



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

1° giornata di studio Xtrema

ANALISI NUMERICA PER LA PREVISIONE DEL LIMITE BALISTICO DELLE PROTEZIONI IN POLICARBONATO

M. Sasso
M. Utzeri



Il principale fattore di rischio per l'operatore è l'**eiezione di parti** metalliche ad **alta velocità**.

$$V_C = \pi n D$$



Dalla necessità dell'operatore di poter supervisionare la lavorazione in corso



Policarbonato



DESCRIZIONE TEST SECONDO NORMA



APPROCCIO ALTERNATIVO



MODELLO DEL MATERIALE



ANALISI NUMERICHE 2D



ANALISI NUMERICHE 3D

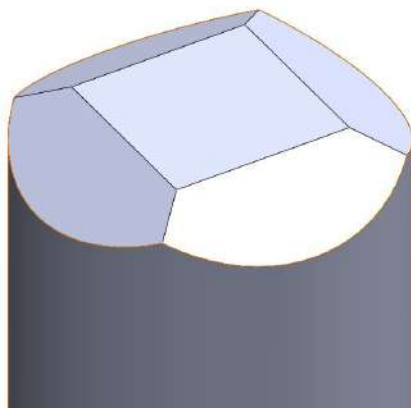
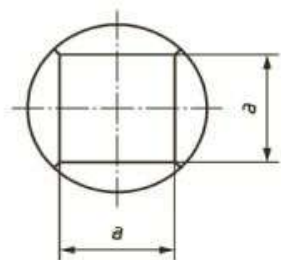
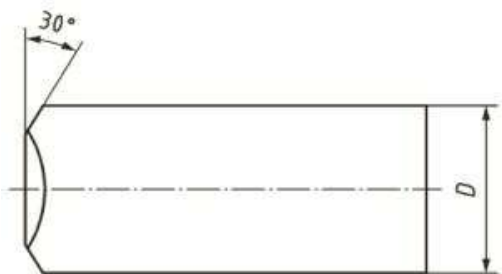
Nelle norme sono specificati i **parametri per i test** come:

- **Impatto perpendicolare e centrale** su lastra piana di dimensioni 500x500 mm
- Forma, dimensione e materiale penetratore
- Velocità di impatto

Penetratore tronco di piramide

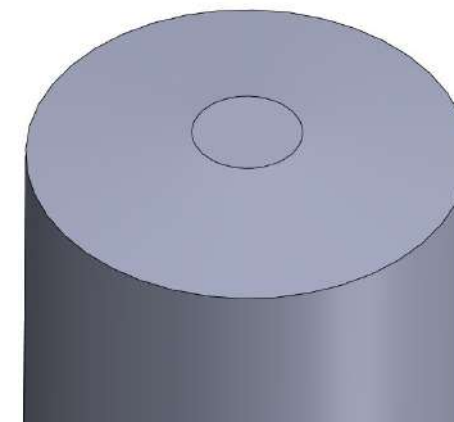
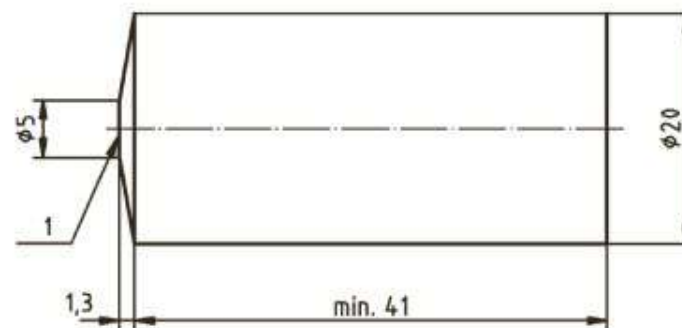
UNI EN ISO 14120:2015

UNI EN ISO 23125:2015



Penetratore tronco di cono

UNI EN ISO 16090-1:2019



Piastra in policarbonato con dimensioni **500x500x4** mm; Proiettili in acciaio con diametro **20 mm** e peso **0,1 Kg**



CURVA DI RECHT&IPSON PER L'IDENTIFICAZIONE DEL LIMITE BALISTICO

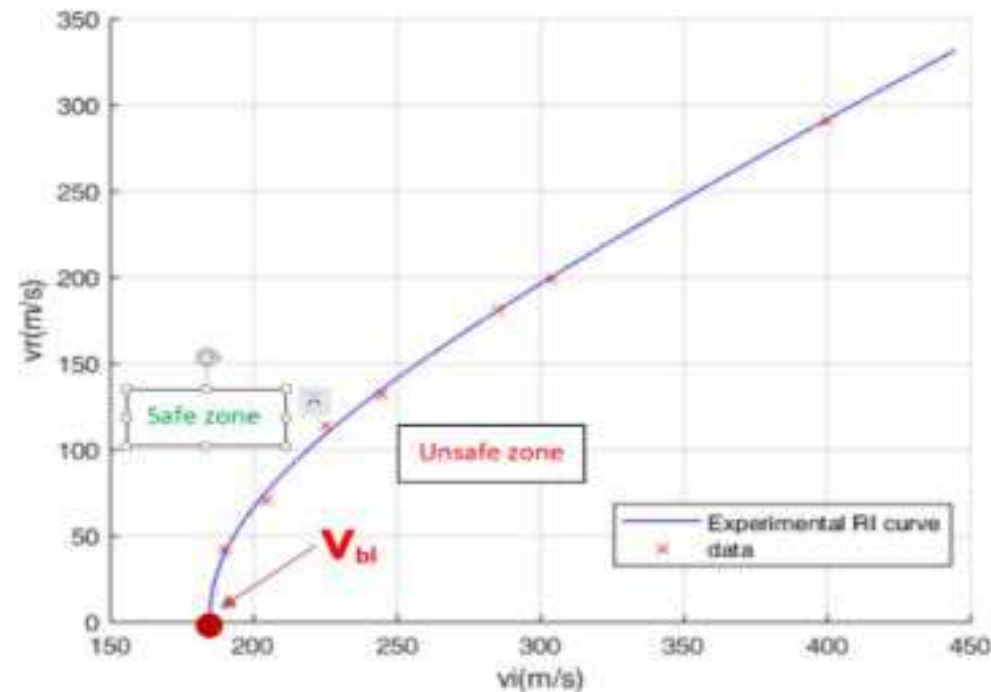
È possibile stimare il limite balistico attraverso una equazione empirica.

$$v_r = a(v_i^p - v_{bl}^p)^{\frac{1}{p}}$$

Velocità
residua

Velocità
impatto

Limite
balistico



Limite Balistico ricavato da una regressione ai minimi quadrati dei dati sperimentali

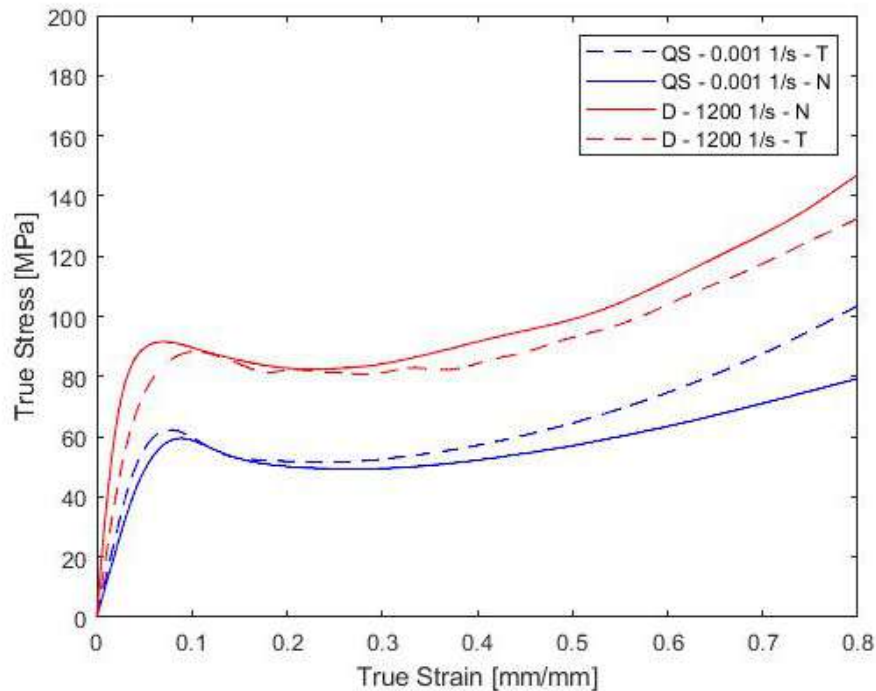
a e p parametri adimensionali

Teoricamente:
$$a = \frac{m_p}{m_p + m_{pl}}$$



Caratterizzazione del materiale

Prove di compressione @ Unvpm



ARMY RESEARCH LABORATORY



Mechanical Response of Polycarbonate with Strength Model Fits

by Ajmer Dwivedi, Jermaine Bradley, and Daniel Casem

ARL-TR-5899

February 2012



Contents lists available at ScienceDirect

International Journal of Solids and Structures

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijsoistr

Experimental investigation and modeling of the tension behavior of polycarbonate with temperature effects from low to high strain rates

Kan Cao, Yang Wang*, Yu Wang

J MATER SCI 41 (2006) 1683–1690

Shock and release of polycarbonate under one-dimensional strain

J. C. F. MILLETT*

Defence Academy of the United Kingdom, Cranfield University, Shrivenham, Swindon, SN6 8LA, U K

E-mail: j.c.f.millett@cranfield.ac.uk

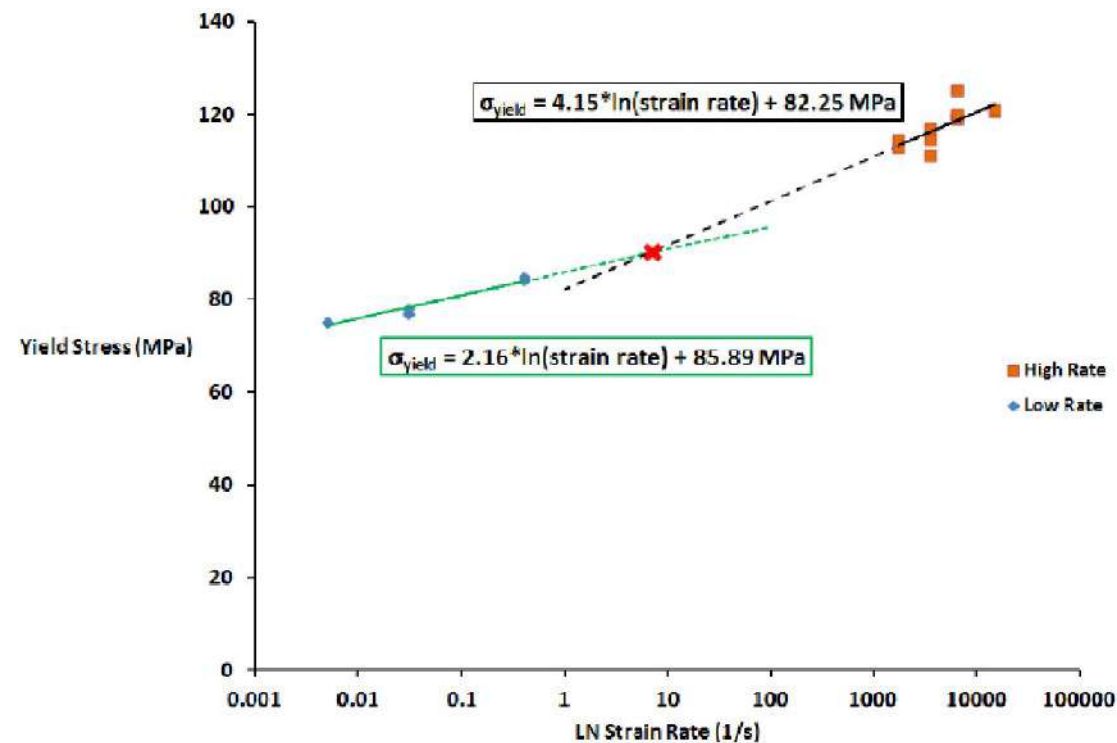
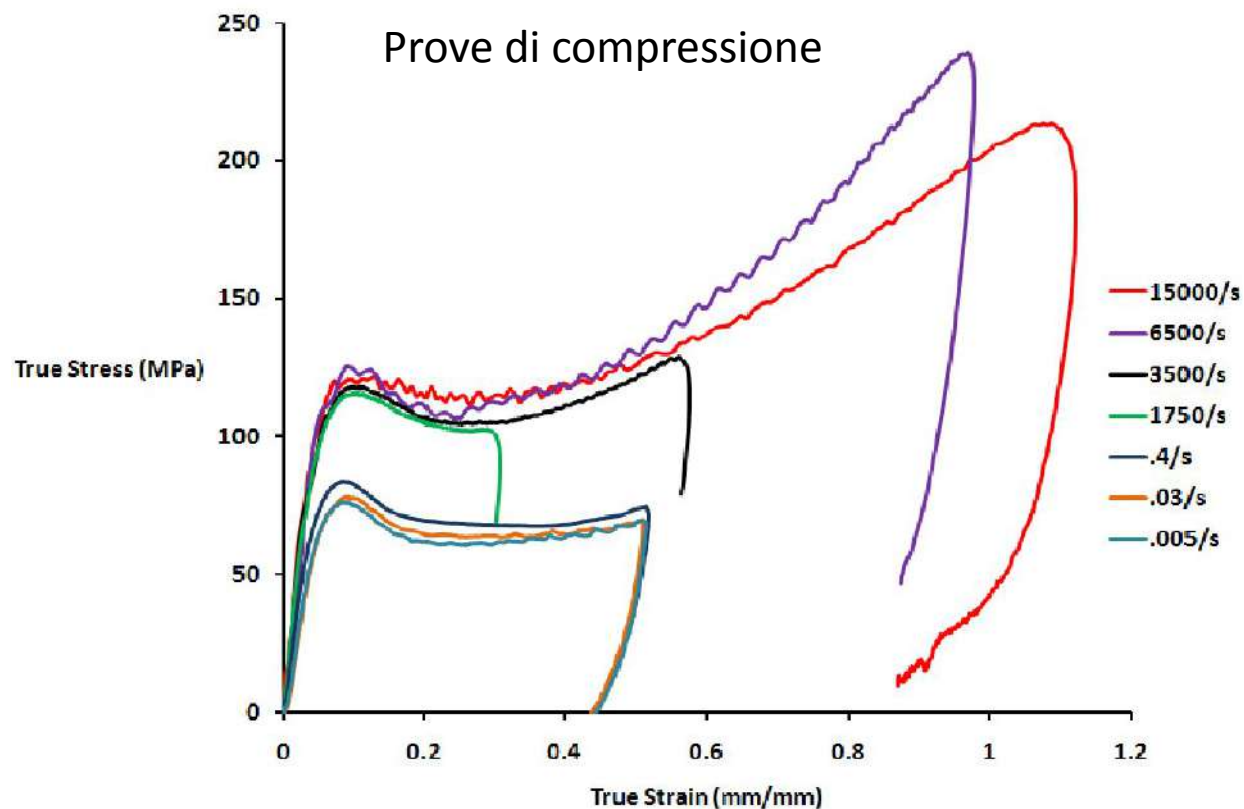
N. K. BOURNE

