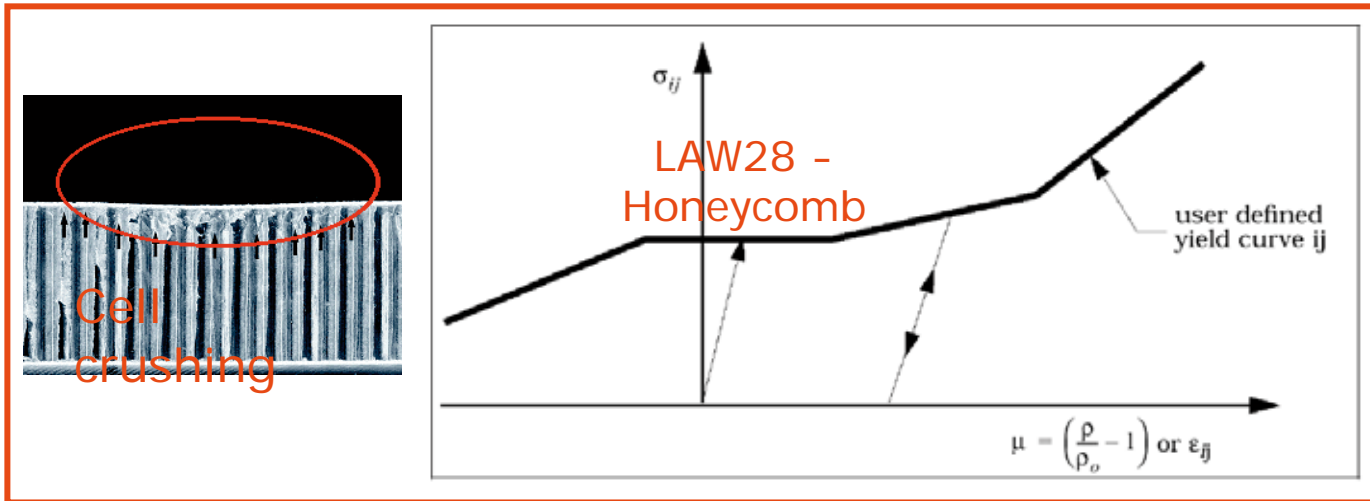


Johnson-Cook criterion:

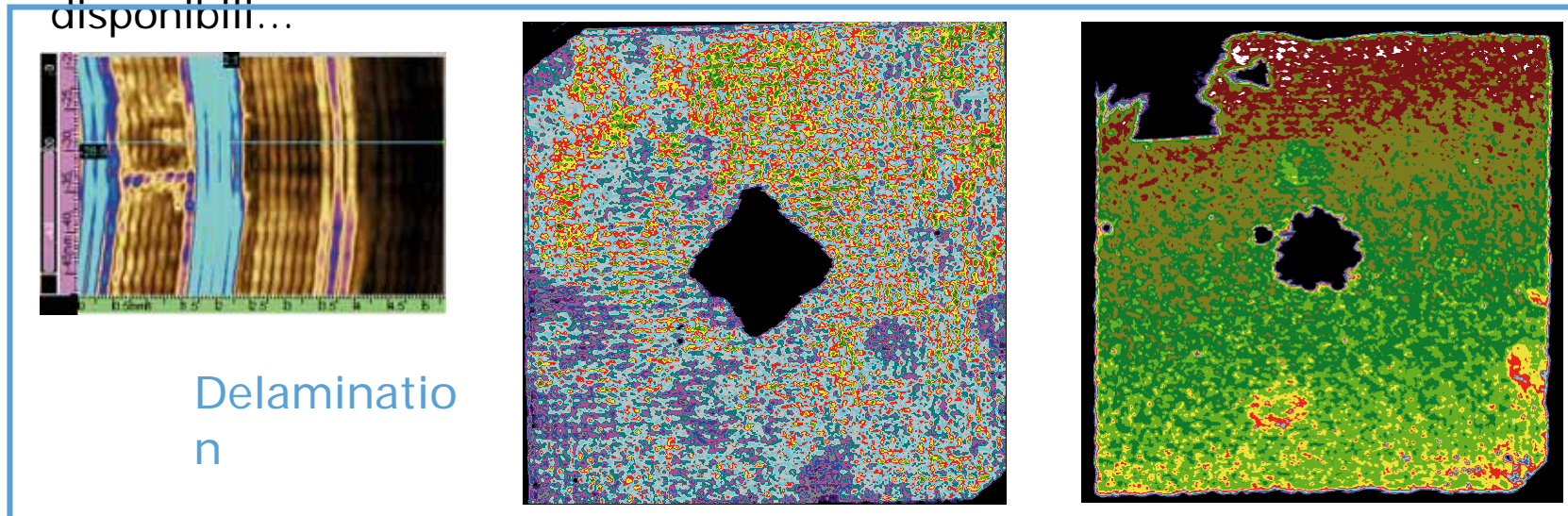
à Damage and brittle failure



Modellazione del danneggiamento

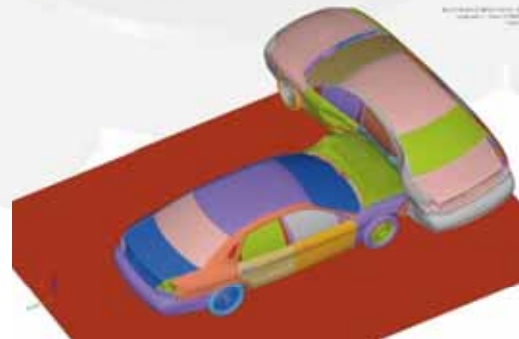
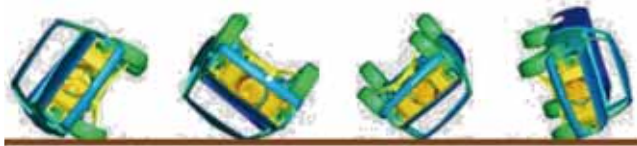


Ma solo alcuni di essi possono essere studiati con i modelli di materiale attualmente disponibili...



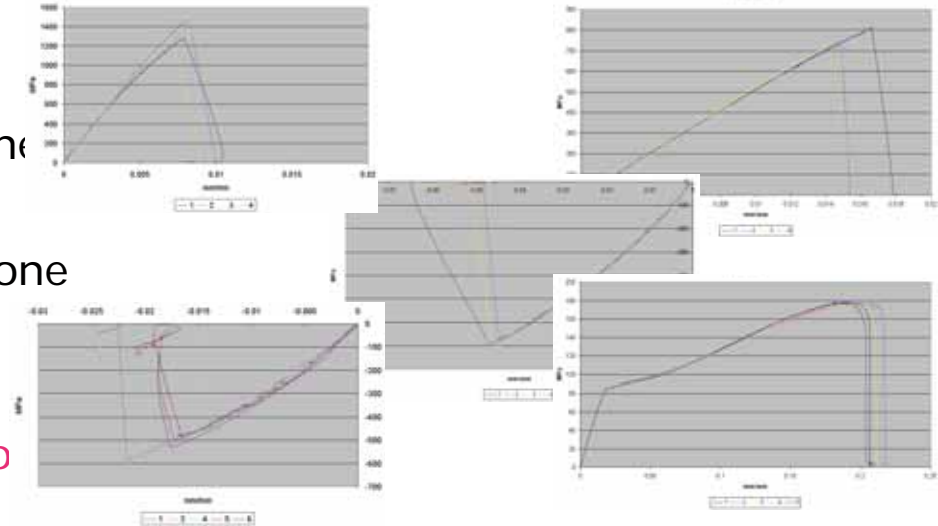
Delaminatio
n

1. Introduzione alle problematiche
2. Tipo di analisi
3. Danneggiamento
4. Prove di caratterizzazione
5. Modello di materiale Law 25, Radioss
6. Identificazione dei parametri
7. Esempio 1: fabric, T300
8. Esempio 2: unidirezionale M40
9. Conclusioni



Per la caratterizzazione di un materiale composito occorre disporre dei **risultati sperimentali** di 5 test:

1. Stratificazione 0° , prova di trazione
2. Stratificazione 0° , prova di compressione
3. Stratificazione 90° , prova di trazione
4. Stratificazione 90° , prova di compressione
5. Stratificazione 45° , prova di trazione

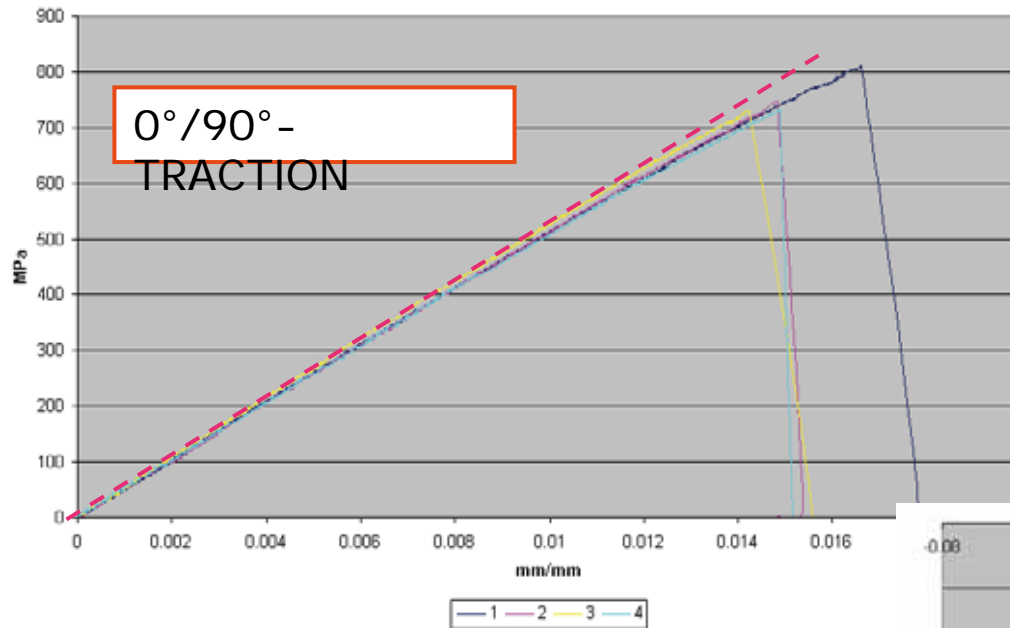


Per ogni prova, si consigliano **alcune ripetizioni**


Dal tipo di analisi, scaturiscono alcune scelte, come scelta del **codice di calcolo** e scelta del **modello di materiale** da utilizzare.

Qui di seguito verranno caratterizzati materiali **compositi multistrato**, nelle configurazioni **unidirezionale e fabric**, al fine di identificarne i parametri costitutivi secondo la legge **LAW25** del codice **Radioss**.




