



INNOVAZIONE DI PROCESSO
PER LA FILIERA
DELLA PIASTRELLA
CERAMICA SOSTENIBILE

APPLICAZIONE DELLA SIMULAZIONE NUMERICA AL PROCESSO PRODUTTIVO DI PIASTRELLE/LASTRE CERAMICHE: VANTAGGI E PROSPETTIVE

Partner: CIRI-EC, Università di Bologna

Relatori: Carlotta Fusi*, Stefano de Miranda, Luca Patruno, Andrea Valli

Confindustria Ceramica, Sassuolo 17/05/2018



Outline

Obiettivi

Introduzione

Modellazione
numerica

Deposizione

Compattazione

Conclusioni

Progetto IperCER

- Obiettivi OR1

OR1: Comportamento delle polveri durante la Compattazione

- Vantaggi legati all'uso della modellazione numerica
- Simulazione del processo di deposizione con approccio agli Elementi Discreti (DEM)
- Simulazione del processo di compattazione delle polveri nello stampo con approccio agli Elementi Finiti (FEM)

Analisi selettiva delle variabili influenti sul processo

Stima dei parametri meccanici da cui dipende il modello alla meso-scala attraverso il confronto numerico-sperimentale

Calibrazione di un legame costitutivo per la modellazione del materiale alla scala macro (approccio al continuo)

Carlotta Fusi

Obiettivi



La **compattazione** delle polveri nello stampo è un **processo chiave** in molti settori dell'industria manifatturiera.

Outline
Obiettivi
Introduzione

Modellazione
numerica
Deposizione
Compattazione



Farmaceutico



Ceramico



Metallurgico

Conclusioni

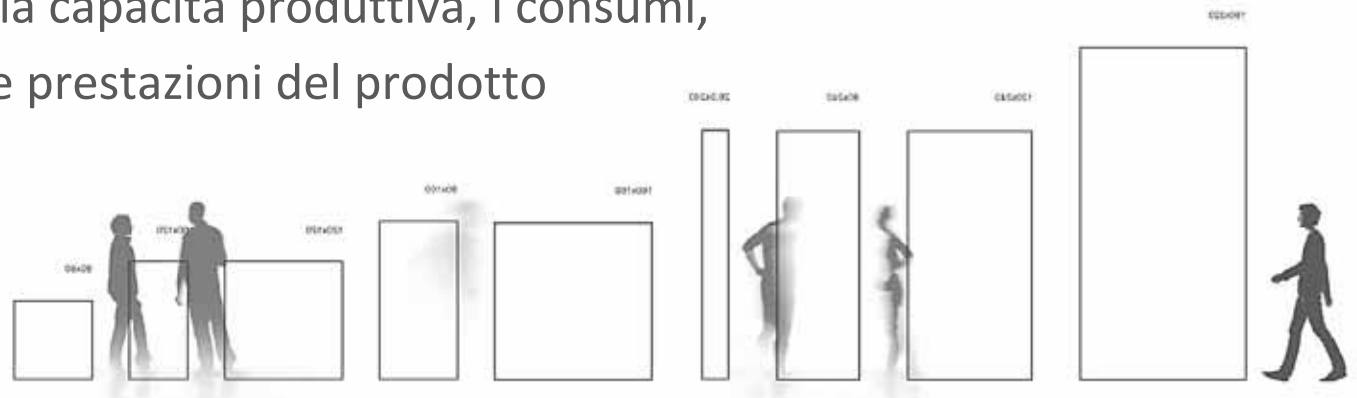
L'introduzione di **grandi formati** ha permesso di soddisfare le esigenze di elevata produttività richieste dal mercato.

Ha però introdotto nuove **problematiche dal punto di vista tecnologico**:

- necessità di analizzare i parametri che governano il processo
- ottimizzare la capacità produttiva, i consumi, la qualità e le prestazioni del prodotto

finale

Carlotta Fusi



Introduzione

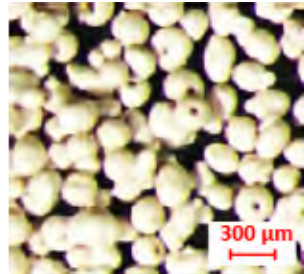


Outline
Obiettivi
Introduzione

OR1 si pone l'obiettivo di analizzare i **processi di deposizione e compattazione** degli atomizzati attraverso la modellazione numerica, valido strumento di supporto da affiancare alle prove sperimentali.

Modellazione
numerica
Deposizione
Compattazione

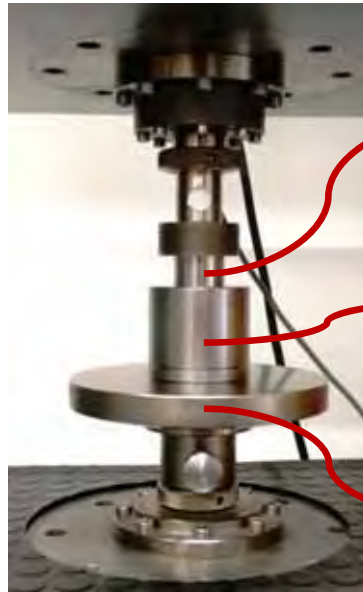
Conclusioni



Micrograph of ceramic powder



Mould filling



Instron machine



Green bodies

Carlotta Fusi

MICRO-SCALA

MACRO-SCALA

Influenza del fuso granulometrico?

Attrito fra i grani?

Caratteristiche meccaniche grani?



Proprietà finali verde?