School of Aerospace, Mechanical and Civil Engineering, University of Manchester, Sackville Street, Manchester, M60 1QD, U K

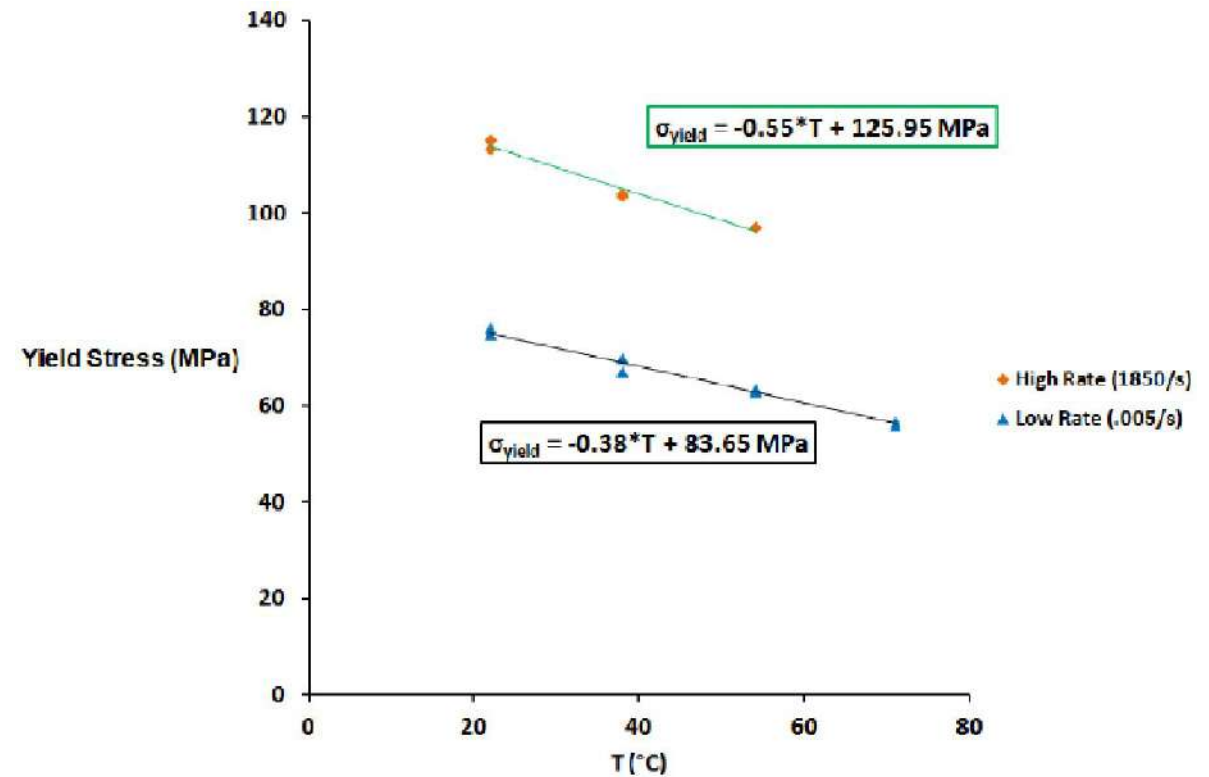
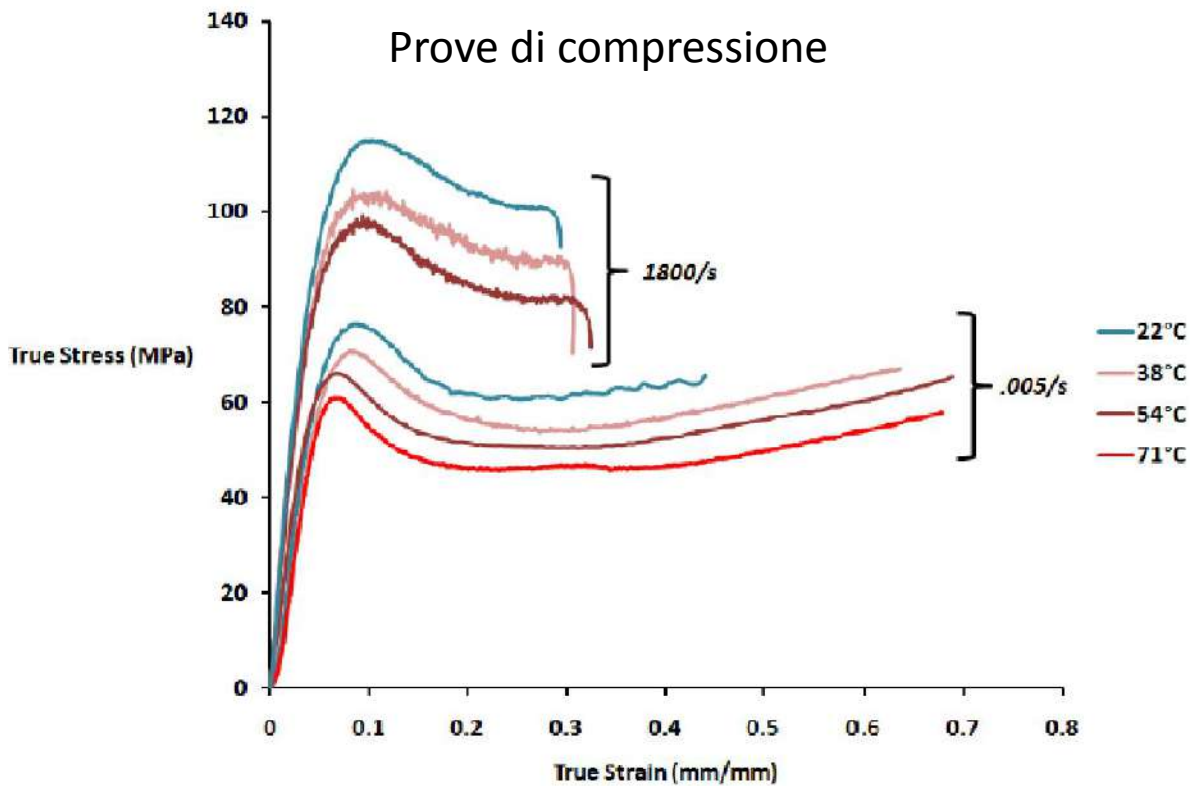


Caratterizzazione del materiale Dwivedi-Braley-Casem

Prove di compressione



Caratterizzazione del materiale Dwivedi-Braley-Casem



Caratterizzazione del materiale Dwivedi-Braley-Casem

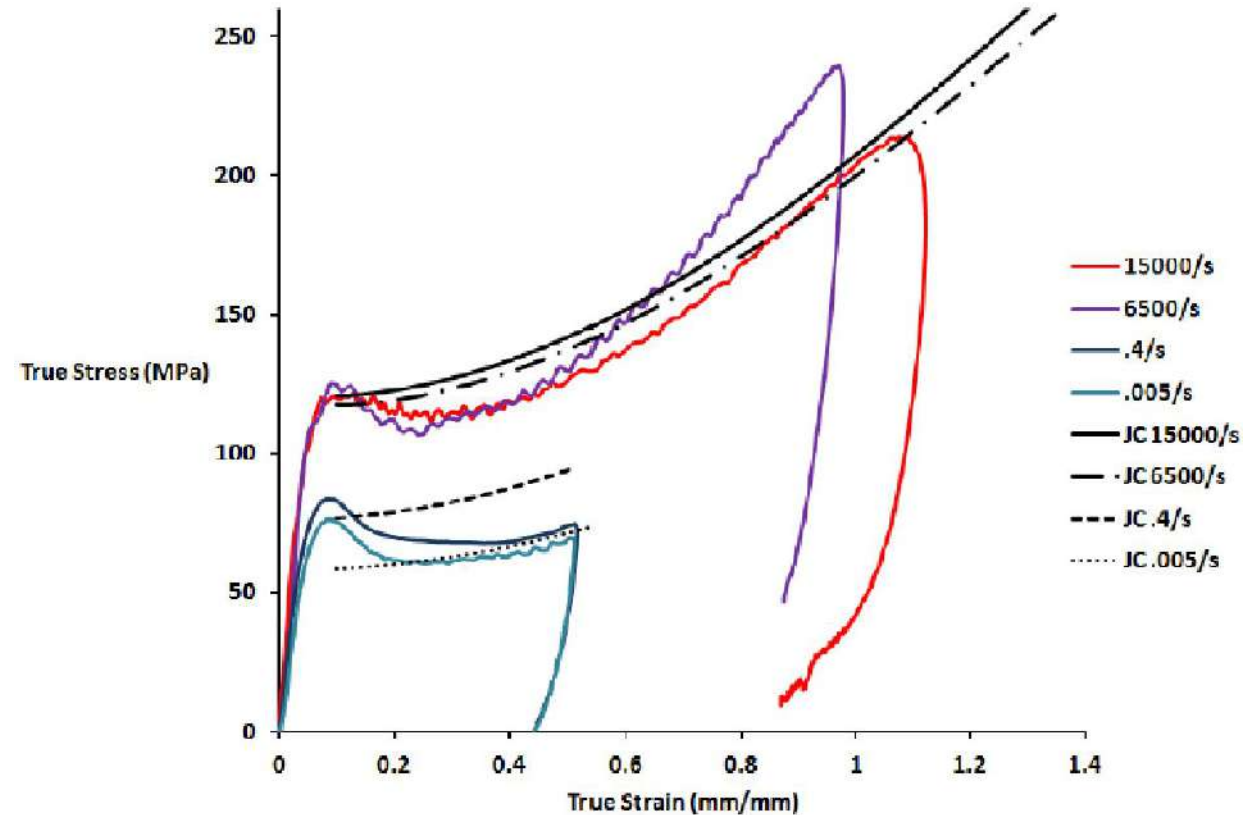
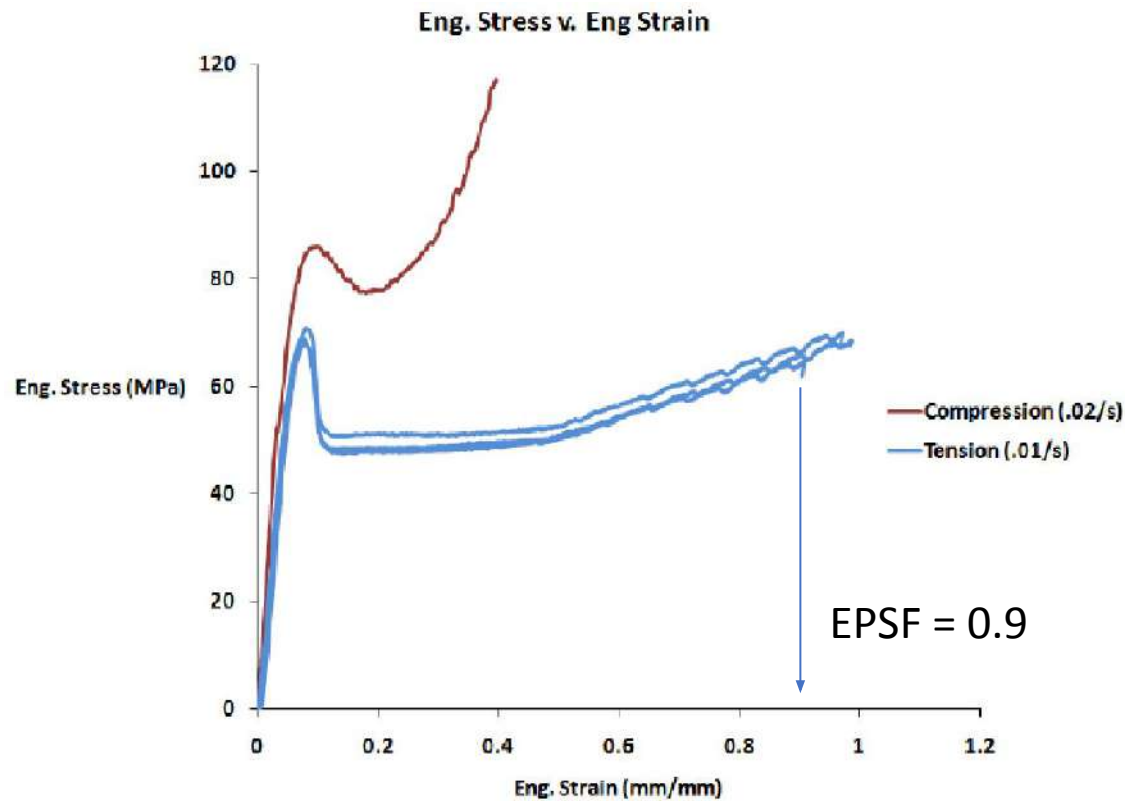