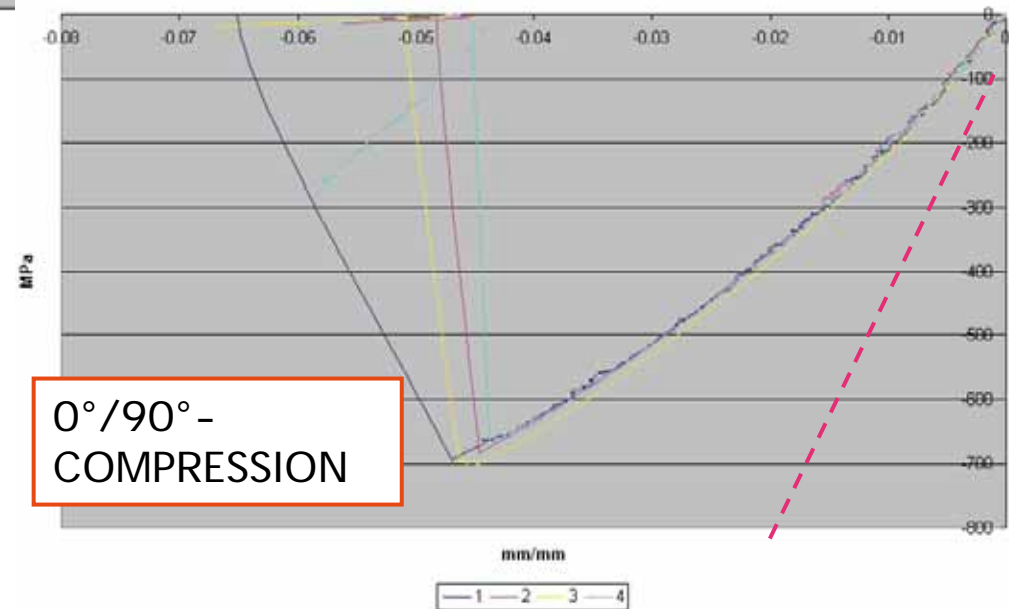


TRAZIONE

- Comportamento molto simile tra le due direzioni L=longitudinale e T=trasversale
- Failure fragile  cedimento fibre
- Scarsa plasticizzazione

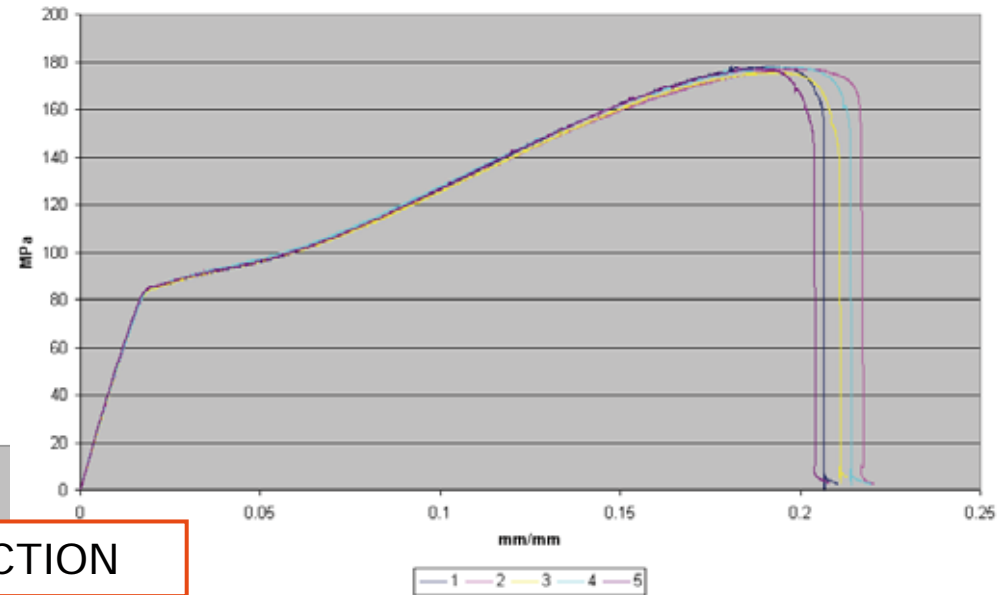
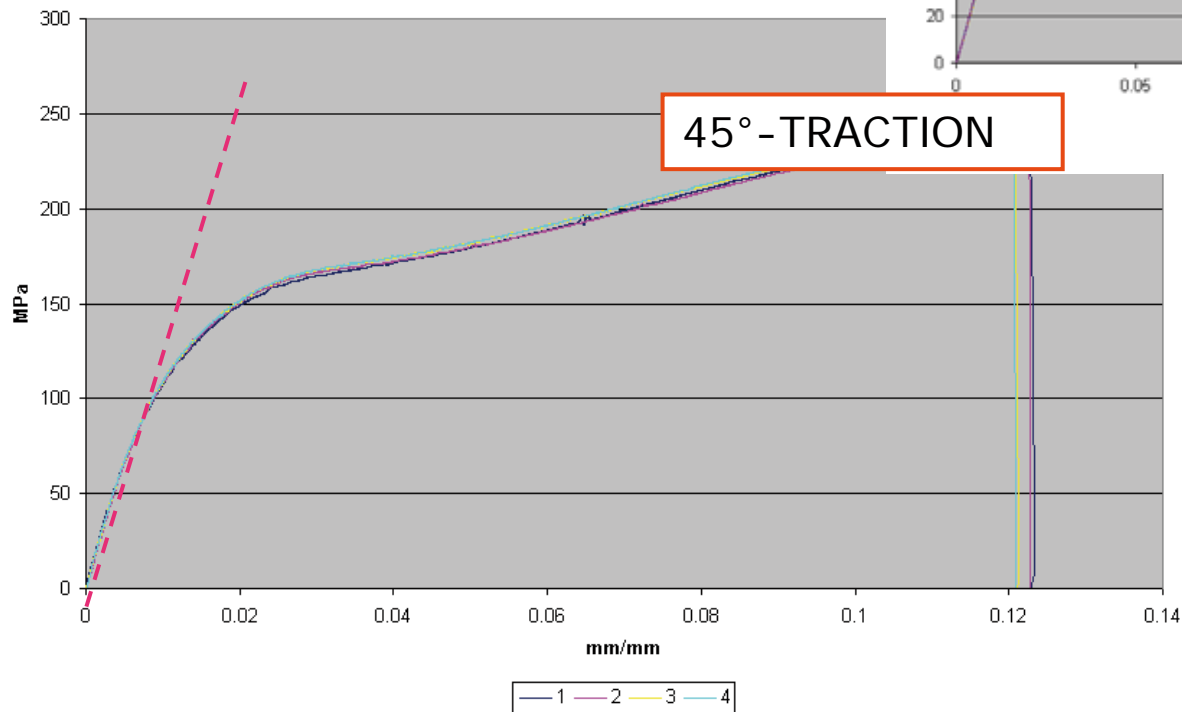
COMPRESSIONE

- Comportamento molto simile tra le due direzioni L=longitudinale e T=trasversale
- Failure a seguito plasticizzazione  cedimento matrice e interfacce matrice-fibre
- Ampia fase plasticizzazione

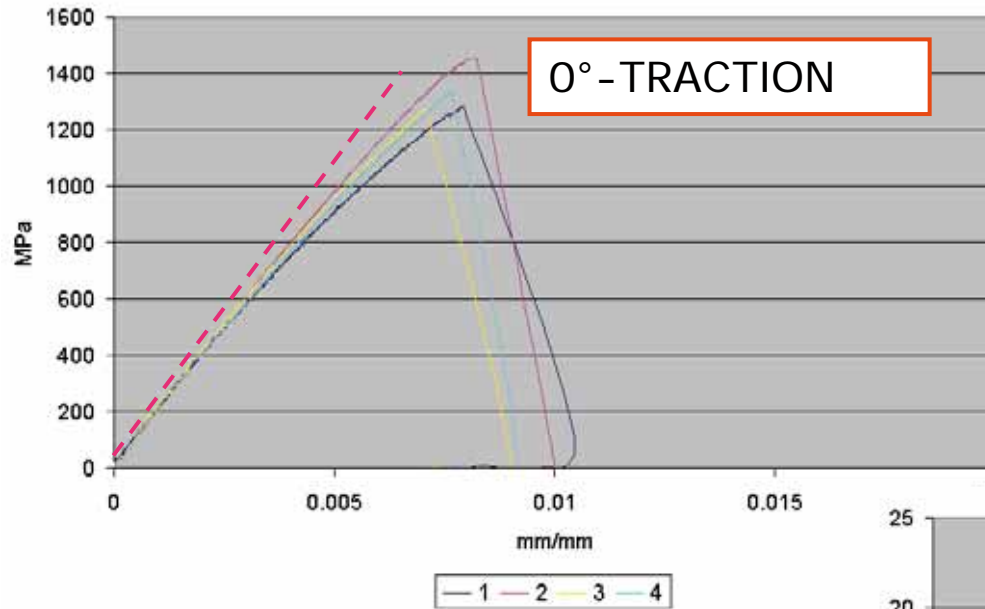


TAGLIO


- Comportamento molto diverso da quanto osservato a 0° e 90°
- Curva quasi bilineare dovuta alla plasticizzazione della matrice per effetto delle fibre che tendono ad allinearsi alla linea di carico



- Elevata plasticizzazione, molto localizzata
- Elevata energia assorbita

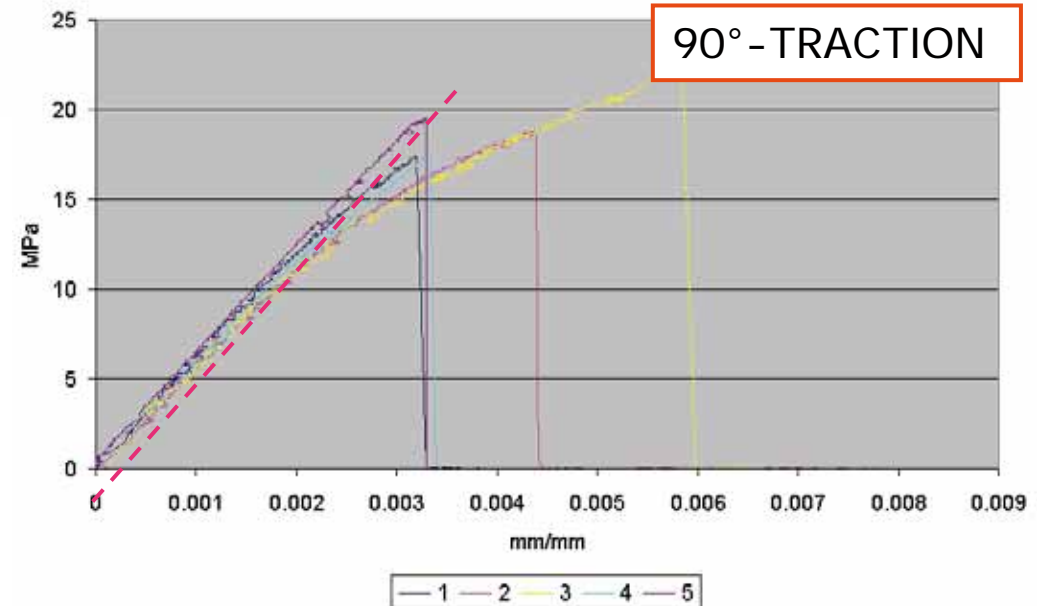


TRAZIONE - direzione L (fibre)