Outline
Obiettivi
Introduzione

Modellazione
numerica
Deposizione
Compattazione

Conclusioni

- **Processo di deposizione:**
Modellazione del processo di deposizione dei grani nello stampo
Influenza della curva granulometrica e della rugosità superficiale dei grani
- **Processo di compattazione:**
Definizione e analisi delle **variabili** che governano la **formatura di grandi lastre**
 - forma dei grani e struttura interna
 - proprietà meccaniche di grani
 - attrito fra i grani
 - fuso granulometricoModellazione del processo di compattazione in stampi cilindrici
- **Sviluppo di una procedura numerica atta a stimare le proprietà fisiche della lastra verde**

Carlotta Fusi

Modellazione numerica



- Outline
- Obiettivi
- Introduzione

Modellazione numerica

- Deposizione
- Compattazione

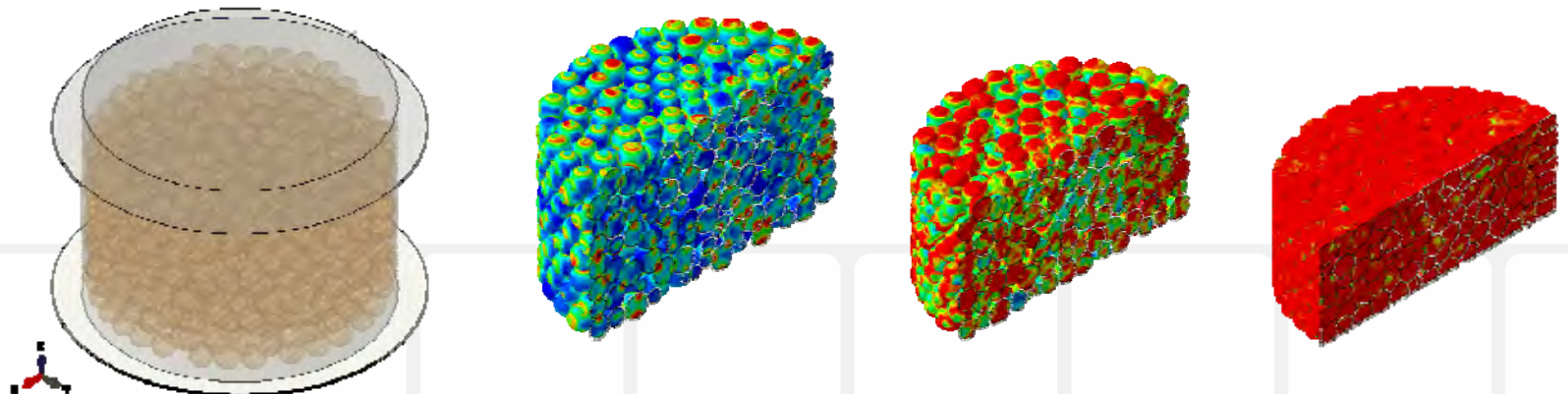
Conclusioni

Step 1 – Processo di deposizione simulato con approccio agli elementi discreti.

Step 2 – Geometria importata in un software agli elementi finiti per simulare il processo di compattazione



Step 1 Deposizione e stabilizzazione dell'impaccamento (DEM)



Step 2 Simulazione del processo di compattazione (FEM)

Carlotta Fusi

Processo di deposizione (DEM)



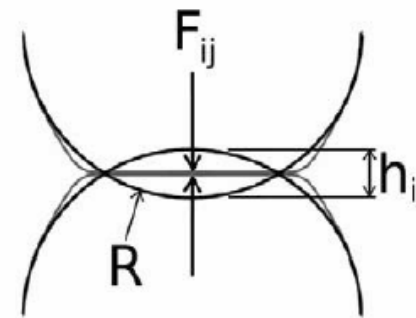
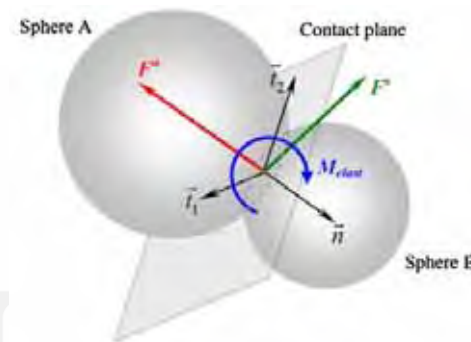
Outline
Obiettivi
Introduzione

Modellazione
numerica
Deposizione
Compattazione

Conclusioni

Analisi numeriche basate sull'approccio **DEM** (Discrete Element Method) sono le più utilizzate per la modellazione di materiali granulari alla micro-scala:

- particelle modellate individualmente come **sfere rigide**
- ogni contatto tra le sfere è preso in considerazione
- l'impaccamento è accuratamente descritto in termini di forze di contatto locali e densità finale
- si può tenere conto del **fuso granulometrico (PSD)**
- l'**interazione** (contatto) è descritta da:
 - raggi delle sfere, **R**
 - lunghezze di sovrapposizione, **h_{ij}**
 - forze normali, **F^n** e tangenziali **F^s** al piano di contatto



Carlotta Fusi

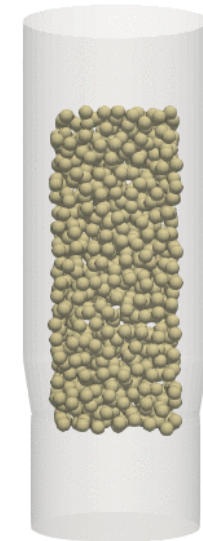
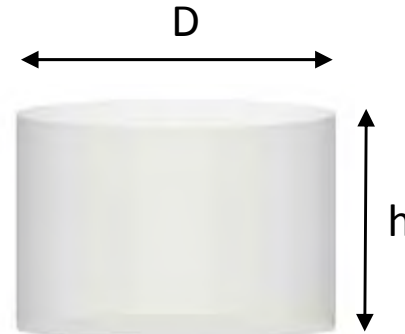
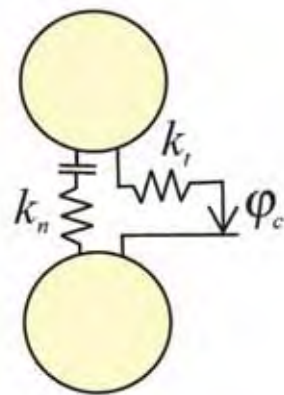
Deposizione dell' atomizzato



- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Modellazione numerica
- Deposizione**
- Compattazione
- Conclusioni

Simulazione del processo di deposizione in **YADE**

- Analisi dell'influenza del **fuso granulometrico** e della **rugosità** dei grani sulla densità relativa finale dell'atomizzato nello stampo.