Table 2. JC parameters.

$A=$	80	MPa
$B=$	75	MPa
$C=$	0.052001	—
$m=$	0.548	—
$n=$	2	—
$T_{\text{melt}}=$	562	K
$\beta=$	0.5	—
$\rho=$	1220	kg/m ³
$C_v=$	1.3	KJ/(kg K)
$\dot{\epsilon}_0 =$	1.0	1/s

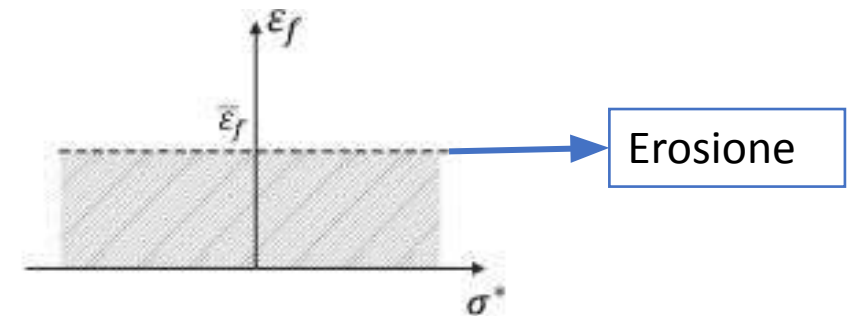
Caratterizzazione del materiale Dwivedi-Braley-Casem



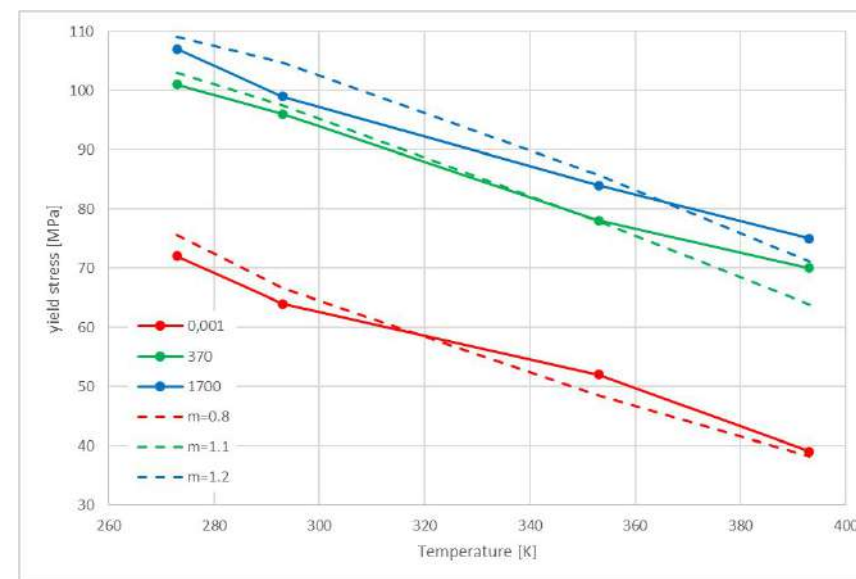
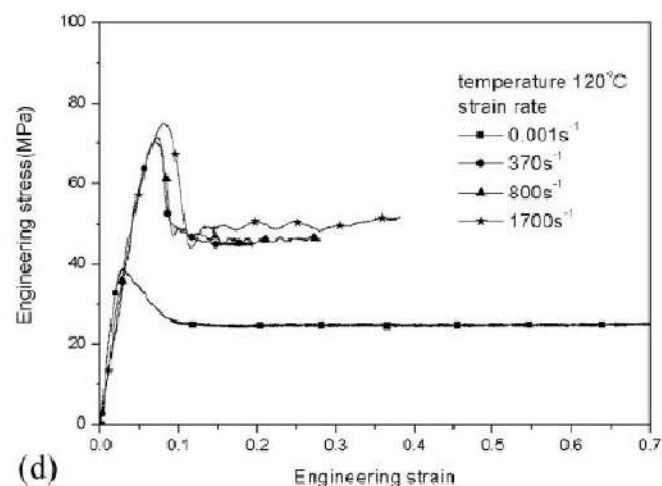
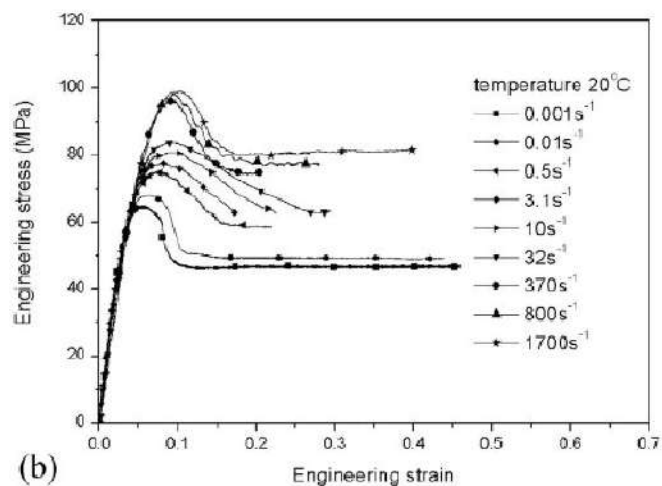
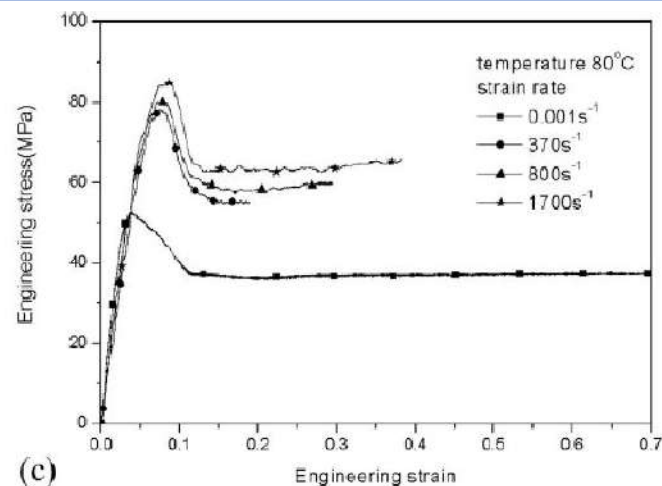
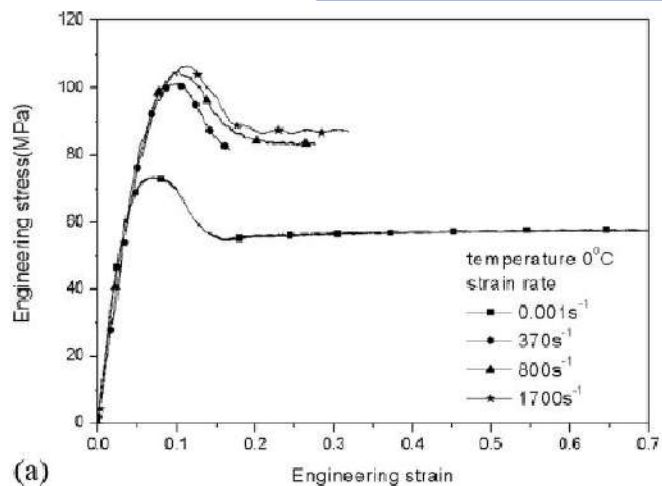
Modello di frattura

Deformazione plastica equivalente a rottura (EPSF)

$$\varepsilon_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}(1+\nu')} \left[(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{xz}^2 + \gamma_{yz}^2) \right]^{1/2}$$



Caratterizzazione del materiale, Cao-Wang-Wang



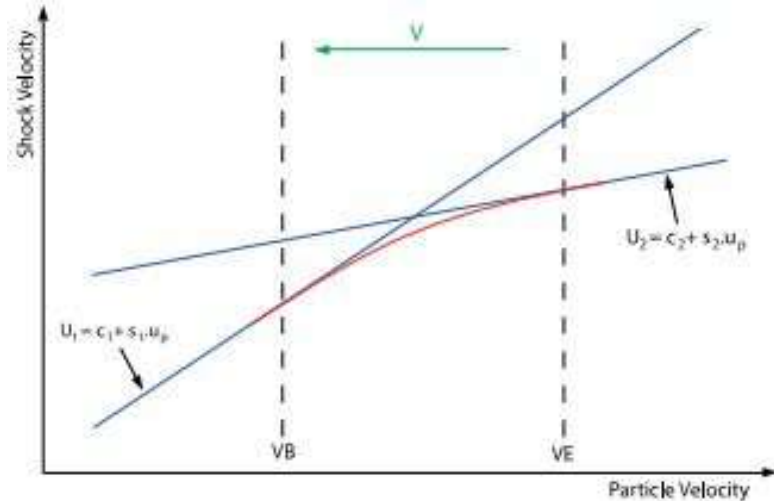
$m = 0.8$



Caratterizzazione del materiale, Millet - Bourne

EOS

$$P = \begin{cases} \frac{\rho_0 C_0^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{1 + \mu} - S_3 \frac{\mu^3}{1 + \mu} \right]^2} + (\gamma_0 + a \mu) E & \mu > 0 \\ \rho_0 C_0^2 \mu + (\gamma_0 + a \mu) E & \mu < 0 \end{cases}$$



Bilinear

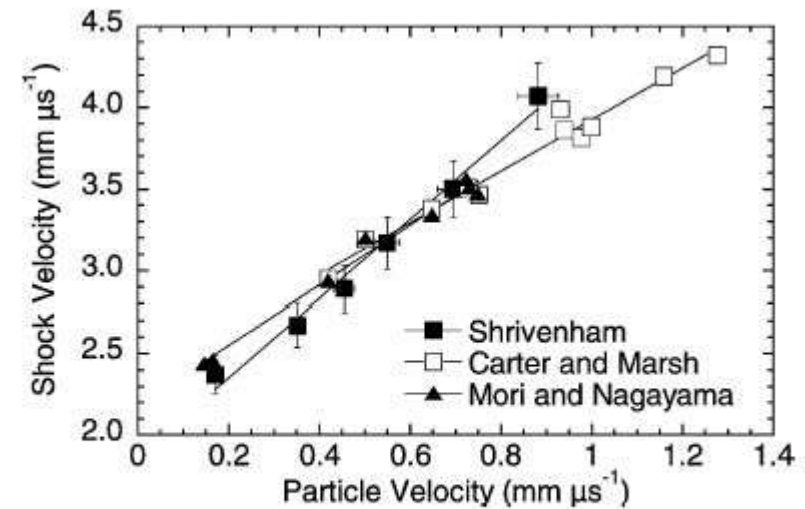


Figure 3 Shock velocity versus particle velocity for polycarbonate. We have also included the previous data from Carter and Marsh [9] and Mori and Nagayama [20].