- Comportamento molto diverso tra le due direzioni L=longitudinale e T=trasversale
- Comportamento fibre dominante
- Failure fragile  cedimento fibre
- Scarsa plasticizzazione

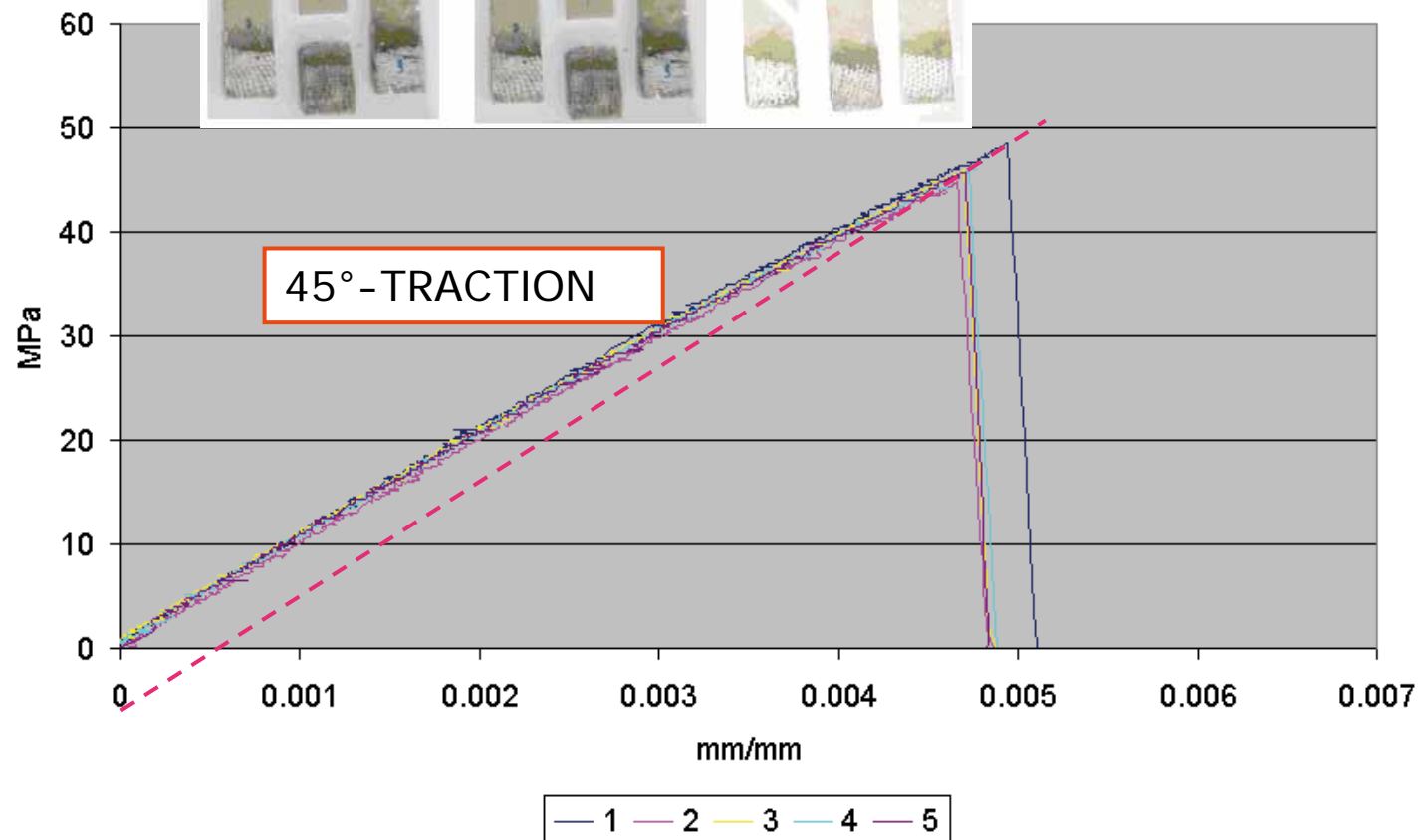
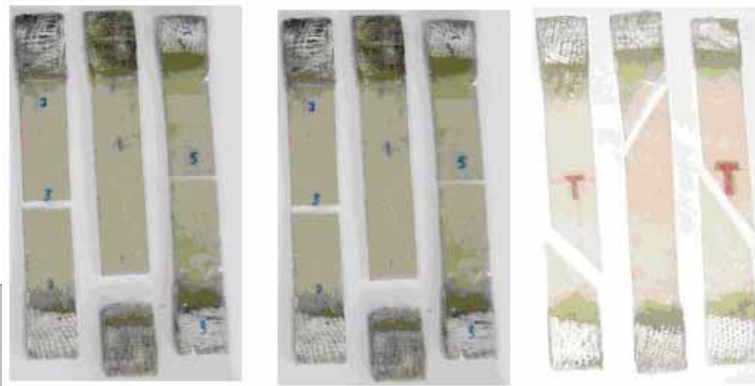
TRAZIONE - direzione T (matrice)

- 2 ordini di grandezza < direzione L
- Comportamento matrice dominante
- Failure a seguito plasticizzazione matrice
- Ampia plasticizzazione

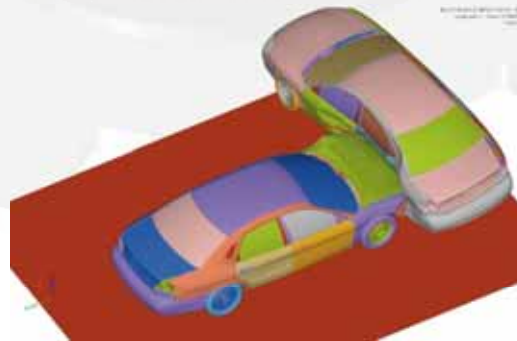
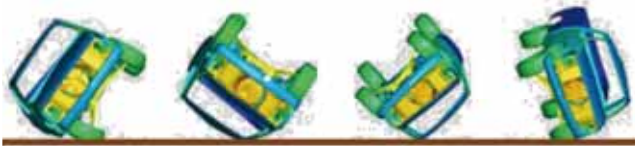


TAGLIO

- Failure fragile
- Scarsa plasticizzazione



1. Introduzione alle problematiche
2. Tipo di analisi
3. Danneggiamento
4. Prove di caratterizzazione
5. Modello di materiale Law 25, Radioss
6. Identificazione dei parametri
7. Esempio 1: fabric, T300
8. Esempio 2: unidirezionale M40
9. Conclusioni



Campo elastico ortotropo

Due modelli di hardening:

1. Tsai-Wu – isotropic plasticity hardening
2. CRASURV – orthotropic plasticity hardening

Yield surface
$$F\left(\frac{W_p}{W_{ref}^p}\right) = \left(1 + b\left(\frac{W_p}{W_{ref}^p}\right)^n\right)$$

$$F = F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{44}\sigma_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 \leq F\left(\frac{W_p}{W_{ref}^p}\right)$$

$$F_1(W_e) = -\frac{1}{\sigma_{1y}^c(W_e)} + \frac{1}{\sigma_{1y}^t(W_e)} \quad F_{11}(W_e) = \frac{1}{\sigma_{1y}^c(W_e)\sigma_{1y}^t(W_e)}$$

$$F_2(W_e) = -\frac{1}{\sigma_{2y}^c(W_e)} + \frac{1}{\sigma_{2y}^t(W_e)} \quad F_{22}(W_e) = \frac{1}{\sigma_{2y}^c(W_e)\sigma_{2y}^t(W_e)}$$

$$F_{44} = \frac{1}{(\sigma_{12y})^2}$$

$$F_{12}(W_e) = -\frac{\alpha}{2} \sqrt{F_{11}(W_e)F_{22}(W_e)}$$

5 PAIRS OF PLASTICITY PARAMETERS b, n
 Dir 1 – compression
 Dir 1 – traction
 Dir 2 – compression
 Dir 2 – traction
 Dir 12

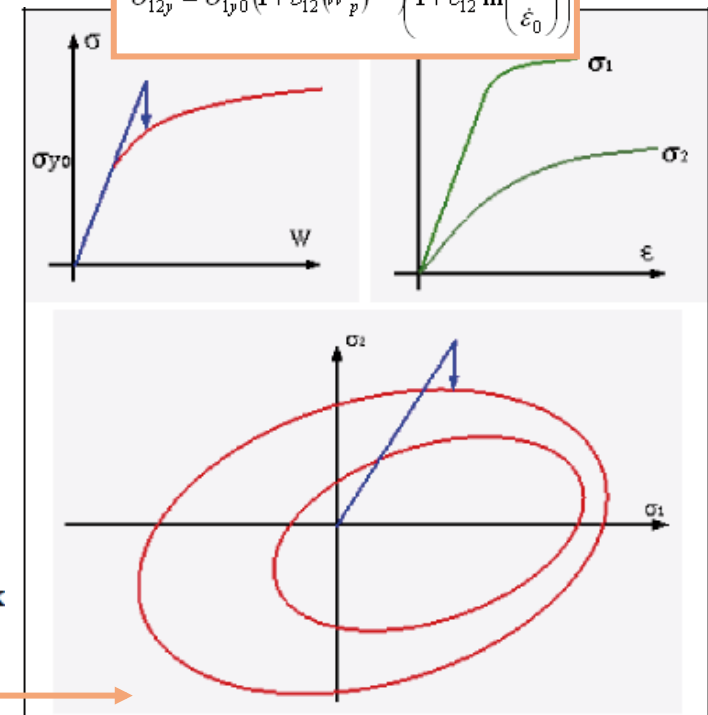
$$\sigma_{1y}^c = \sigma_{10}^c \left(1 + b_1^c (W_p)^{n1c}\right) \left(1 + c_1^c \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right)$$

$$\sigma_{2y}^c = \sigma_{20}^c \left(1 + b_2^c (W_p)^{n2c}\right) \left(1 + c_2^c \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right)$$

$$\sigma_{1y}^t = \sigma_{10}^t \left(1 + b_1^t (W_p)^{n1t}\right) \left(1 + c_1^t \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right)$$

$$\sigma_{2y}^t = \sigma_{20}^t \left(1 + b_2^t (W_p)^{n2t}\right) \left(1 + c_2^t \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right)$$

$$\sigma_{12y} = \sigma_{1y0} \left(1 + b_{12} (W_p)^{n12}\right) \left(1 + c_{12} \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right)$$