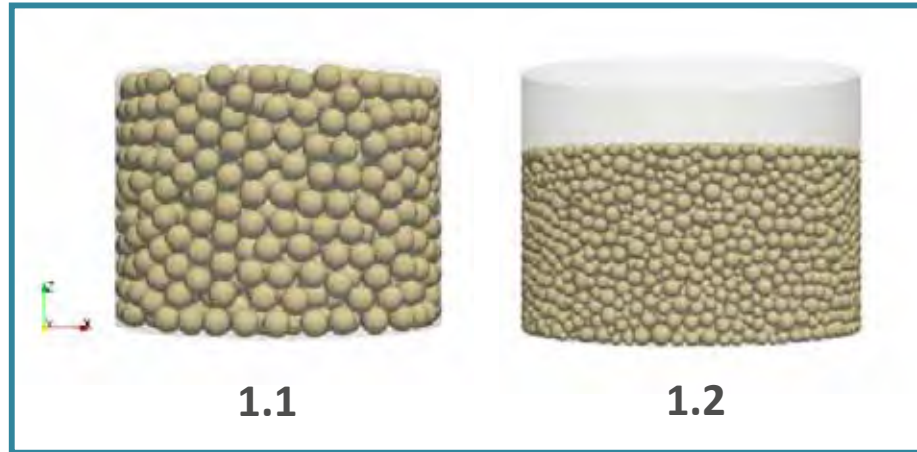
Carlotta Fusi

h/D [-]	k_n [MPa]	k_t/k_n [-]	Densità [g/cm ³]
0.75	60	0.38	0.986
0.75	60	0.38	0.986

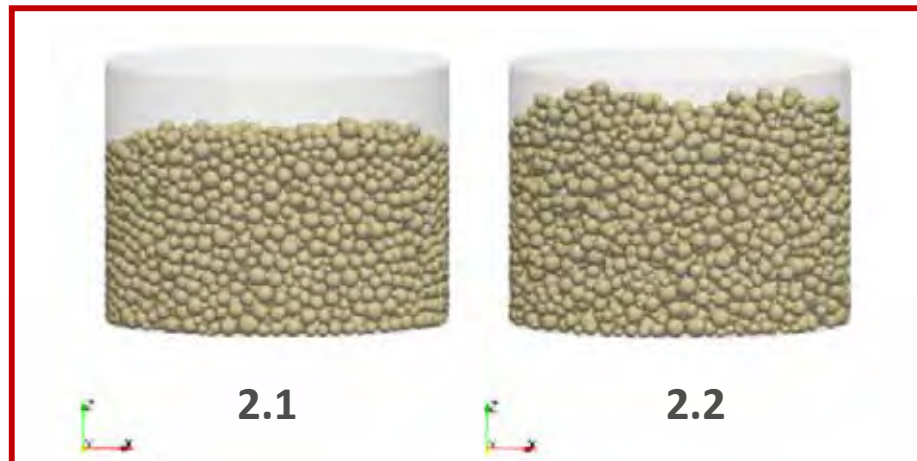
Deposizione dell' atomizzato



- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Modellazione numerica
- Deposizione**
- Compattazione



n# Simul.	n# sfere	r_{sfera} [μm]	ϕ_c [-]
1.1	≈ 1300	1000	0.0
1.2	≈ 7000	150-750	0.0



n# Simul.	n# sfere	r_{sfera} [μm]	ϕ_c [-]
2.1	≈ 7000	150-750	0.0
2.2	≈ 6800	150-750	0.7

Carlotta Fusi



Non tiene conto della deformabilità dei grani!

Processo di compattazione (FEM)



Outline
Obiettivi
Introduzione

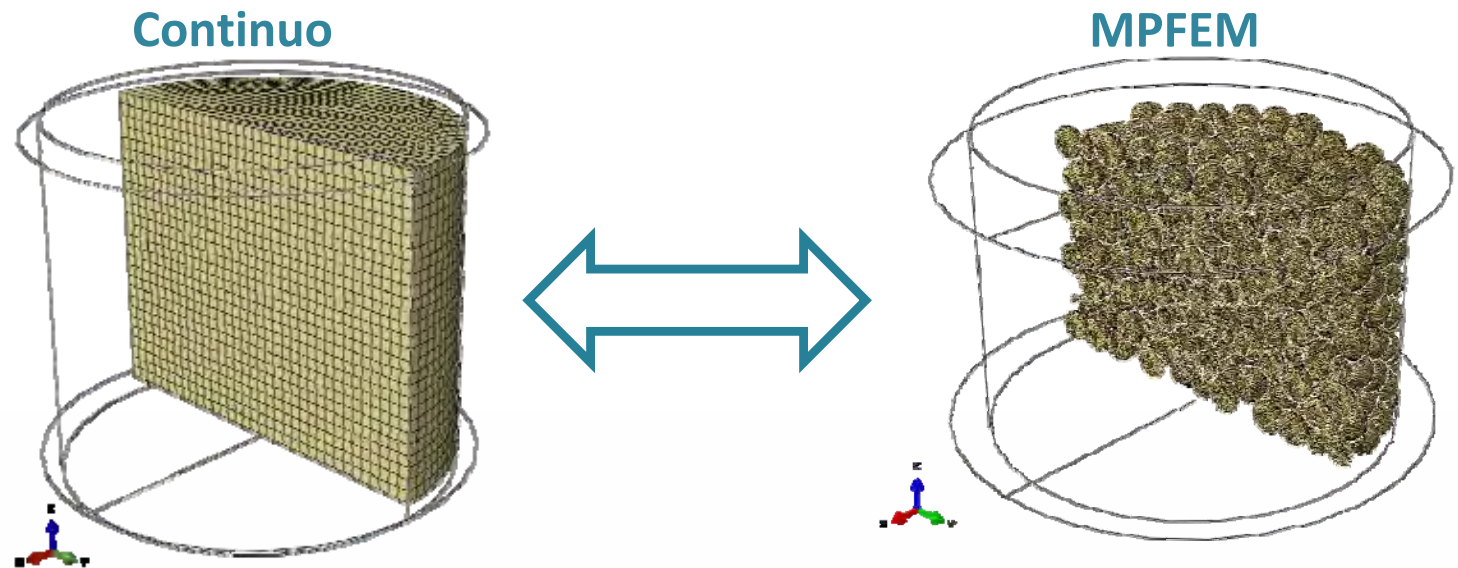
Modellazione
numerica
Deposizione

Compattazione

Conclusioni

L'approccio **agli elementi finiti (FEM)** presenta numerosi **vantaggi** rispetto al DEM, quali:

- possibilità di tenere conto della **deformabilità** delle sfere
- possibilità di considerare il **legame costitutivo** del materiale
- modellare **geometrie complesse** soggette a condizioni di **vincolo** e di **carico** articolate



Carlotta Fusi

- ✓ Semplice set-up del modello e ridotto onere computazionale
- ✗ Accurata descrizione del legame costitutivo per tenere conto dei complessi fenomeni che avvengono all'interfaccia fra i grani

- ✓ Accurata riproduzione del processo di compattazione
- ✗ Elevato costo computazionale

Processo di compattazione (FEM)



Outline
Obiettivi
Introduzione

Modellazione
numerica

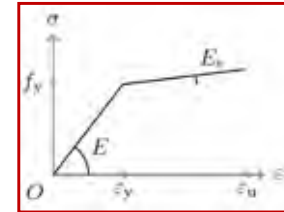
Deposizione

Compattazione

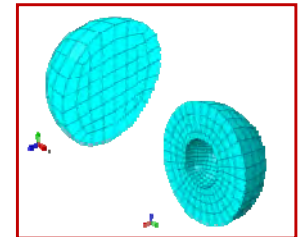
Conclusioni

- Il **comportamento dell'atomizzato** durante la compattazione è noto a livello **qualitativo**, ma non altrettanto a livello **quantitativo**.
- Per ottenere un **modello matematico** capace di riprodurre il processo, è necessario **quantificare** l'influenza di ciascun **fattore** che ne possa condizionare l'output:

Legame costitutivo del materiale

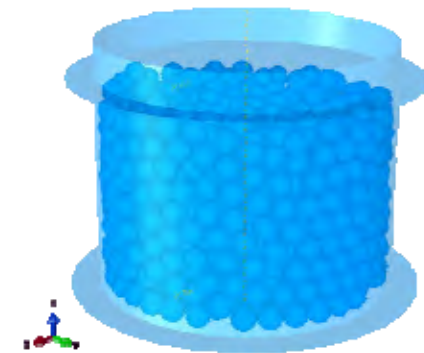
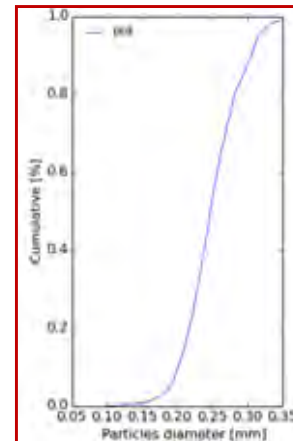


Attrito fra i grani



Forma dei grani

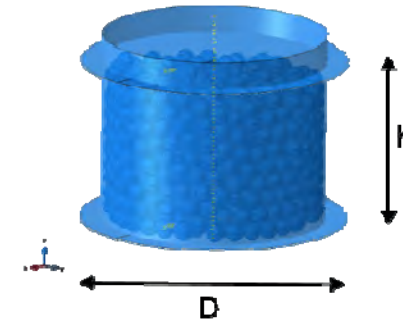
Curva granulometrica



Carlotta Fusi

→ FEM come **strumento** per **quantificare l'effetto** dei principali **fattori** influenti sul processo.