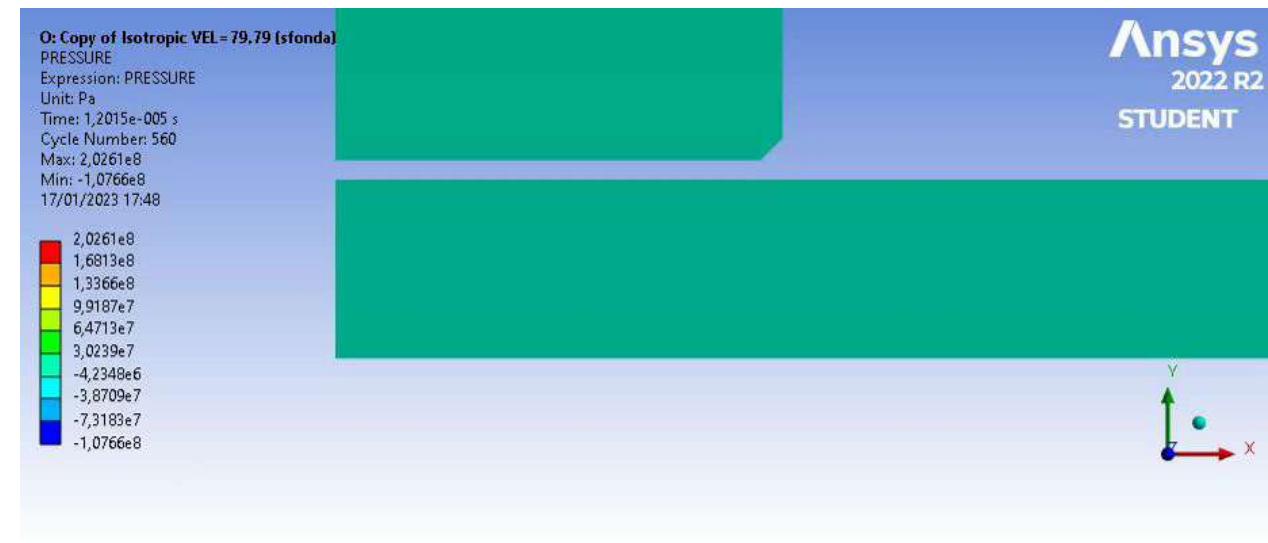


Caratterizzazione del materiale, Millet - Bourne

Spessore 4 mm

Shock EOS bilinear

Isotropic elasticity



Vi [m/s]	Vr EOS	Vr isotropic
55	N.p.	N.p.
60	27.6	28.9
75	57.1	57.9



Caratterizzazione del materiale, Millet - Bourne

Shock EOS bilinear

Spessore 12 mm

Isotropic elasticity



Vi [m/s]	Vr EOS	Vr isotropic
75	N.p.	N.p.
85	59	28.9
95	71	57.9
105	84.6	86.9

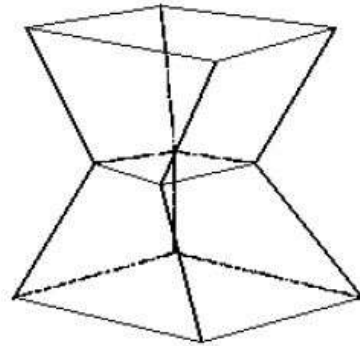


Hourglass control

Kosloff-Fzazier

$$F_H = C_H \rho c V^{2/3} \cdot f_{KF}(\dot{X})$$

F=funzione di velocità nodali
allineate con il modo a clessidra



Flanagan-Belytschko

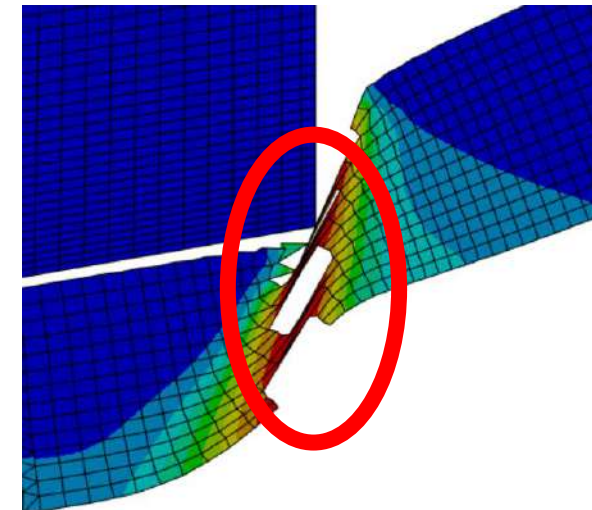
$$F_H = C_H \rho c V^{2/3} \cdot f_{FB}(\dot{X})$$

F=funzione ortogonale alle velocità
e al campo di moto rigido

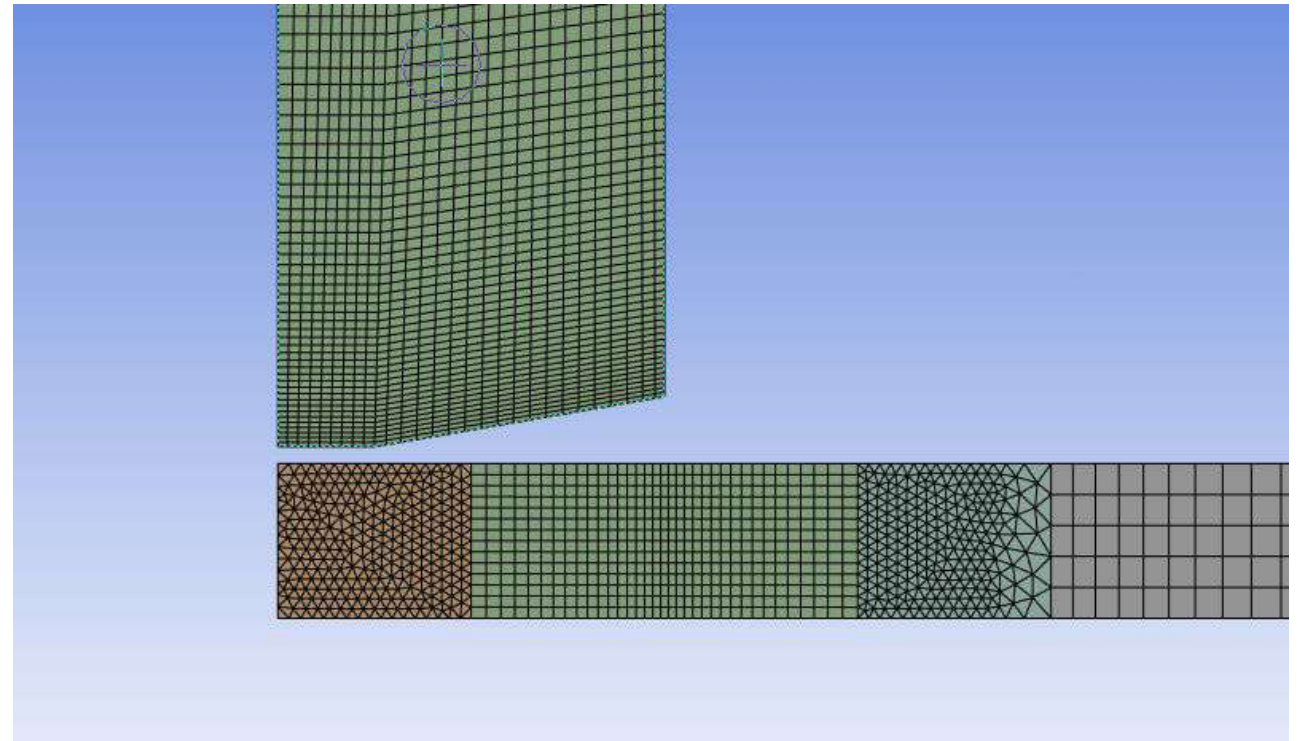
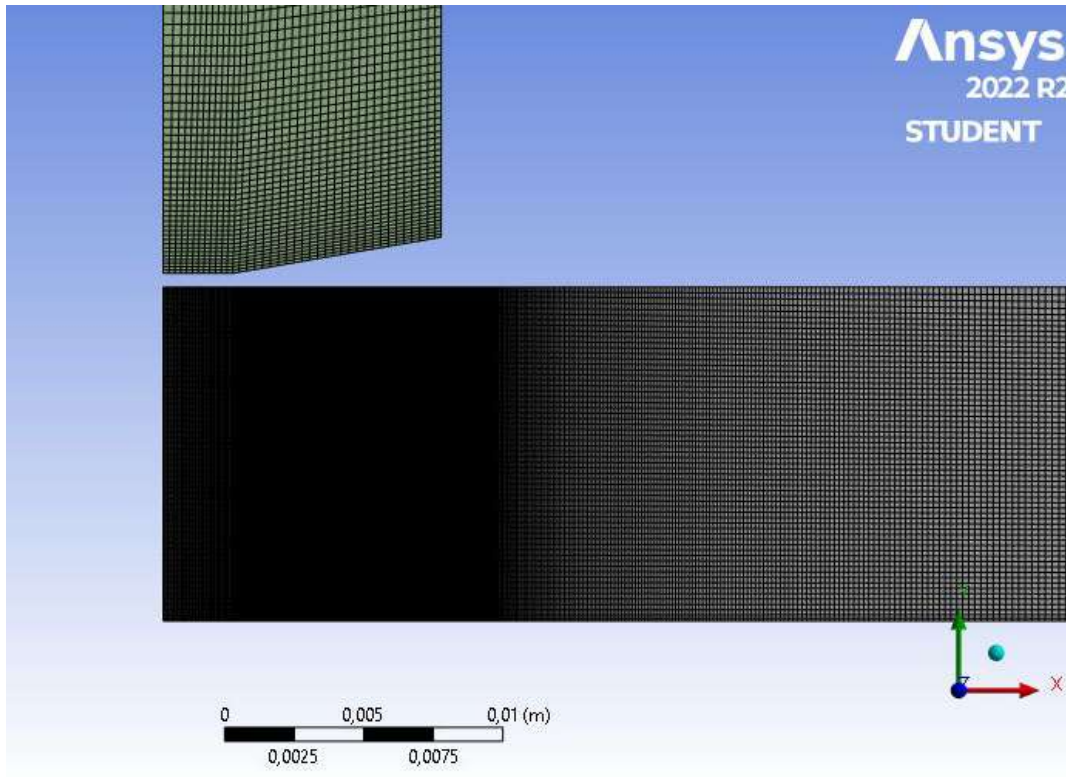
Erosione

Geometric Strain Limit: Viene utilizzato quando sono previste deformazioni eccessive e impedisce alla soluzione di arrestarsi a causa forti deformazioni dell'elemento.