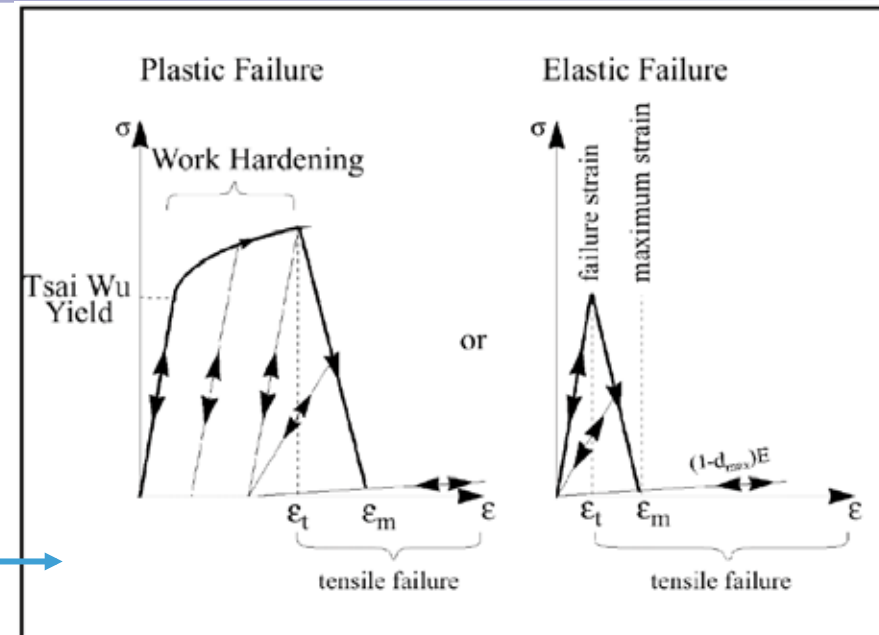


Material behavior

- $F(\sigma) < 1$: elastic state
 - $F(\sigma) = 1$: plastic admissible state
 - $F(\sigma) > 1$: plastically inadmissible stresses
- W_p is the plastic work,
 W_{ref}^p is the reference plastic work

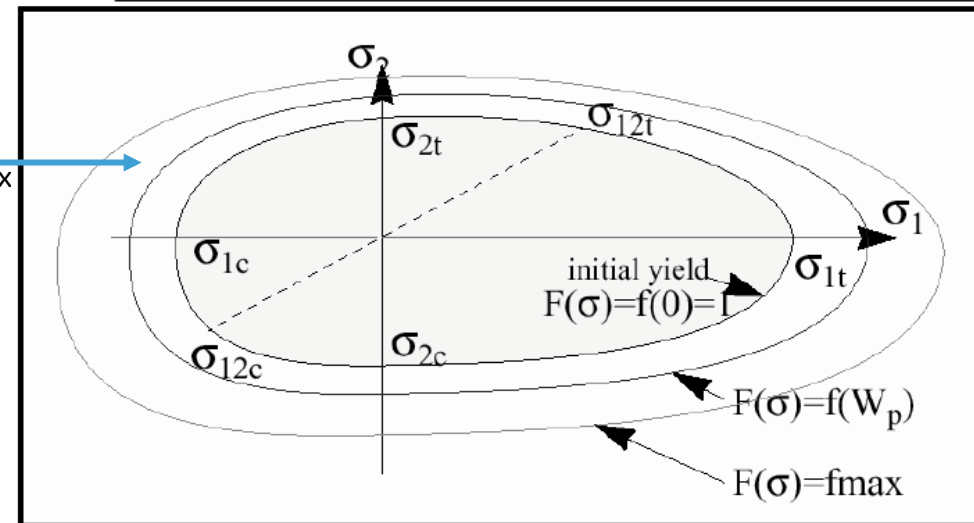
Pre-failure behavior:

- Elastic phase till the elastic-plastic threshold
- Elastic-plastic work hardening
- Damage initiation ($d > 0$)
- Damage propagation ($0 < d < 1$)
- Failure in the elastic or in the plastic phase due to the tensile limit ($d = 1$)



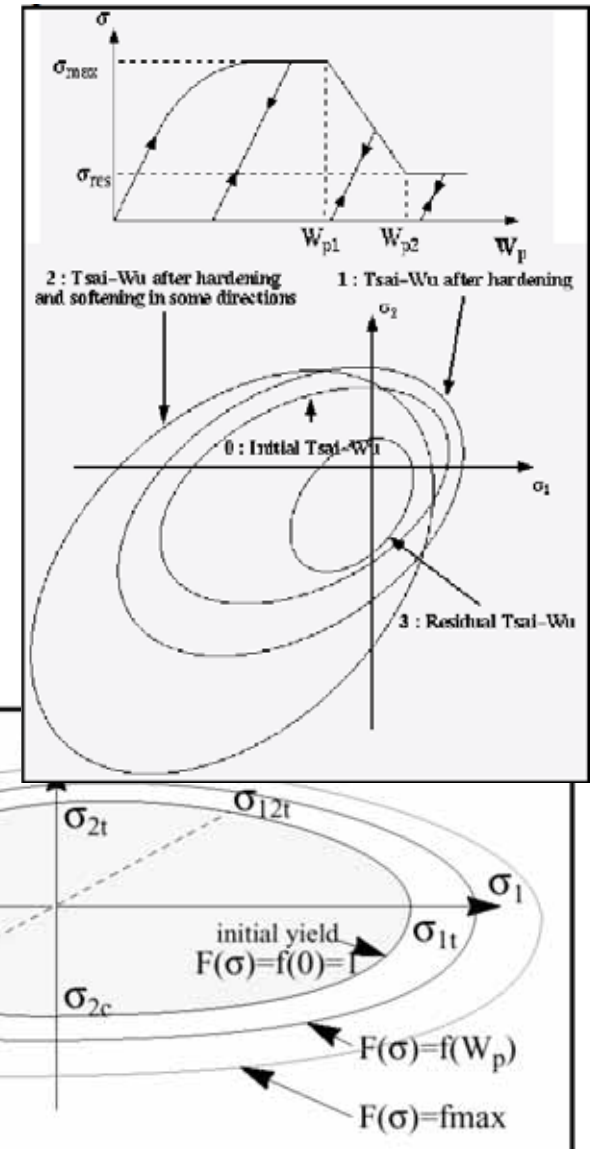
OR

- Failure in the plastic phase due to to the maximum plastic work ($W_p = W_{pmax}$)



Plastic threshold failure (Tsai-Wu):

- q La flow surface viene usata per stimare la rottura, attraverso due parametri
 - o plastic work limit W_p^{\max} ,
 - o maximum value of yield function F_{\max}
- q Se una delle condizioni è verificata, c'è rottura:
 - o If $W_p > W_p^{\max}$ for one layer,
 - o If $W_p > W_p^{\max}$ for all layers,
 - o If $W_p > W_p^{\max}$ or tensile failure in direction 1 for each layer,
 - o If $W_p > W_p^{\max}$ or tensile failure in direction 2 for each layer,
 - o If $W_p > W_p^{\max}$ or tensile failure in directions 1 and 2 for each layer,
 - o If $W_p > W_p^{\max}$ or tensile failure in direction 1 for all layer,
 - o If $W_p > W_p^{\max}$ or tensile failure in direction 2 for all layer,
 - o If $W_p > W_p^{\max}$ or tensile failure in direction 1 and 2 for each layer.



Plastic threshold failure (CRASURV):

- q Nella formulazione CRASURV è possibile specificare 5 coppie di parametri b e n per la descrizione dell'hardening (tensione e compressione longitudinale, tensione e compressione trasversale, taglio)
- q MA è possibile specificare solo 1 soglia per il lavoro plastico

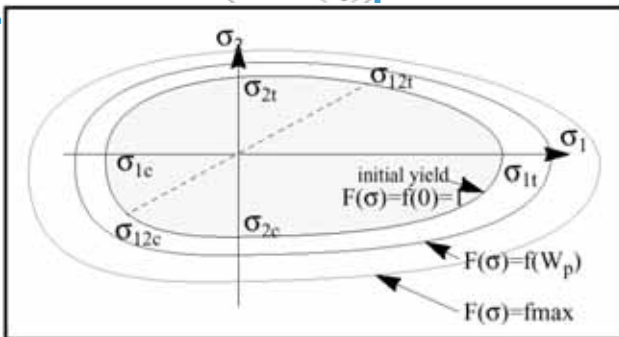
$$\sigma_{1y}^c = \sigma_{10}^c (1 + b_1^c (W_p)^{n1c}) \left(1 + c_1^c \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right)$$

$$\sigma_{2y}^c = \sigma_{20}^c (1 + b_2^c (W_p)^{n2c}) \left(1 + c_2^c \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right)$$

$$\sigma_{1y}^t = \sigma_{10}^t (1 + b_1^t (W_p)^{n1t}) \left(1 + c_1^t \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right)$$

$$\sigma_{2y}^t = \sigma_{20}^t (1 + b_2^t (W_p)^{n2t}) \left(1 + c_2^t \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right)$$

$$\sigma_{12y} = \sigma_{1y0} (1 + b_{12} (W_p)^{n12}) \left(1 + c_{12} \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right)$$

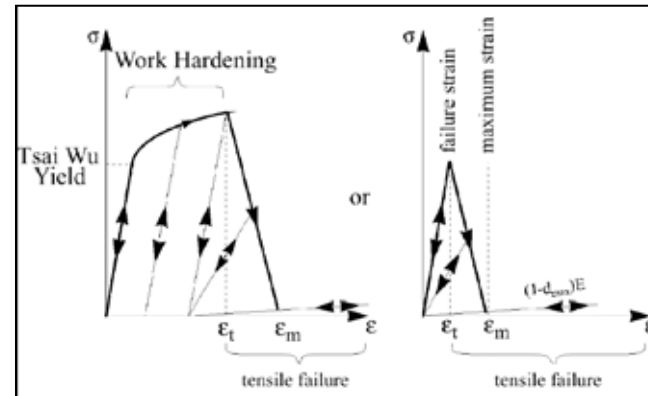


- q La flow surface viene usata per stimare la rottura, attraverso due parametri W_{pmax} e F_{max}
 - ~ Se una delle condizioni è verificata, c'è
 - o If $W_p > W_p^{max}$ for one layer,
 - o If $W_p > W_p^{max}$ for all layers,
 - o If $W_p > W_p^{max}$ or tensile failure in direction 1 for each layer,
 - o If $W_p > W_p^{max}$ or tensile failure in direction 2 for each layer,
 - o If $W_p > W_p^{max}$ or tensile failure in directions 1 and 2 for each layer,
 - o If $W_p > W_p^{max}$ or tensile failure in direction 1 for all layer,
 - o If $W_p > W_p^{max}$ or tensile failure in direction 2 for all layer,
 - o If $W_p > W_p^{max}$ or tensile failure in direction 1 and 2 for each layer.

Threshold strains for damage and failure (CRASURV):

Le strain per la definizione del brittle tensile failure sono attive nelle direzioni locali (1 e 2), solo a trazione (fisico!).

ϵ_{t1}	Tensile rupture strain in direction 1
ϵ_{m1}	Maximum strain in direction 1
ϵ_{t2}	Tensile rupture strain in direction 2
ϵ_{m2}	Maximum strain in direction 2
d_{max}	Maximum damage ($d_{max} < 1$)
ϵ_{f1}	Total tensile failure in direction 1
ϵ_{f2}	Total tensile failure in direction 2



Nelle 5 direzioni, poi, è possibile specificare due ulteriori strain

Initial softening strain – Raggiunta questa strain, inizia una fase di softening, utile a modellare il danneggiamento nei compositi fibrorinforzati

Maximum softening strain – Raggiunta questa strain, la fase di softening viene conclusa con il failure (se $d=d_{max}=1$)

ϵ_1^{tl}	Initial softening strain
ϵ_2^{tl}	Maximum softening strain

1. Introduzione alle problematiche
2. Tipo di analisi
3. Danneggiamento
4. Prove di caratterizzazione
5. Modello di materiale Law 25, Radioss
6. Identificazione dei parametri
7. Esempio 1: fabric, T300
8. Esempio 2: unidirezionale M40
9. Conclusioni



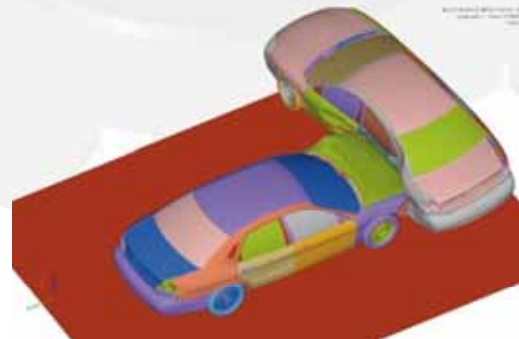
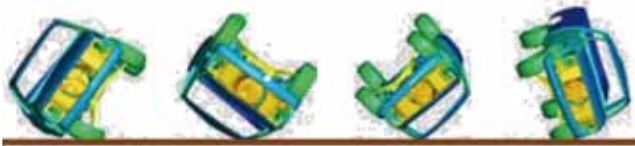
Identificazione dei parametri



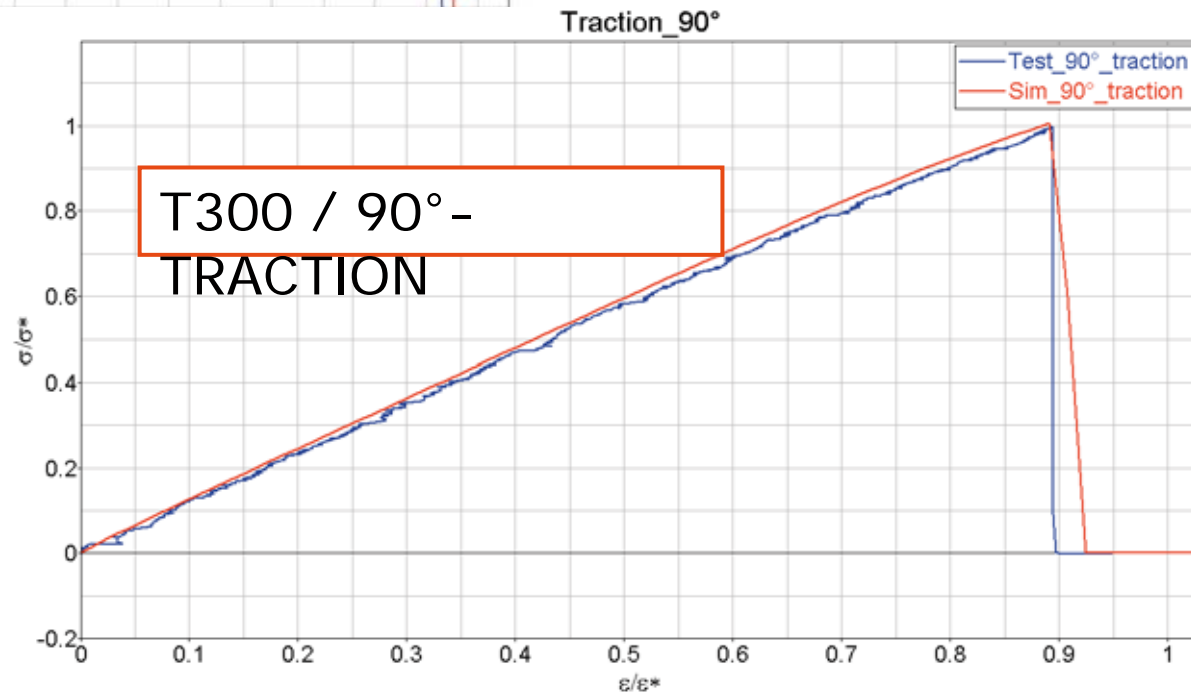
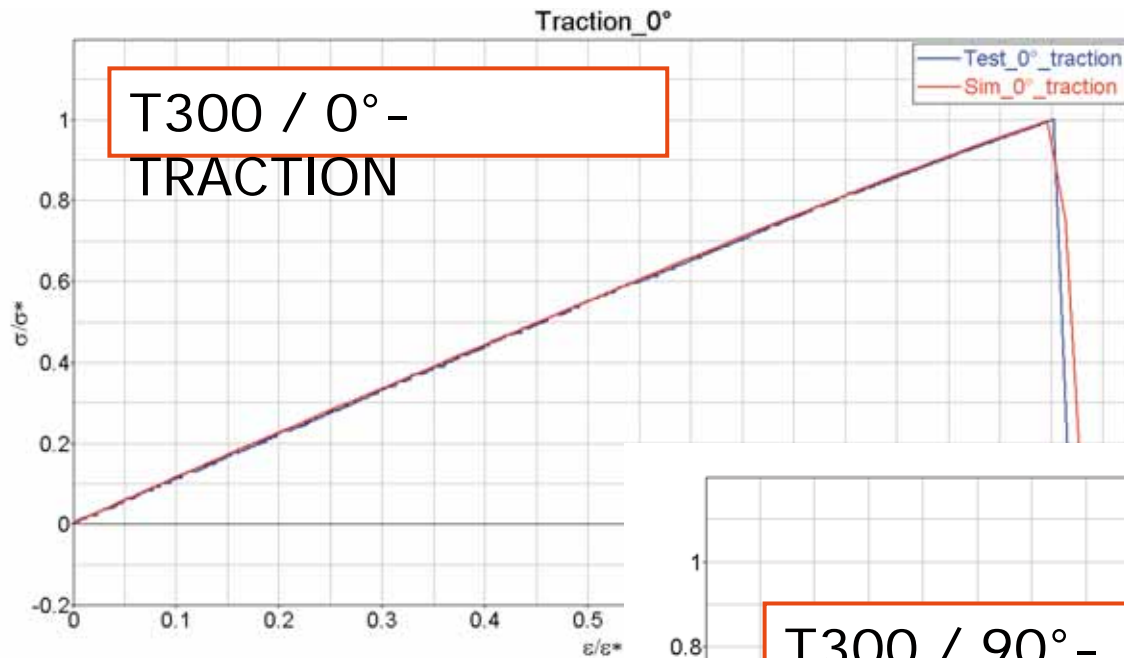
Density	#####	ton/mm ³	Wpmax	#####	Mpa	eps1T2	#####		eps1C2	#####	
E11	#####	MPa	loff	#####		eps2T2	#####		eps2C2	#####	
E22	#####	MPa	lCC	#####		sigma_resT2	#####	MPa	sigma_resC2	#####	MPa
v12	#####		sigma1yT	#####	MPa	sigma1yC	#####	MPa	sigma12yT	#####	MPa
lfl ag	#####		b1T	#####	Mpa ⁻ⁿ	b1C	#####	Mpa ⁻ⁿ	b12T	#####	Mpa ⁻ⁿ
G12	#####	MPa	n1T	#####		n1C	#####		n12T	#####	
G23	#####	MPa	sigma1MT	#####	MPa	sigma1MC	#####		sigma12MT	#####	
G31	#####	MPa	c1T	#####		c1C	#####		c12T	#####	
epsT1	#####		eps1T1	#####		eps1C1	#####		eps1T12	#####	
epsM1	#####		eps2T1	#####		eps2C1	#####		eps2T12	#####	
epsT2	#####		sigma_resT1	#####	MPa	sigma_resC1	#####	MPa	sigma_resT12	#####	MPa
epsM2	#####		sigma2yT	#####	MPa	sigma2yC	#####	MPa	gamma_ini	#####	
dmax	#####		b2T	#####	Mpa ⁻ⁿ	b2C	#####	Mpa ⁻ⁿ	gamma_max	#####	
c	#####		n2T	#####		n2C	#####		dmax	#####	
eps_dot0	#####	s ⁻¹	sigma2MT	#####		sigma2MC	#####		Fsmoot	#####	
alpha	#####		c2T	#####		c2C	#####		Fcut	#####	s ⁻¹

64 PARAMETERS
to be identified

1. Introduzione alle problematiche
2. Tipo di analisi
3. Danneggiamento
4. Prove di caratterizzazione
5. Modello di materiale Law 25, Radioss
6. Identificazione dei parametri
7. Esempio 1: fabric, T300
8. Esempio 2: unidirezionale M40
9. Conclusioni