Material Failure: Al fine di ridurre i tempi di elaborazione, consente di rimuovere elemento con un danno pari a 1



Penetratore Tronco di Cono, Modello assialsimmetrico



Analisi di sensibilità dei parametri Johnson-Cook e EPSF

$$\sigma_{eq} = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C * \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^*m)$$

Modello assialsimmetrico

EPSF

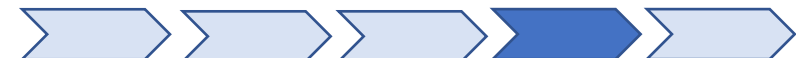
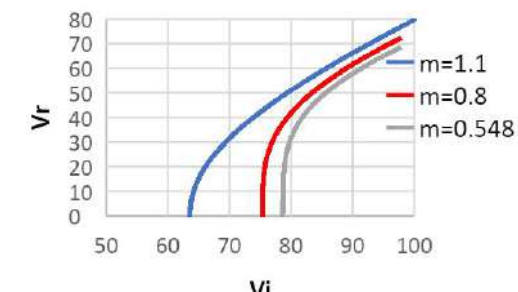
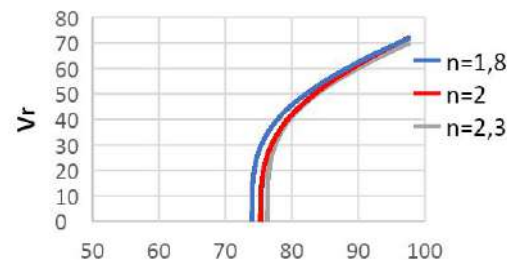
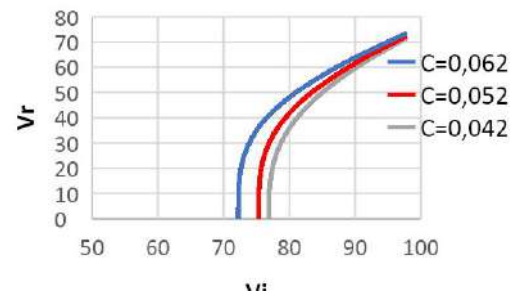
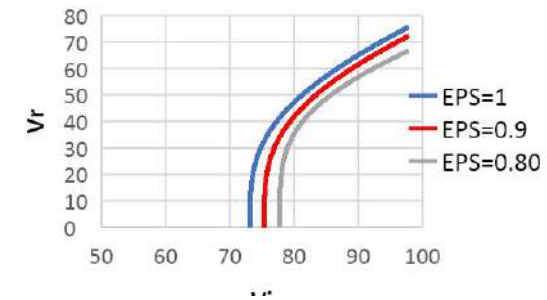
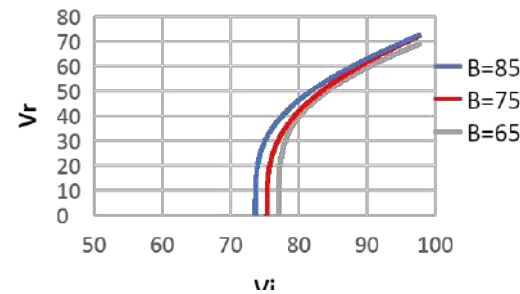
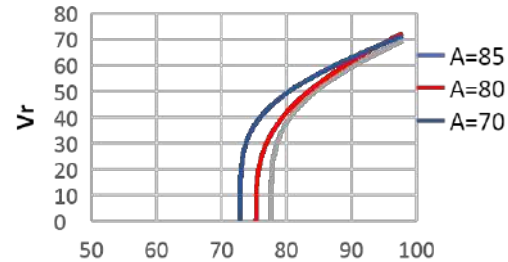
A = Limite elastico del materiale

B = costanti caratteristiche della parte plastica

n = costanti caratteristiche della parte plastica

C = sensibilità alla velocità di deformazione

m = costante del materiale



Analisi di sensibilità dei parametri Johnson-Cook e EPSF

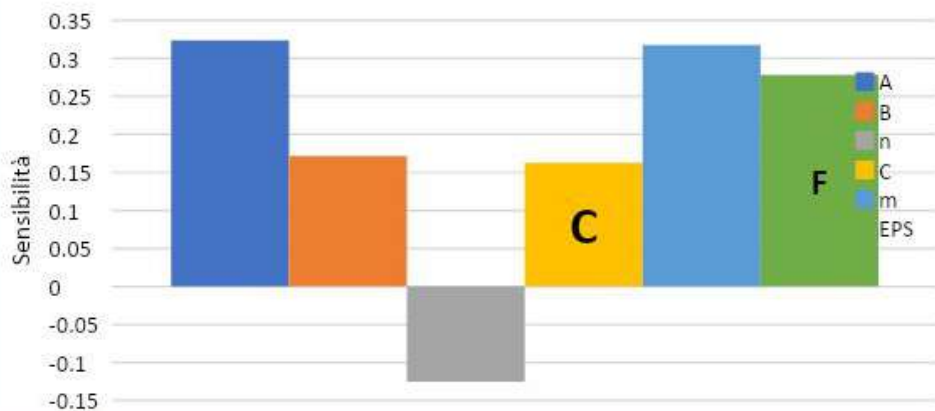
I **parametri** che maggiormente governano la variazione del **limite balistico** sono:

- A
- m
- EPSF

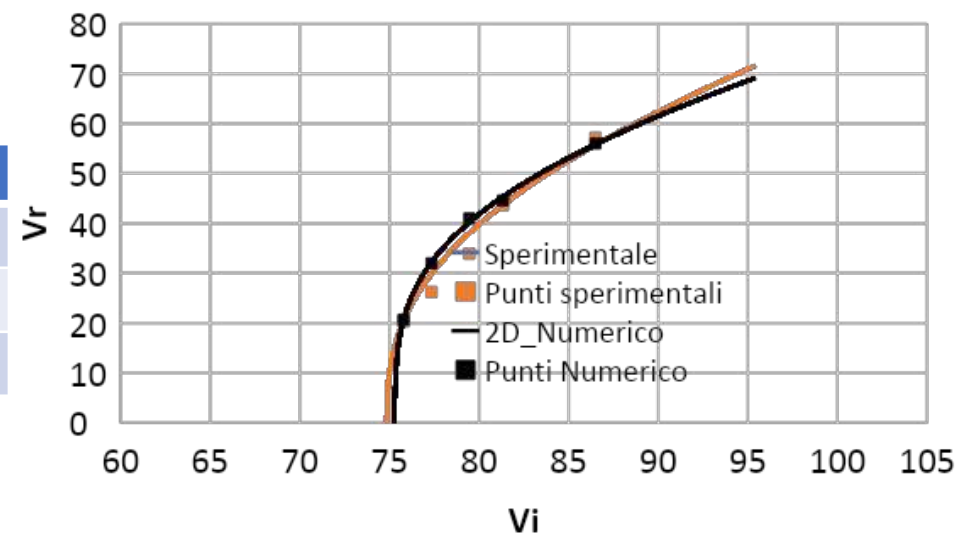


Parametro	Valore
A [MPa]	80
B [MPa]	75
n	2
C	0,052
m	0,8
EPSF	0,9

Analisi sensibilità dei parametri



Parametro	Sperimentale	Numerico
a	1	0,868
p	2,62	3,349
Vbl	74,9	75,32



Penetratore Tronco di Cono, Modello $\frac{1}{4}$, analisi di sensibilità alla mesh

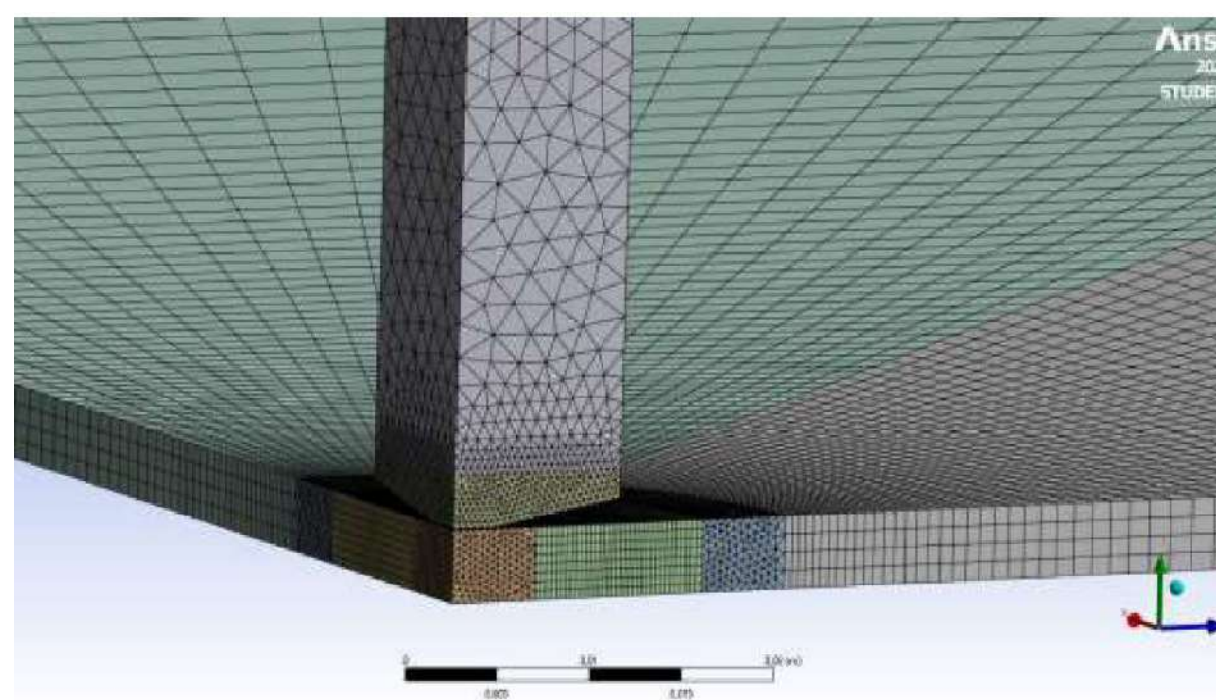


Figura 5.31 Mesh grossolana

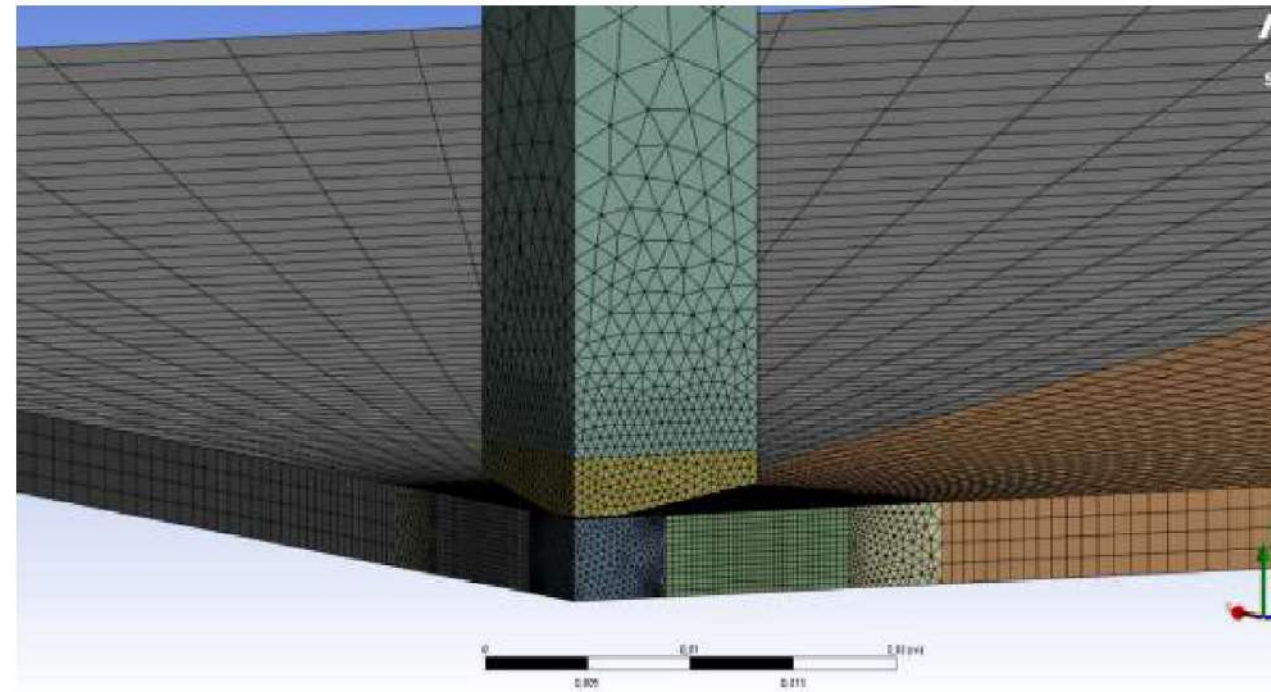
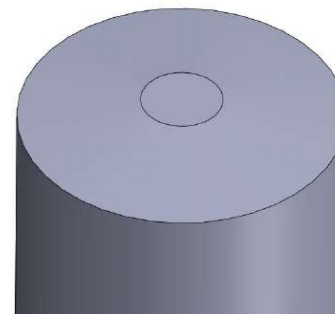
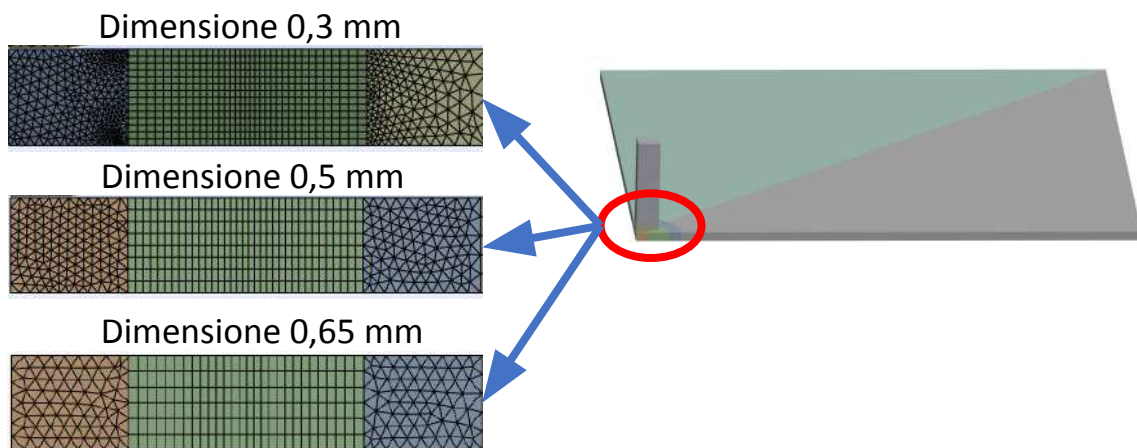