Esempio 1: fabric, T300

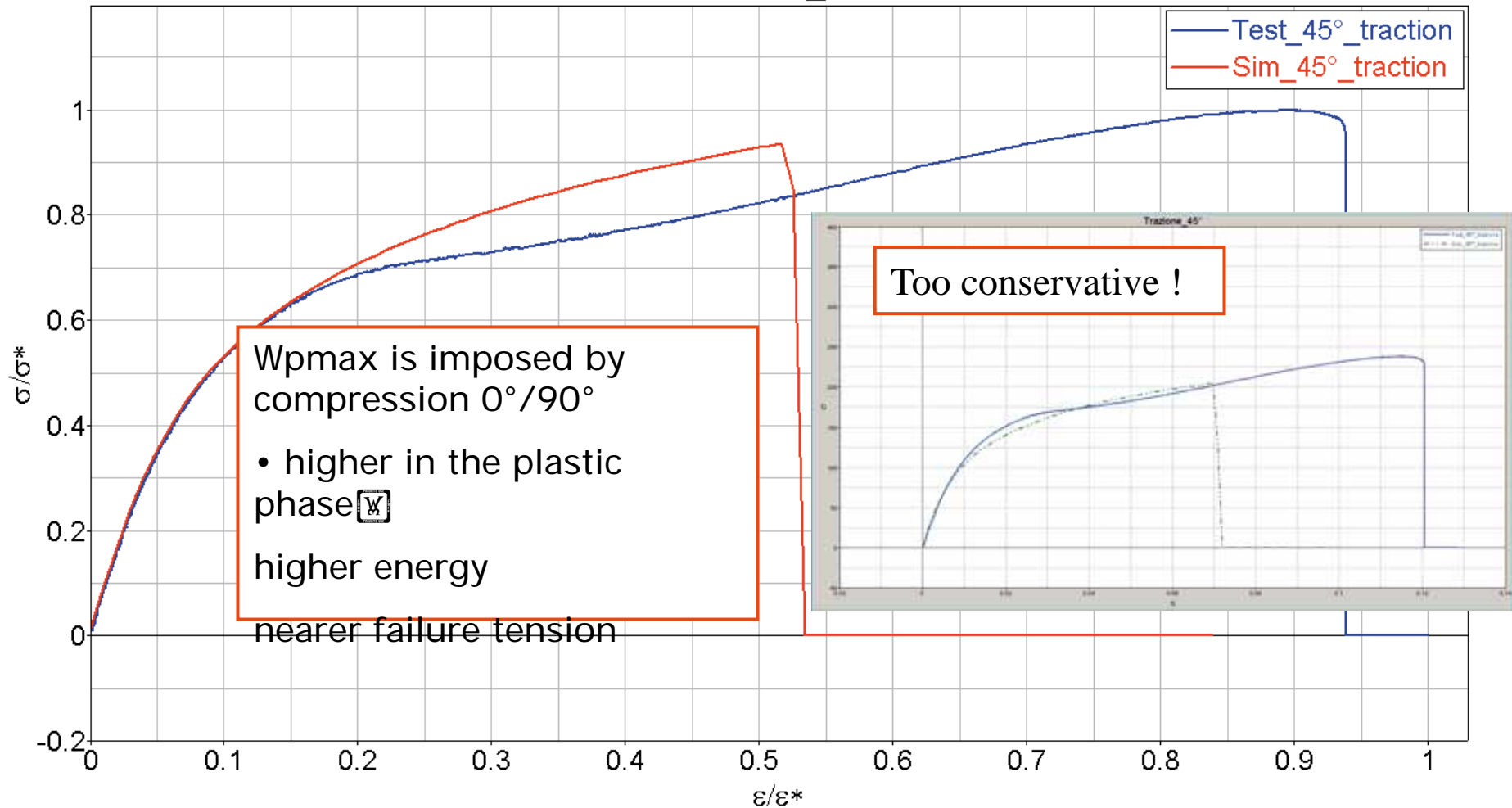


σ^* = max stress in test
 ϵ^* = deformation at the end of the test

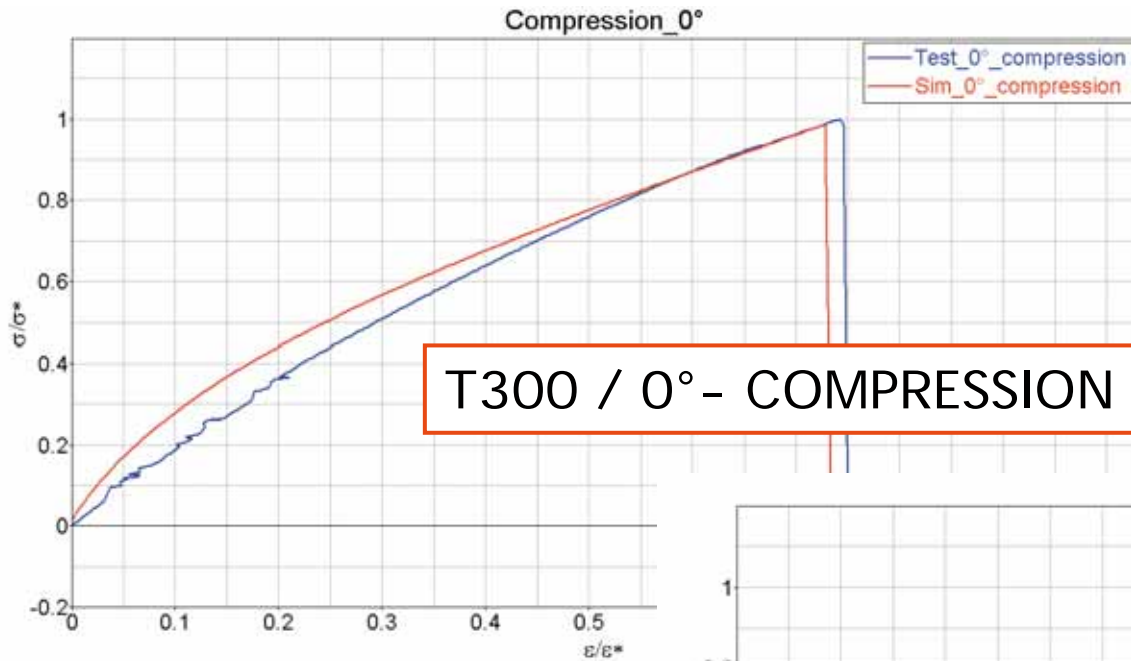
Esempio 1: fabric, T300

T300 / 45° -
TRACTION

Traction_45°

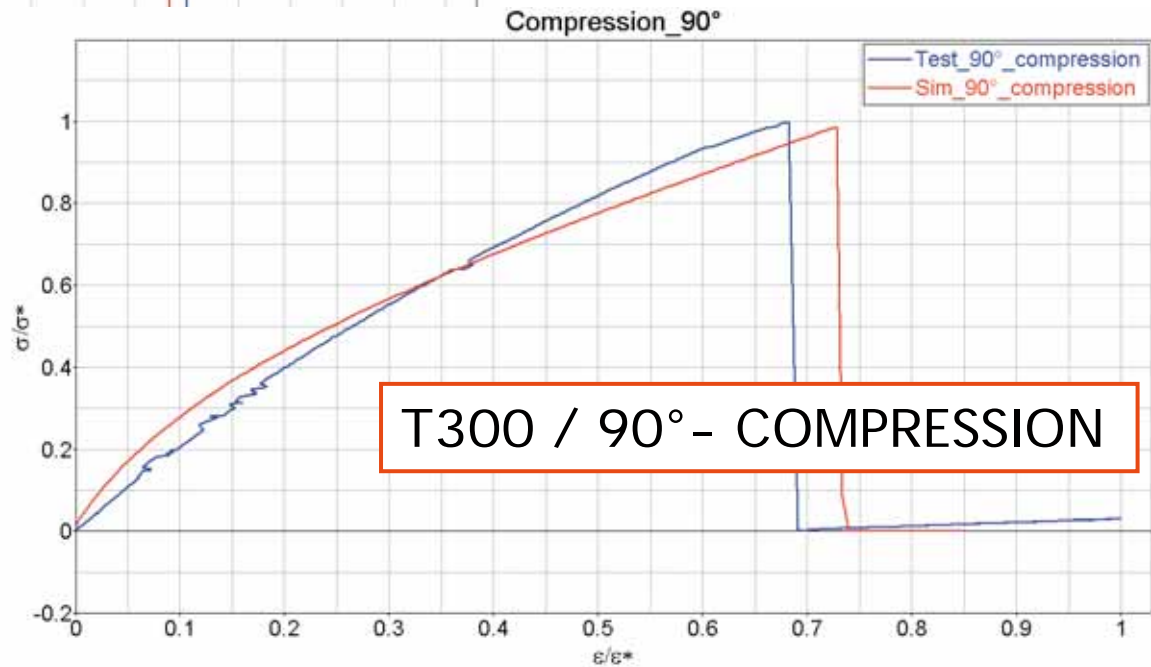


Esempio 1: fabric, T300



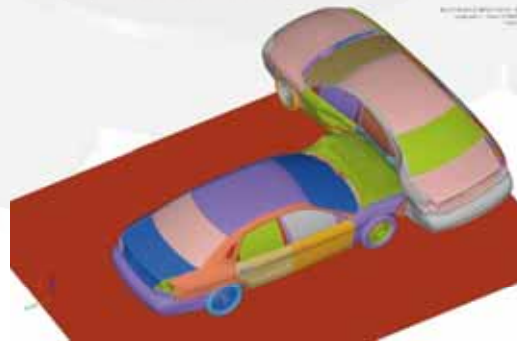
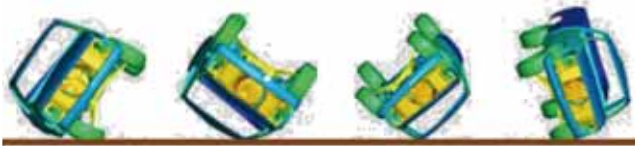
T300 / 0° - COMPRESSION