Figura 5.30 Mesh fine

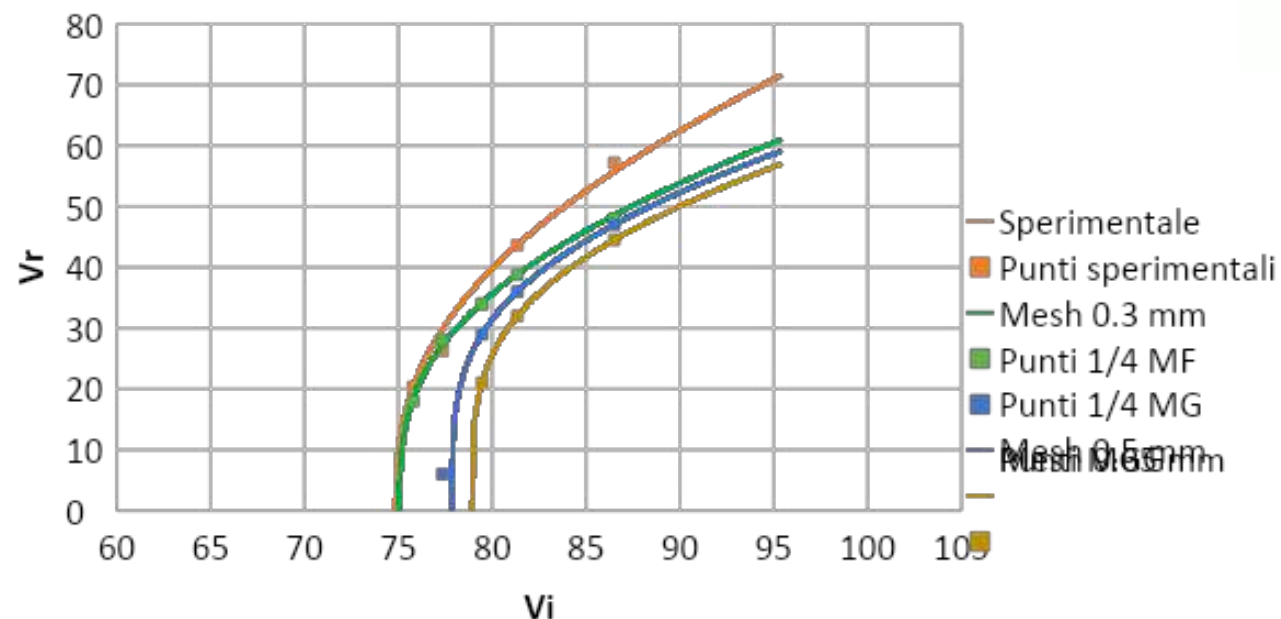
Modello	Elementi	Nodi
Mesh Fine	217976	99294
Mesh Grossolana	118429	59388



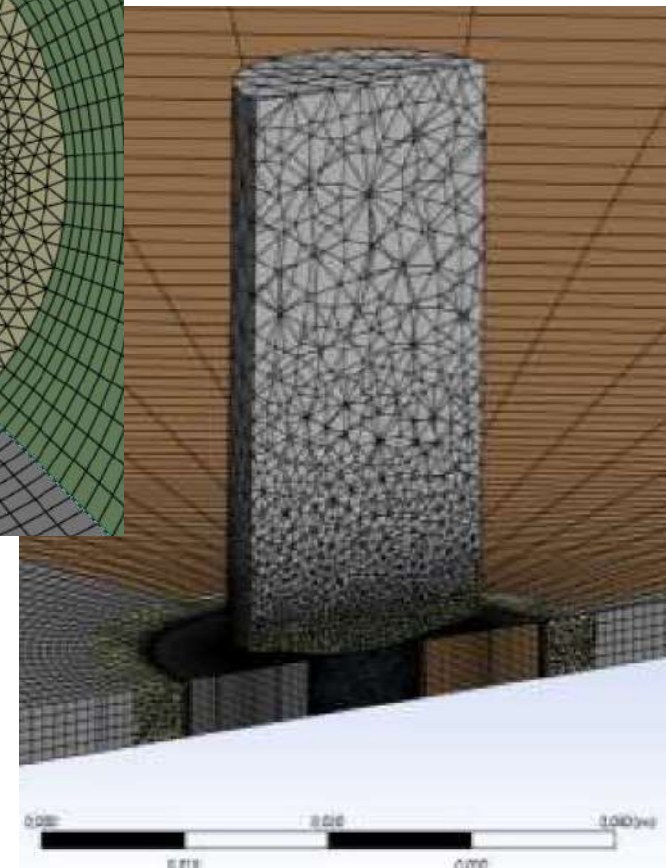
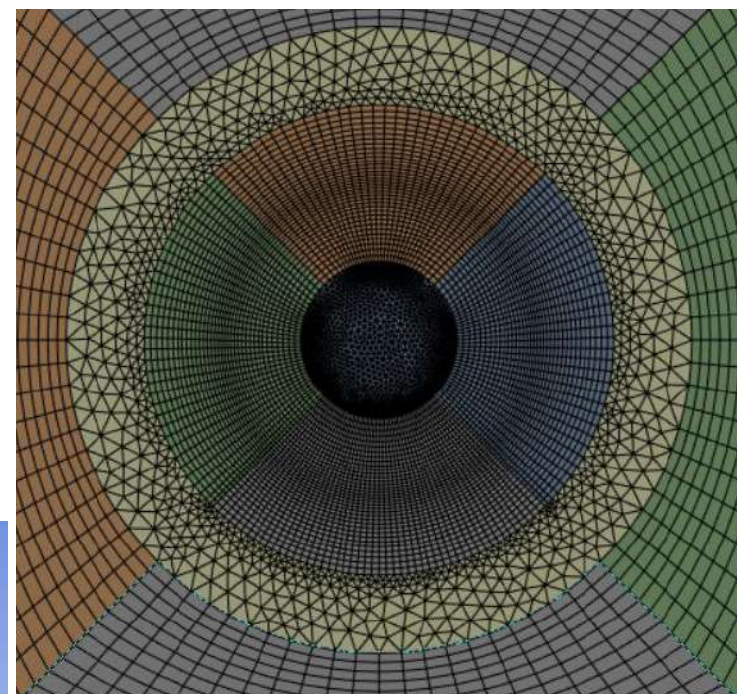
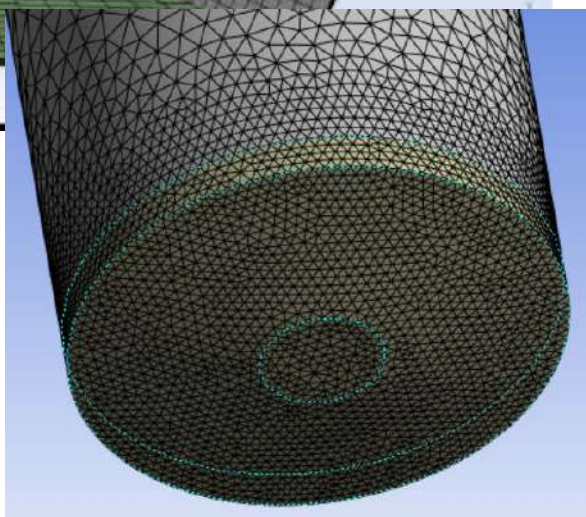
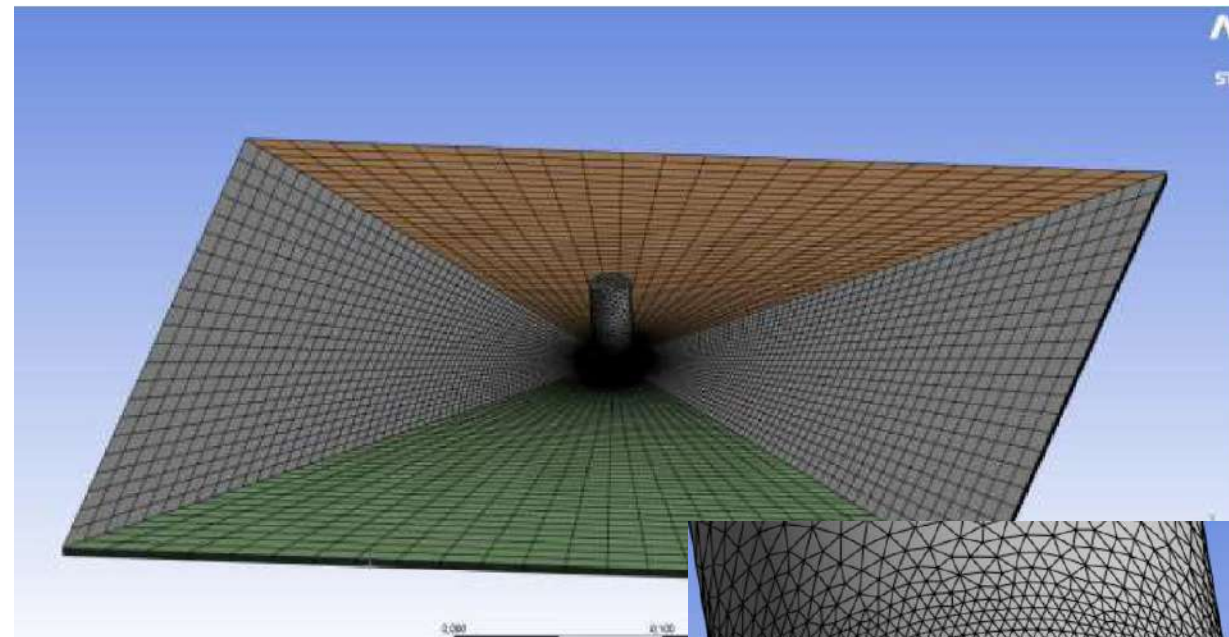
Penetratore Tronco di Cono, Modello $\frac{1}{4}$, analisi di sensibilità alla mesh



- L'analisi svolta su $\frac{1}{4}$ di modello consente di ridurre i tempi di calcolo.
- La mesh più grossa tende a irrigidire l'elemento, comportando un assorbimento maggiore di energia.
- Migliorando il livello della discretizzazione si riesce ad approssimare meglio il limite balistico della protezione

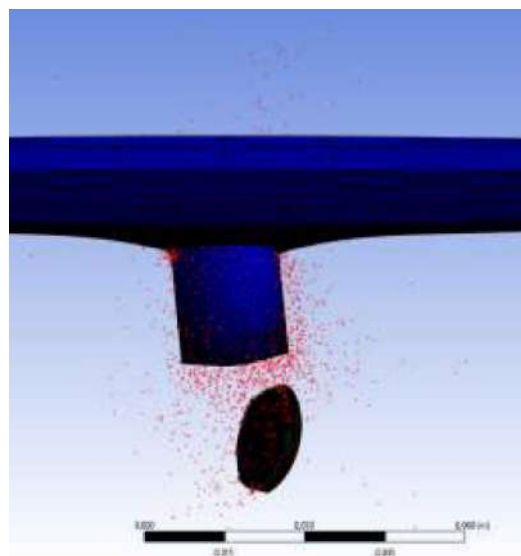
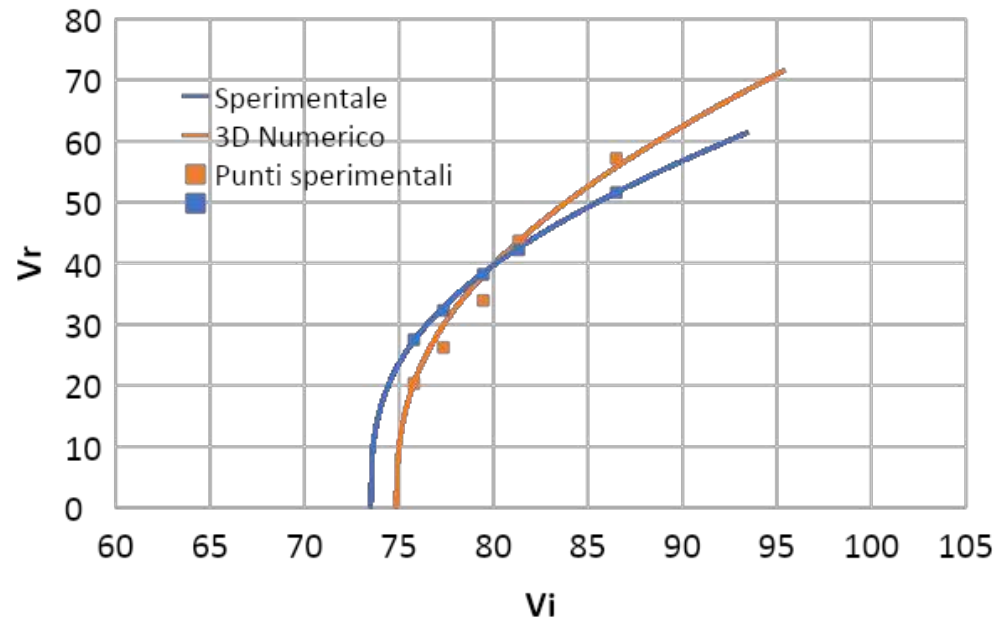
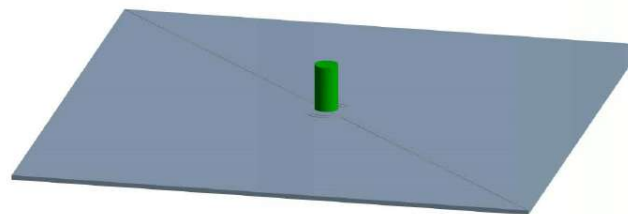


Penetratore Tronco di Cono, Modello **completo**, mesh **fine**

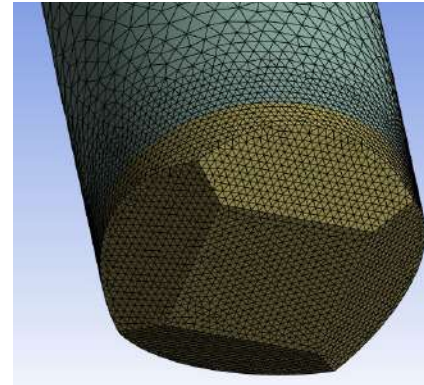
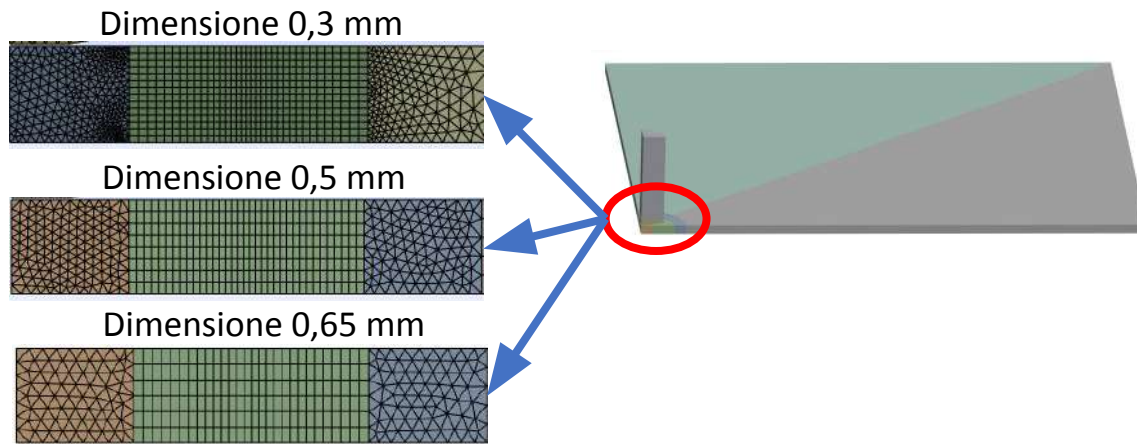


Penetratore Tronco di Cono, Modello **completo**, mesh **fine**

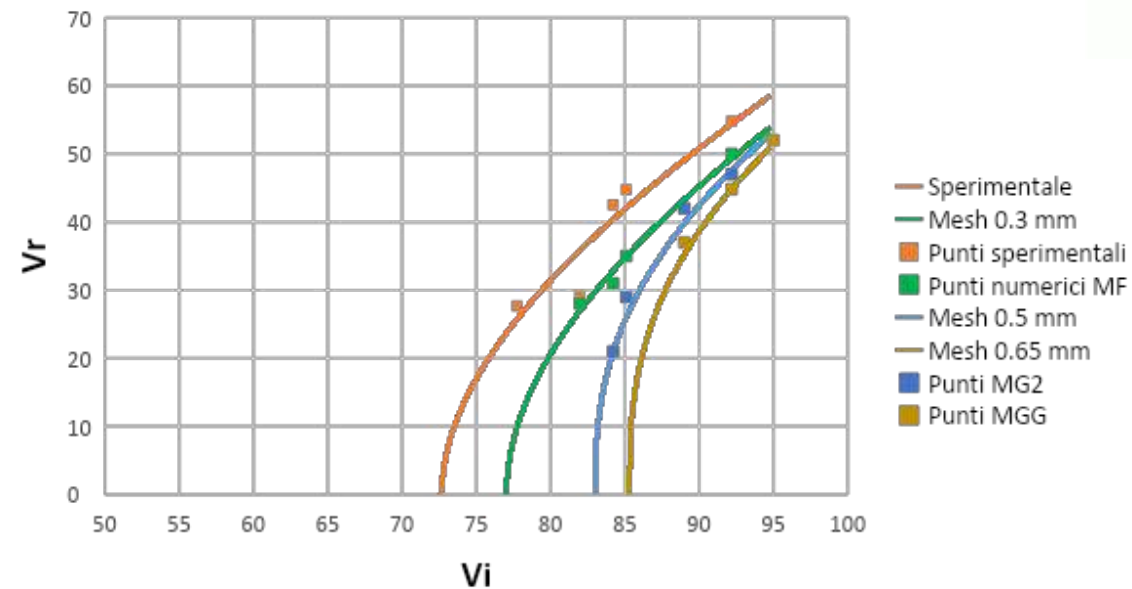
- Errore nel calcolo del limite balistico pari a 1,8%.
- Attraverso il modello 3D è possibile prevedere possibili rotazioni del proiettile



Penetratore Tronco di Piramide, Modello $\frac{1}{4}$, analisi di sensibilità alla mesh

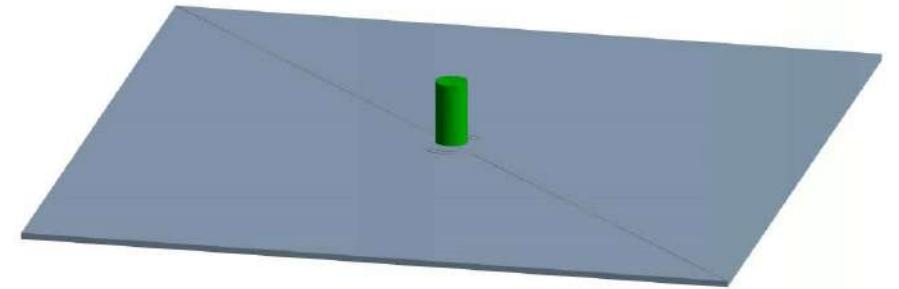
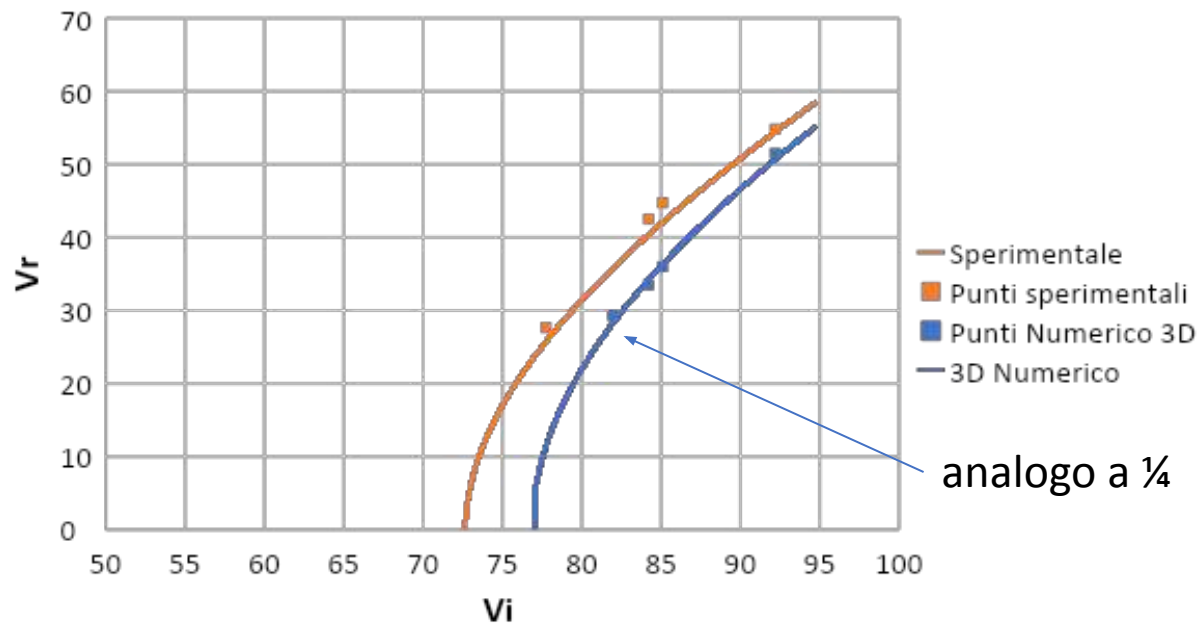


- L'analisi svolta su $\frac{1}{4}$ di modello consente di ridurre i tempi di calcolo.
- La mesh più grossa tende a irrigidire l'elemento, comportando un assorbimento maggiore di energia.
- Migliorando il livello della discretizzazione si riesce ad approssimare meglio il limite balistico della protezione