Same W_{pmax} in
0°-compression
and
90°-compression

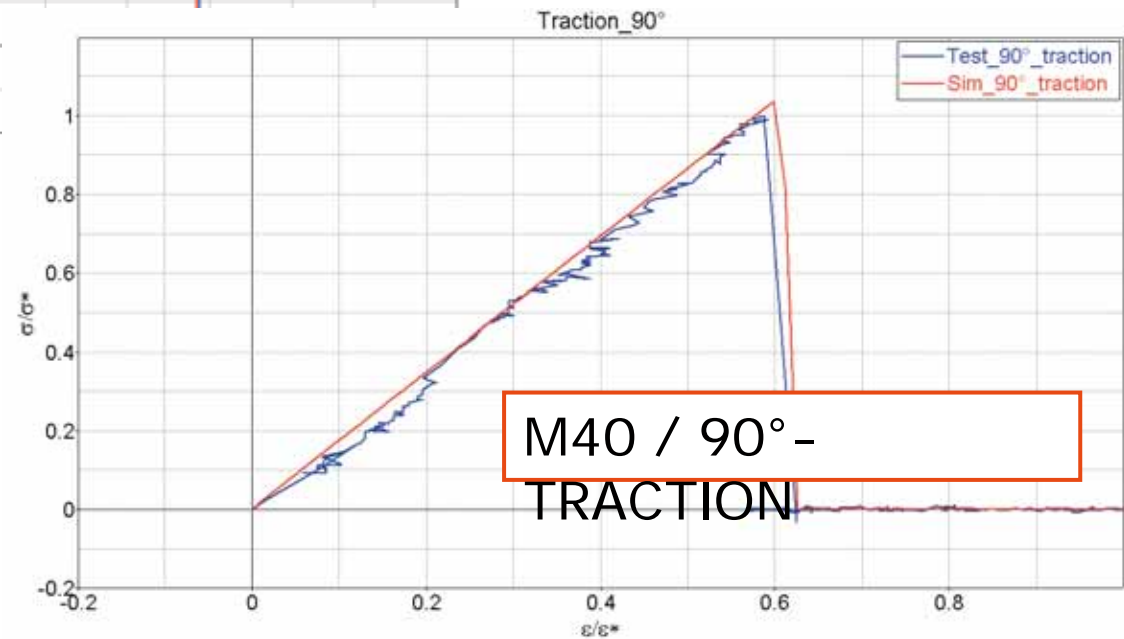
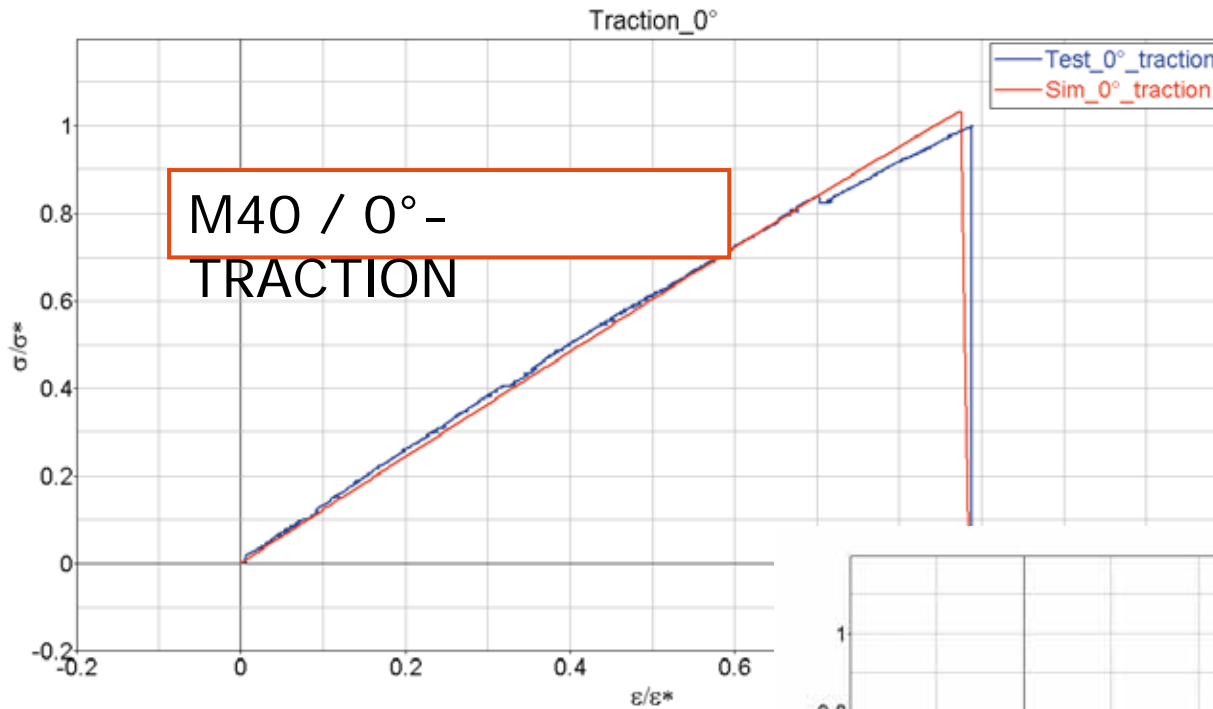


T300 / 90° - COMPRESSION

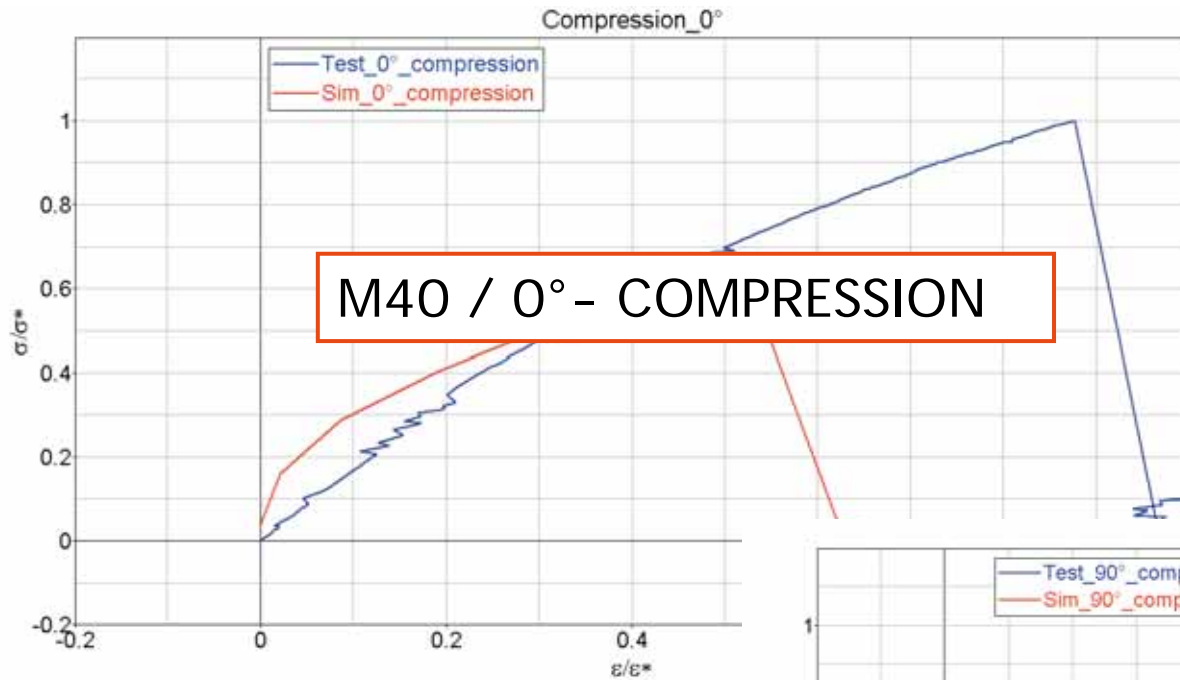
1. Introduzione alle problematiche
2. Tipo di analisi
3. Danneggiamento
4. Prove di caratterizzazione
5. Modello di materiale Law 25, Radioss
6. Identificazione dei parametri
7. Esempio 1: fabric, T300
8. Esempio 2: unidirezionale M40
9. Conclusioni



Esempio 2: unidirezionale, M40

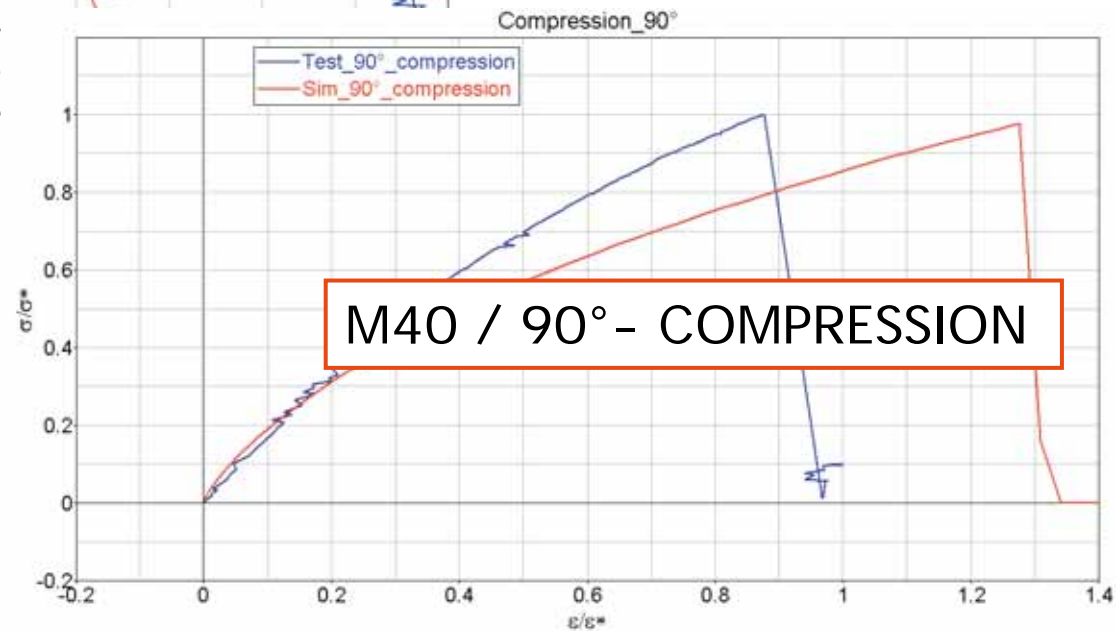


Esempio 2: unidirezionale, M40



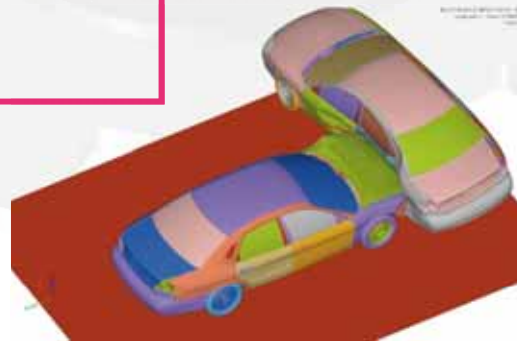
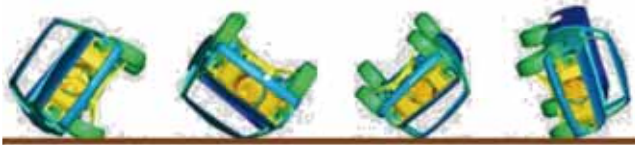
M40 / 0° - COMPRESSION

Wpmax 0°-compression
>> 90°compression ☒
compromise!



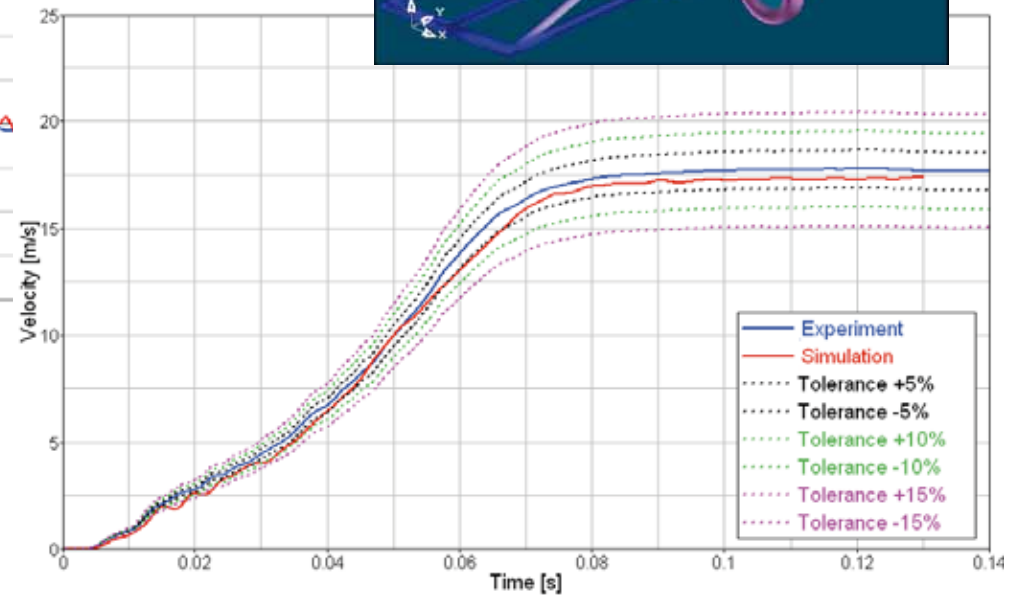
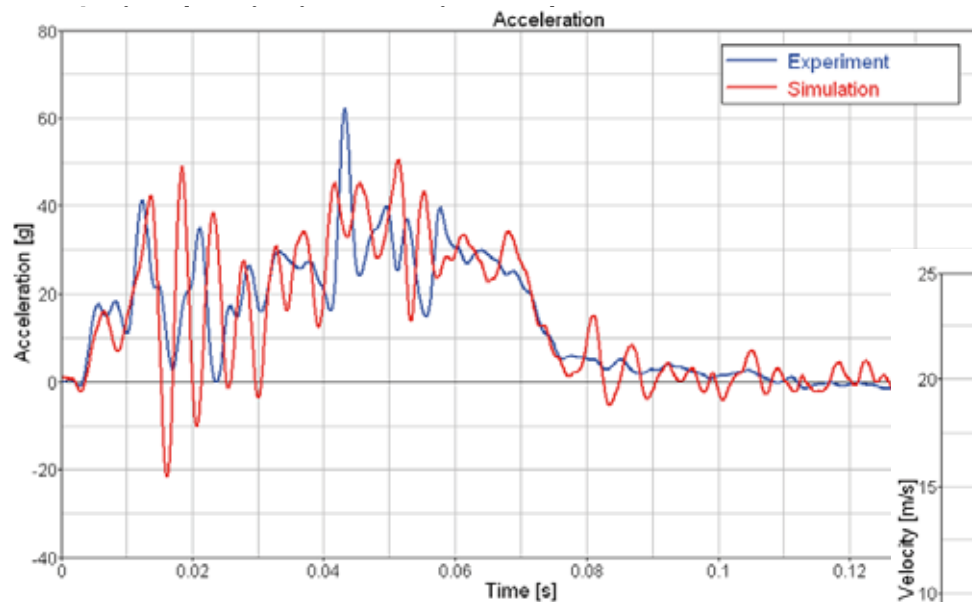
M40 / 90° - COMPRESSION

1. Introduzione alle problematiche
2. Tipo di analisi
3. Danneggiamento
4. Prove di caratterizzazione
5. Modello di materiale Law 25, Radioss
6. Identificazione dei parametri
7. Esempio 1: fabric, T300
8. Esempio 2: unidirezionale M40
9. Conclusioni



FULL-SCALE CRASH TEST SIMULATION

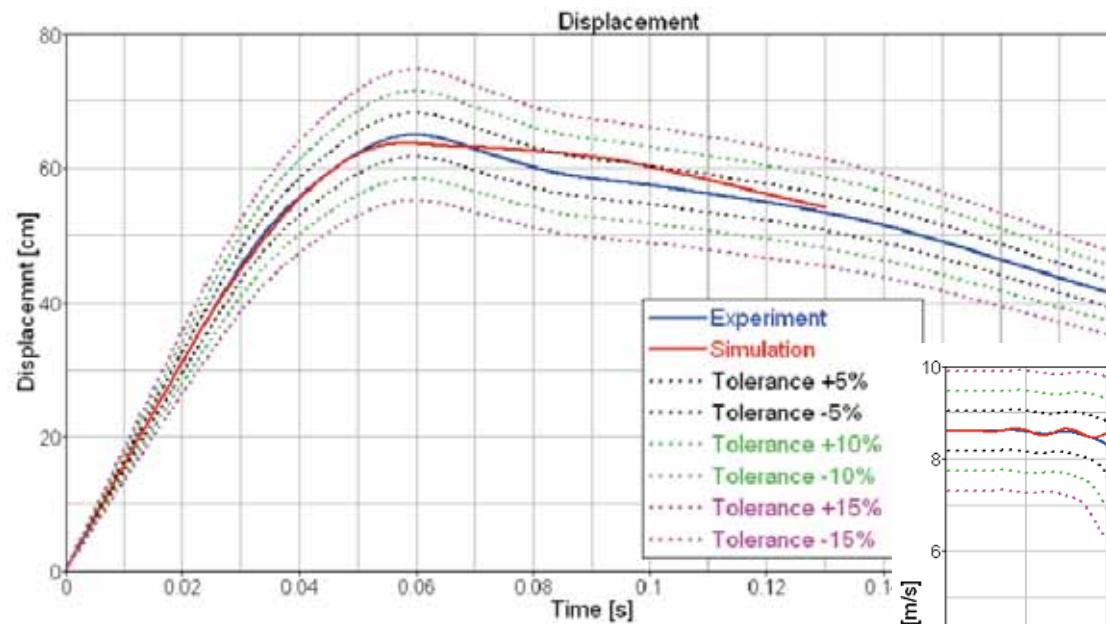
- I materiali caratterizzati con questa tecnica sono stati introdotti in un modello full-scale
- Il modello è stato creato per la simulazione di crash test su vettura completamente allestita



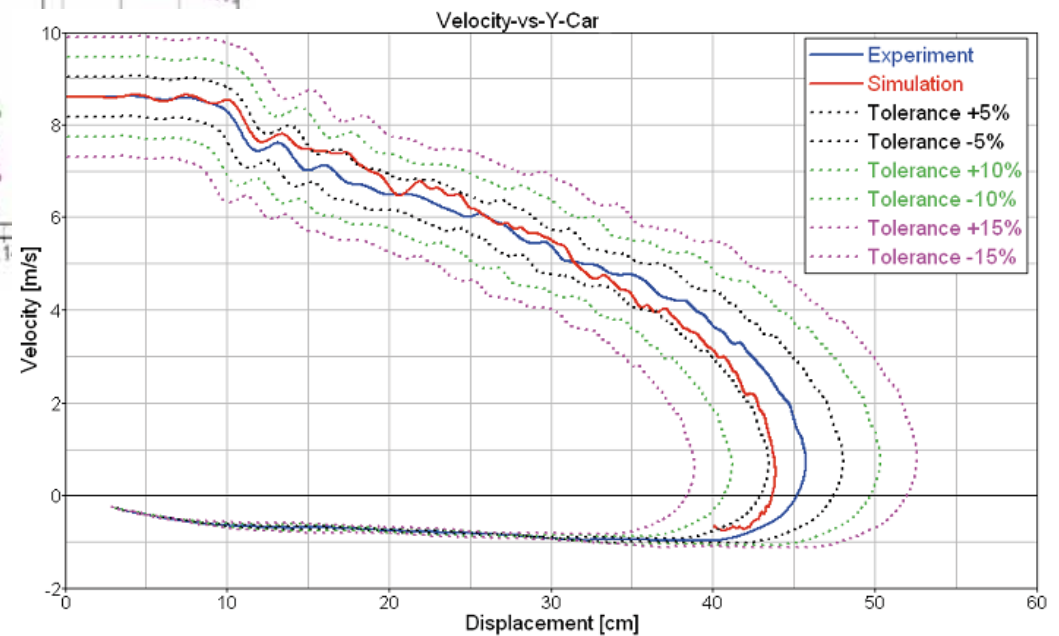
Errore della
simulazione ~ 5%
(sulle variabili
globali)

FULL-SCALE CRASH TEST SIMULATION

- La simulazione riesce anche a cogliere l'assorbimento globale di energia che nella realtà avviene attraverso i meccanismi di danneggiamento dei compositi



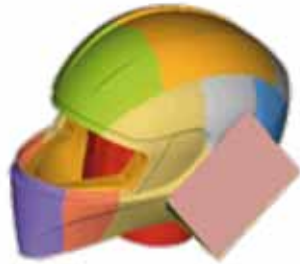
Errore della simulazione ~ 5%



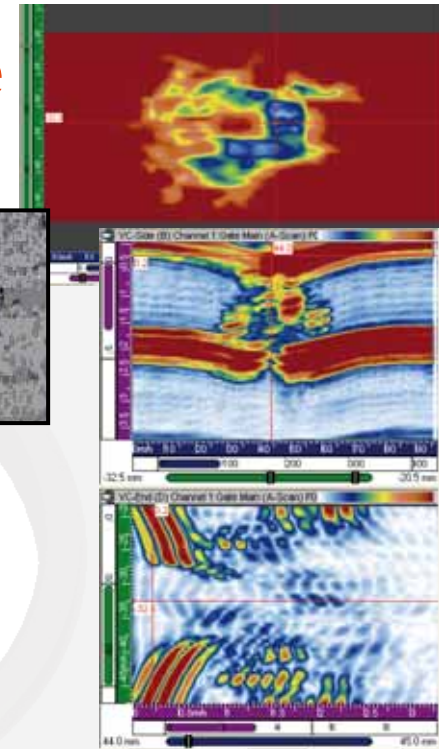
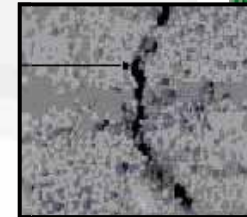
Domande & Considerazioni?



Grazie dell'attenzione



Ing. Laura Ferrero
laura.ferrero@amet.it
+39-011.9007.754



AMET Italy
Environment Park
via Livorno, 60
10144 Torino - Italy