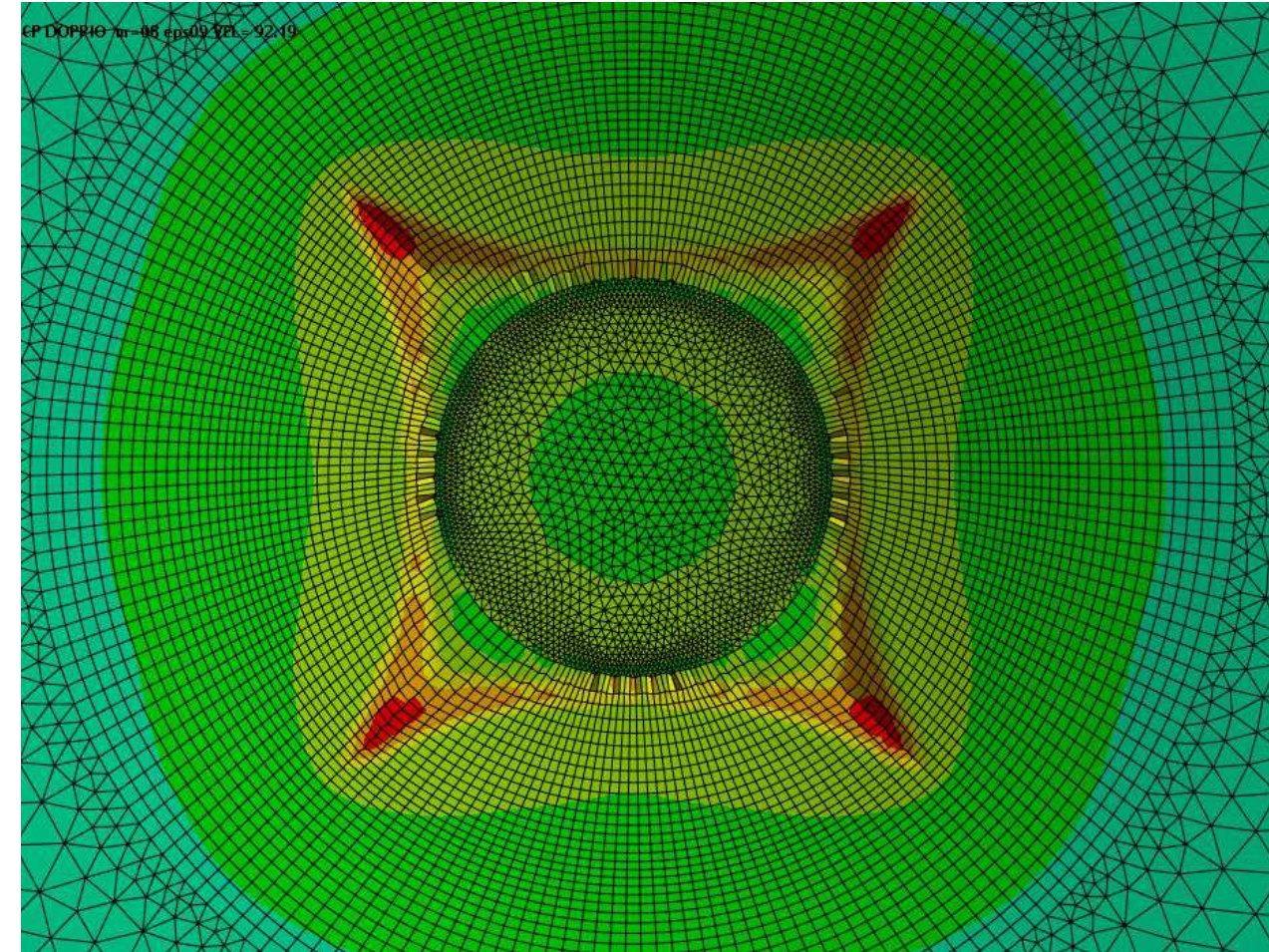
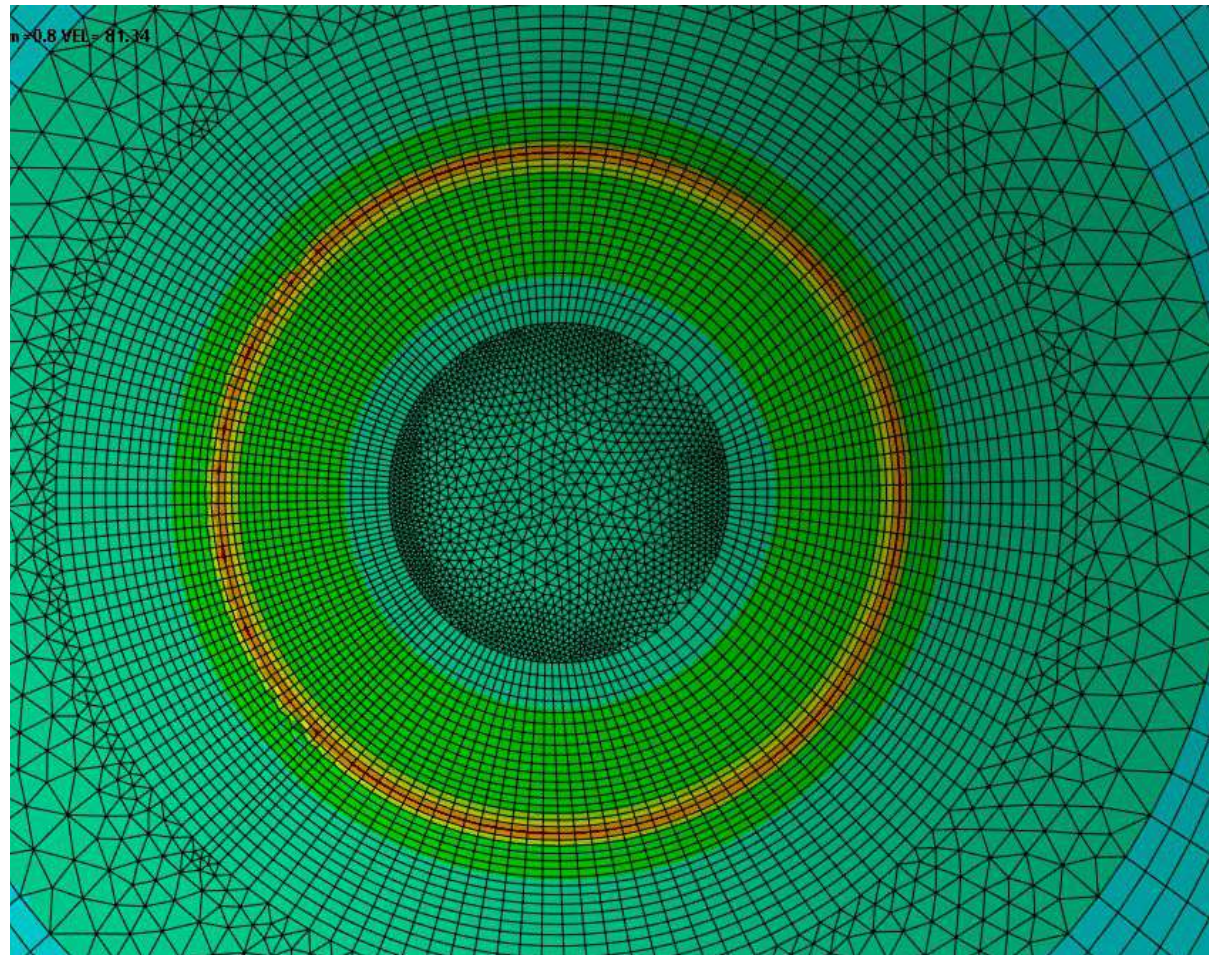


Penetratore Tronco di Piramide, Modello **completo**, mesh **fine**

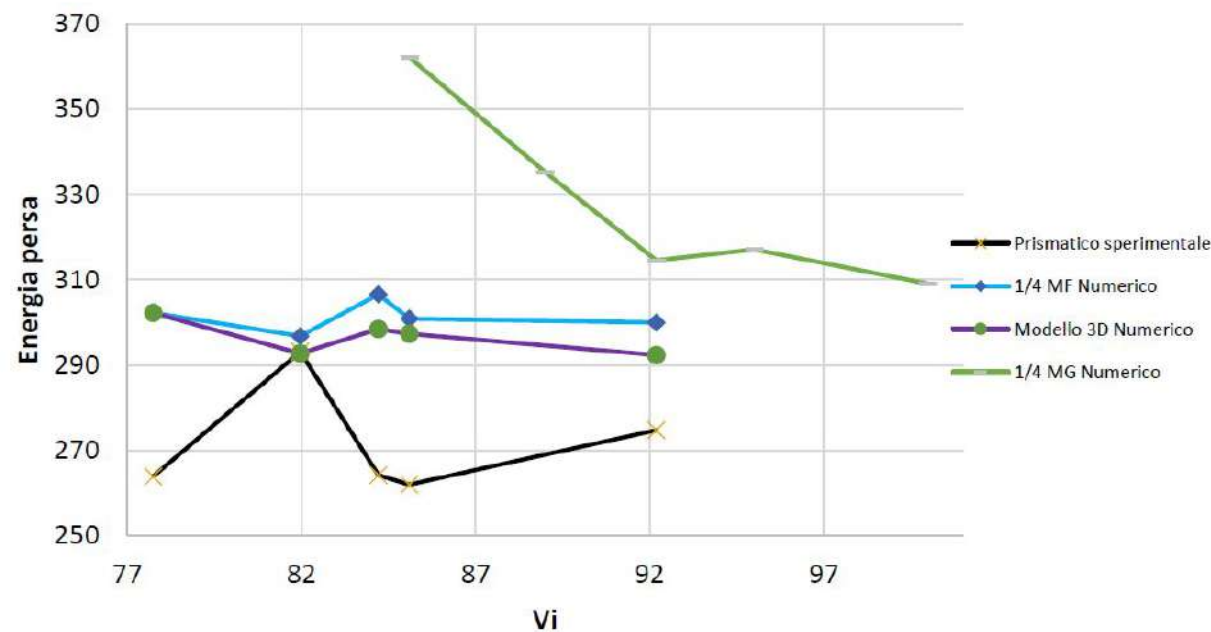
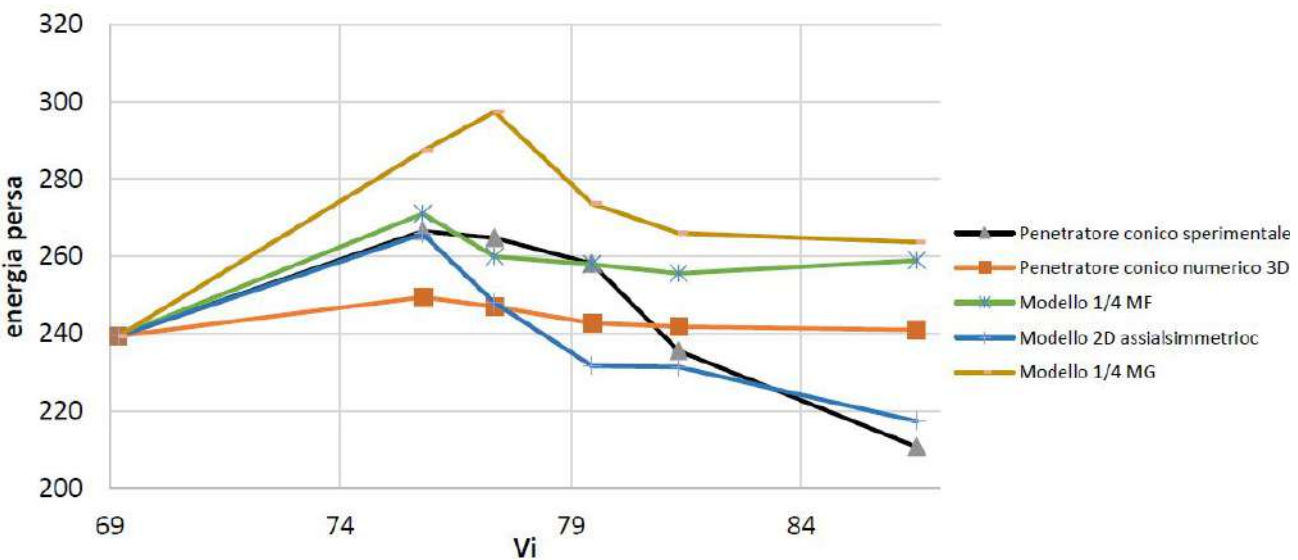
- Errore nel calcolo del limite balistico pari a 5,3%.
- L'errore può essere ridotto aumentando la qualità della mesh al fronte di un maggior costo computazionale.

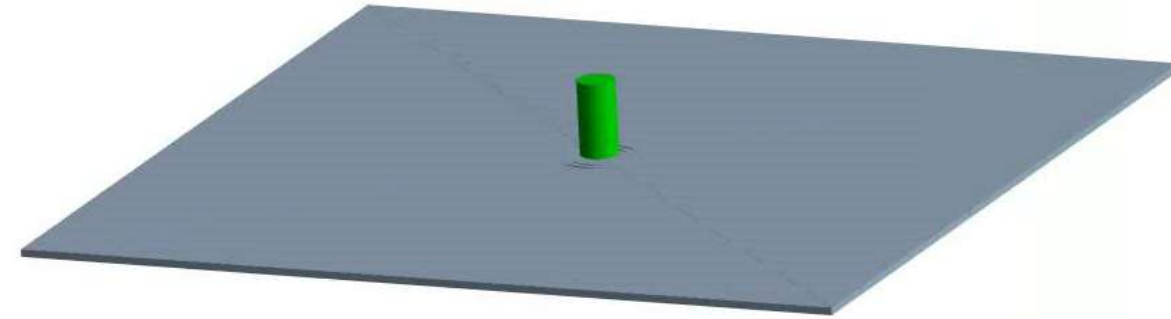
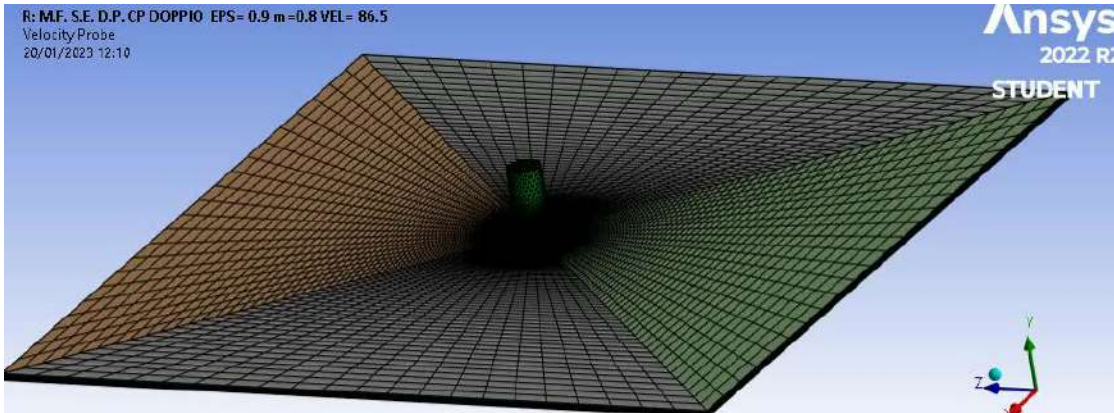


Confronto **pressione di contatto** dei 2 penetratori



Confronto Energia assorbita dei 2 penetratori





- Le simulazioni numeriche mostrano come sia possibile simulare il **limite balistico** e la velocità residua dei proiettile con un modello di materiale relativamente semplice
....se tutti i parametri della simulazione sono correttamente impostati
 - Forte dipendenza da:
 - Parametri costitutivi
 - Evoluzione temperatura
 - Deformazione a rottura
 - Mesh
- in modo prevedibile