Identificazione delle variabili influenti sul processo



- $r_{\text{sfera}} = 1 \text{ m}$
- $h/D = 0.67$

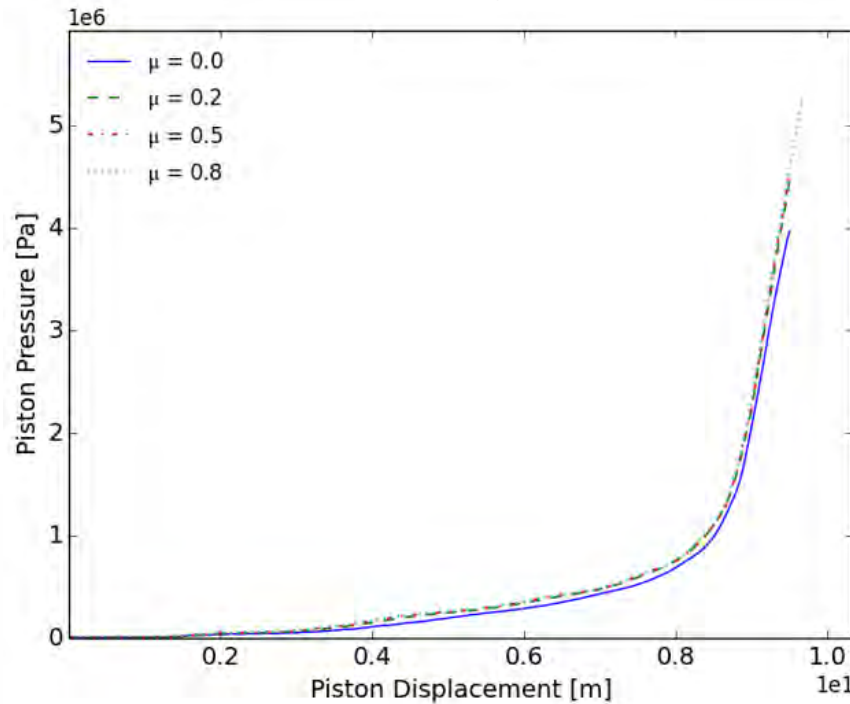
Outline
Obiettivi
Introduzione

Modellazione
numerica

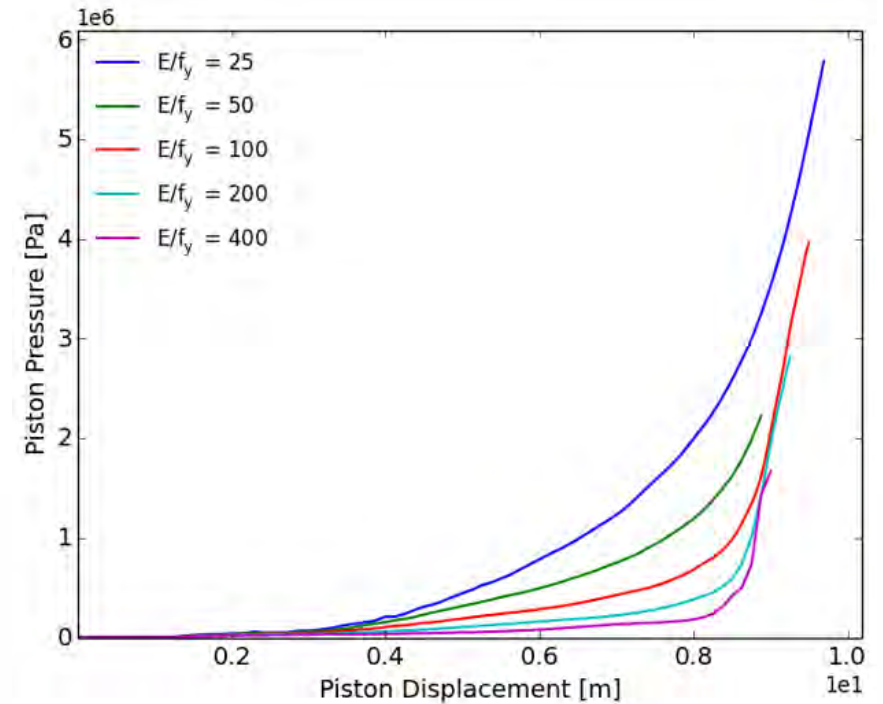
Deposizione
Compattazione

Conclusioni

Attrito fra i grani



Variazione del rapporto E/f_y



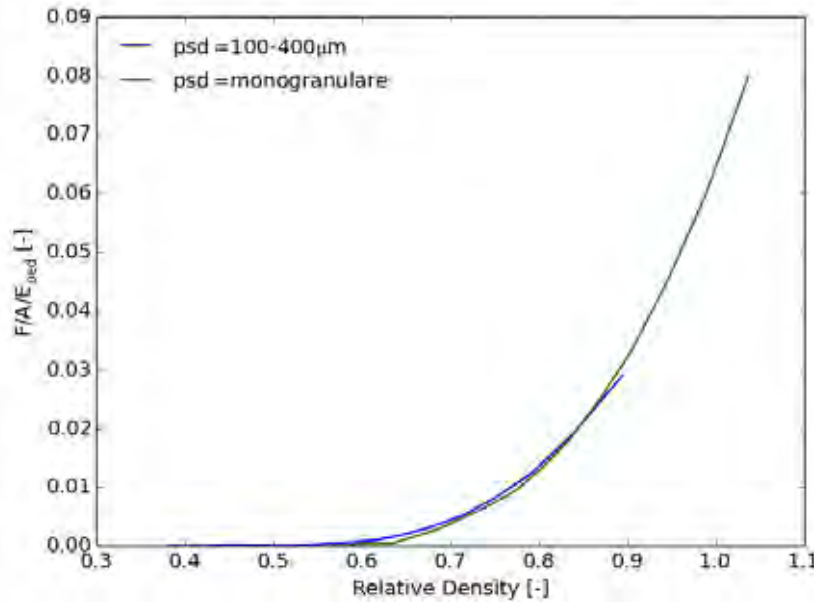
Carlotta Fusi

Identificazione delle variabili influenti sul processo

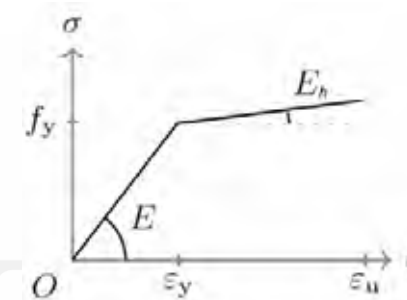
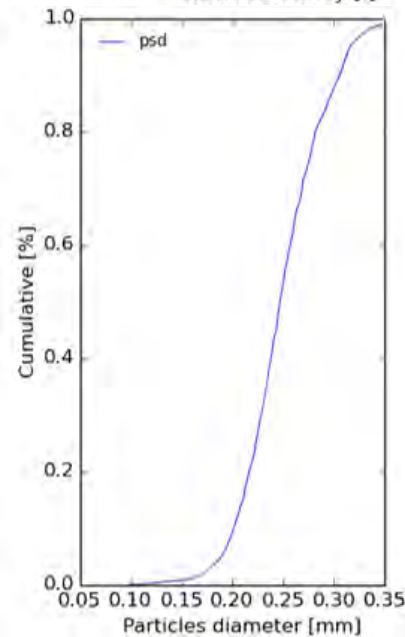
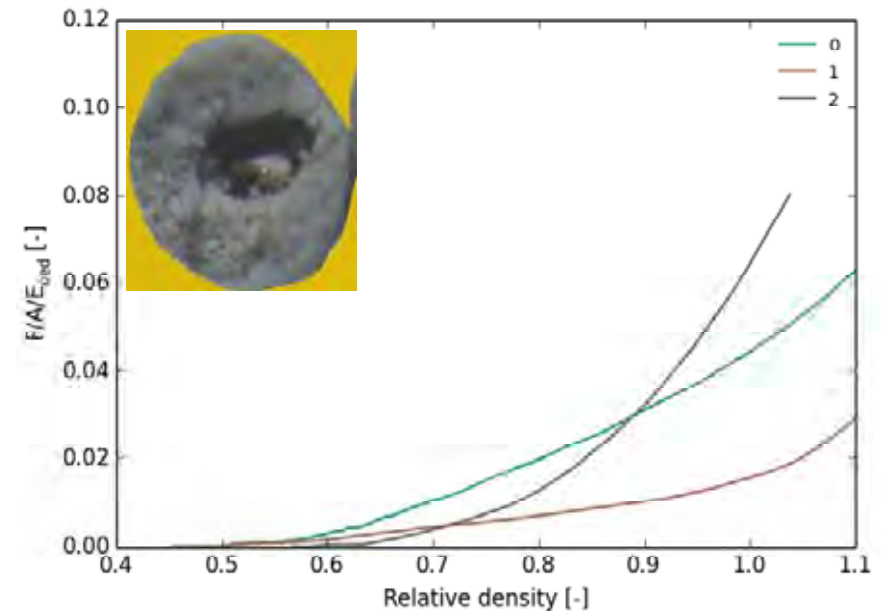


- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Modellazione numerica
- Deposizione
- Compattazione**
- Conclusioni

Influenza del fuso granulometrico



Influenza del modulo di hardening



Curve n#	E/fy	ni	E/Eh
0	25	0.3	/
1	100	0.3	/
2	100	0.3	1.91

Carlotta Fusi

Confronto numerico-sperimentale (1/2)



- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Modellazione numerica
- Deposizione
- Compattazione**
- Conclusioni

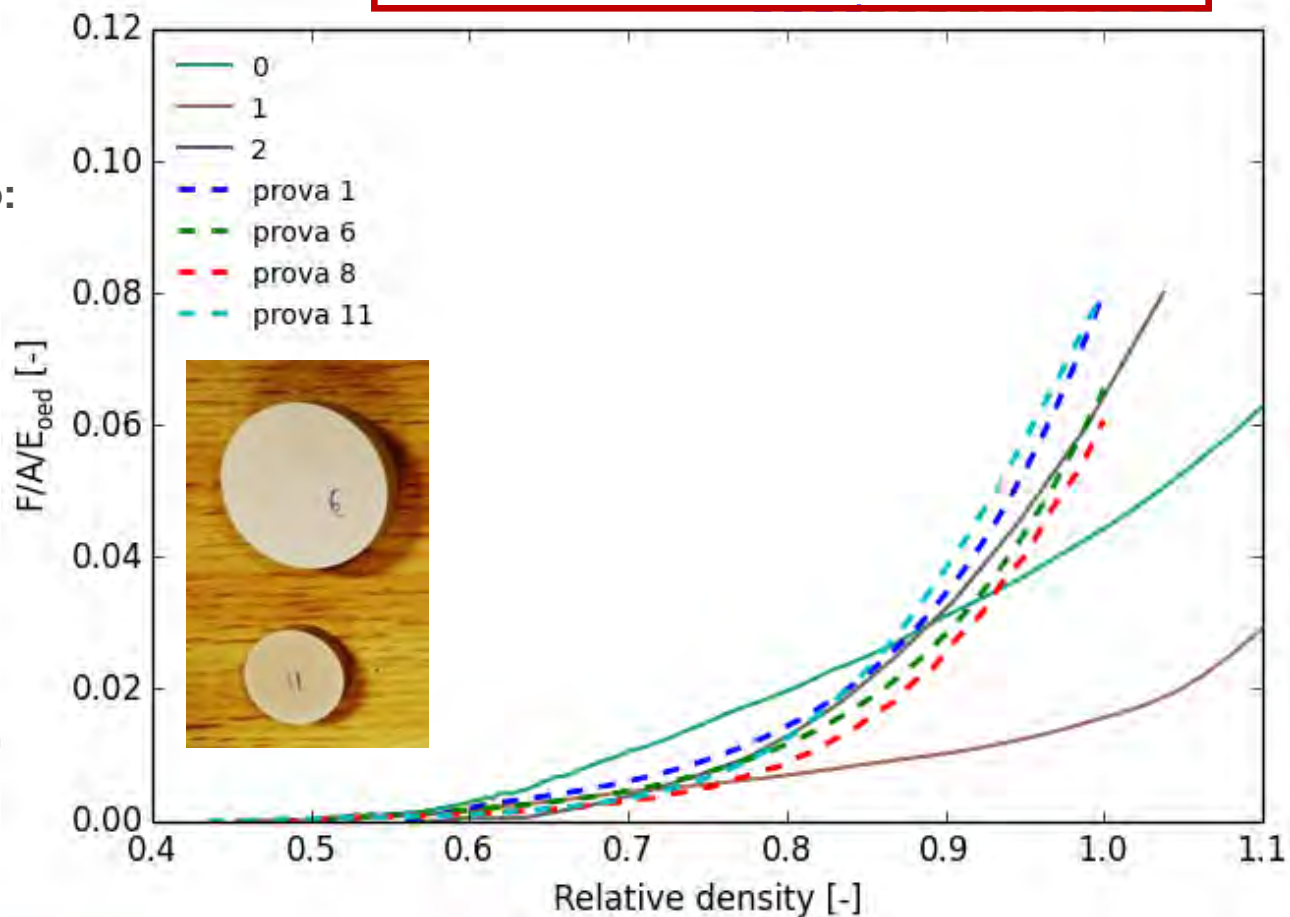
Dati prove sperimentali:

- $h/D = 0,75$
- $D = 25 \text{ mm}$ (1)
40 mm (6,8)
80 mm (11)
- $\rho_{\text{ini}} \approx 1,0 \text{ g/cm}^3$
- $\text{psd} = 315\text{-}400 \text{ }\mu\text{m}$

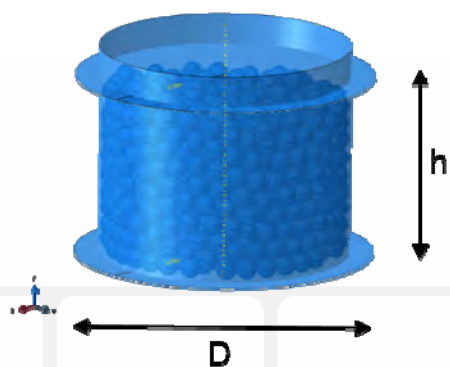
Dati modello numerico:

- $h/D \approx 0,70$
- $\text{psd} = \text{monogranulare}$
- Prop. materiale:
 E, ν, ρ, f_y, E_h

Curve n#	E/fy	ni	E/Eh	Error [%]	Error [%]	Error [%]	Error [%]
0	25	0.3	/	1.1481	1.0482	1.1392	1.1744
1	100	0.3	/	2.1873	1.5677	1.2895	1.8146
2	100	0.3	1.91	0.1364	0.2424	0.2861	0.3764



Carlotta Fusi



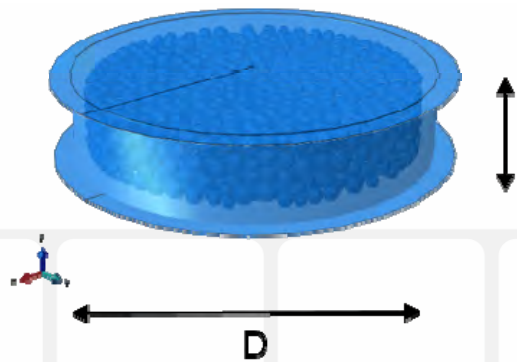
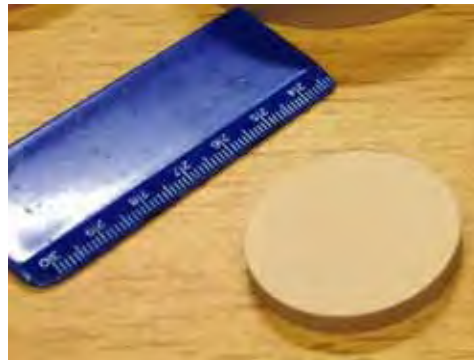
Confronto numerico-sperimentale (2/2)



- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Modellazione numerica
- Deposizione
- Compattazione**
- Conclusioni

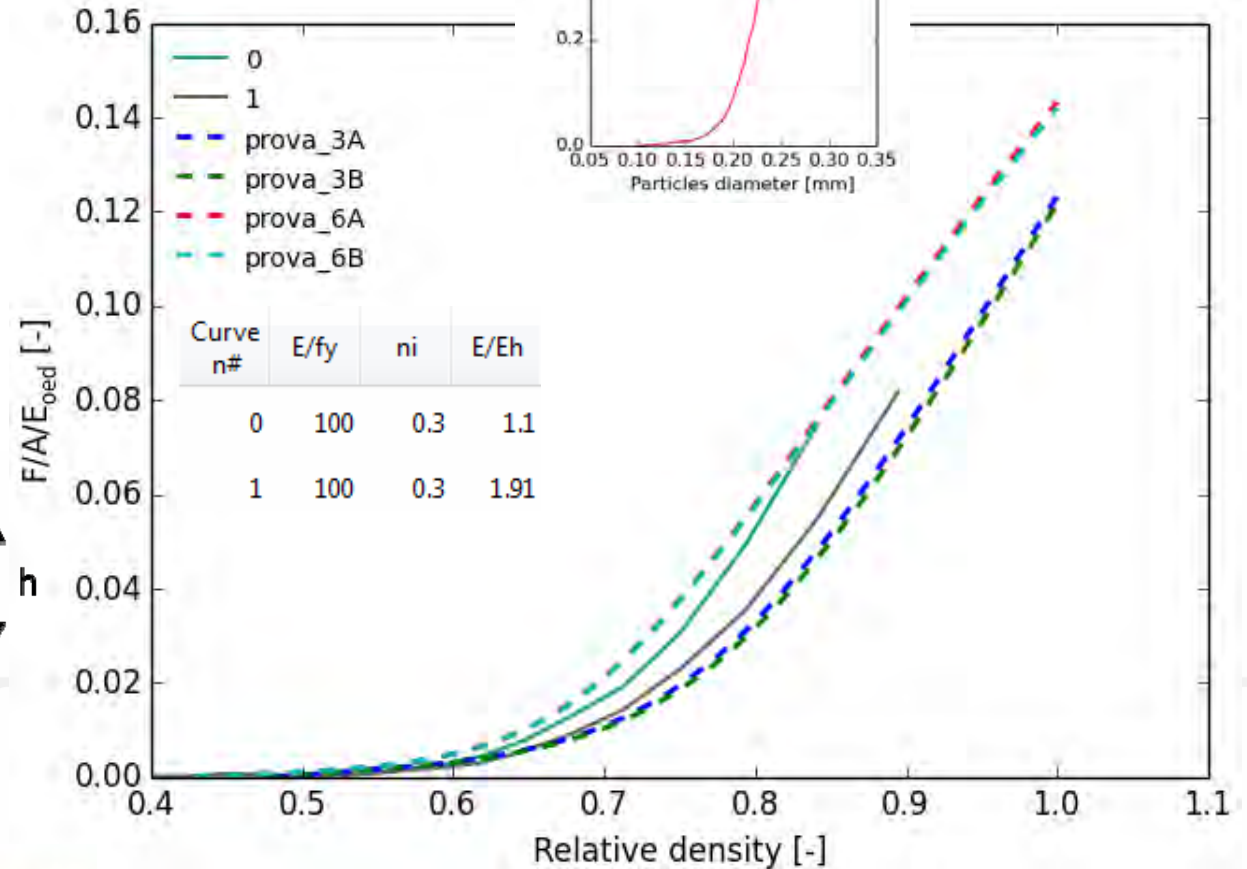
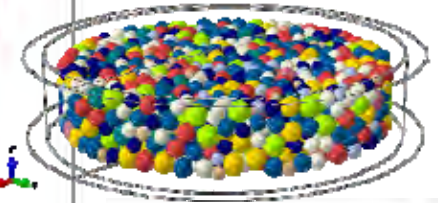
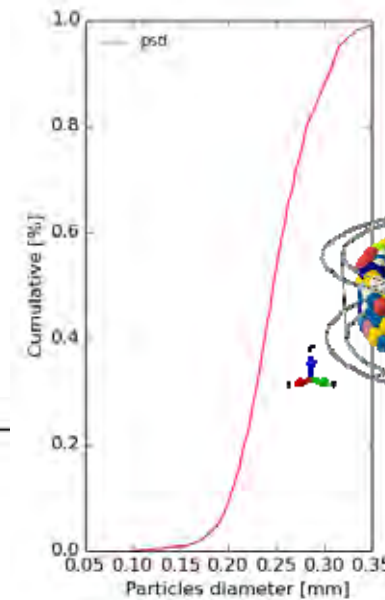
Dati prove sperimentali:

- $h/D \approx 0,25$
- $D = 40 \text{ mm}$ (3A,3B)
25 mm (6A,6B)
- $\rho_{\text{ini}} \approx 0,95 \text{ g/cm}^3$
- $\text{psd} = 100\text{-}400 \mu\text{m}$



Dati modello numerico:

- $h/D = 0,23$
- $\text{psd} = 100\text{-}400$
- Prop. materiale:
 E, ν, ρ, f_y, E_h



Carlotta Fusi

Calibrazione del modello numerico alla macro-scala

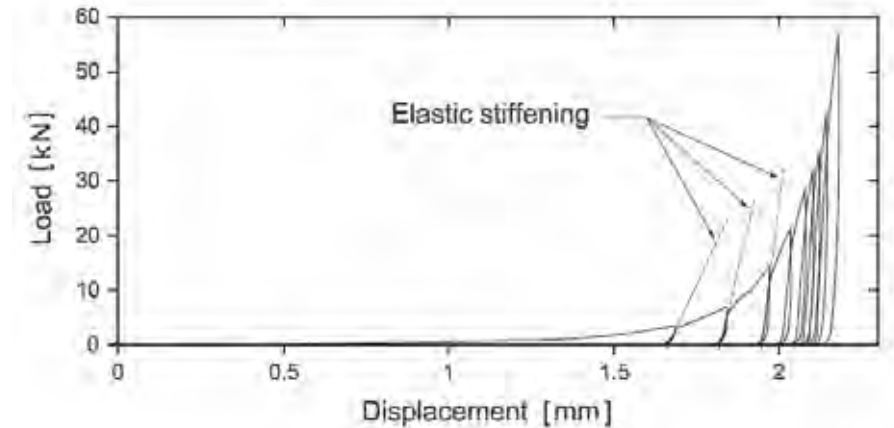
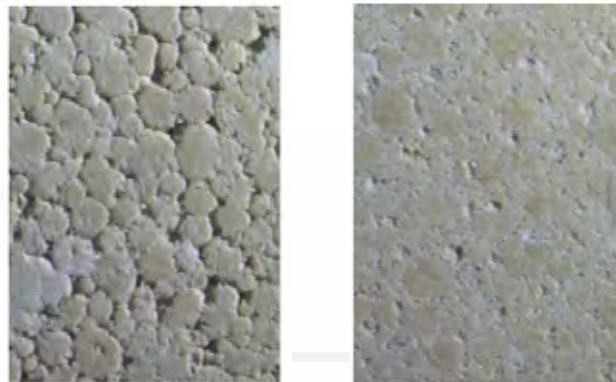
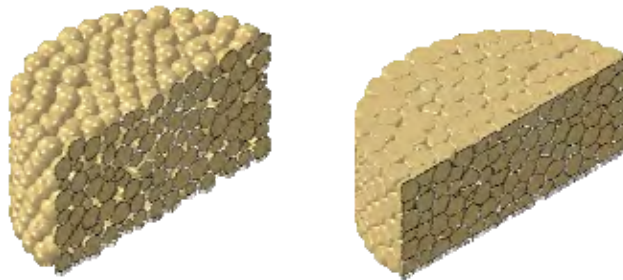


Outline
Obiettivi
Introduzione

Modellazione
numerica
Deposizione
Compattazione

Conclusioni

Il **legame costitutivo** richiesto da una modellazione al continuo (macro-scala) deve descrivere la **transizione del materiale** dallo **stato granulare** a quello **completamente denso**.



Uniaxial deformation of an aluminum silicate spray-dried powder with unloadings [1]

Il legame costitutivo deve tenere conto della **variazione volumetrica** e dell'**aumento di resistenza** del materiale che si osservano durante la pressatura.

Carlotta Fusi

[1] Stupkiewicz, S., Piccolroaz, A., Bigoni, D., *Elastoplastic coupling to model cold ceramic powder compaction*, Journal of the European Ceramic Society, no. 34, pp. 2839-2848, 2014.

Calibrazione del modello numerico alla macro-scala

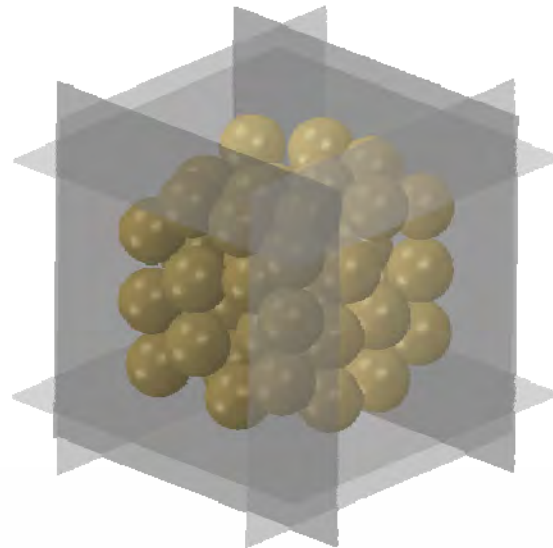


Outline
Obiettivi
Introduzione

Modellazione
numerica
Deposizione
Compattazione

Conclusioni

- **Simulazione numerica** di **prove triassiali** su impaccamenti cubici di sfere per indagare l'evoluzione della superficie di snervamento del materiale a diversi valori di densità relativa del verde.



Step 1 → isotropic compaction
to a target relative density of the
green part

Step 2 → isotropic unloading
to low stress values

Step 3 → deviatoric reloading
until plasticity is detected
(multiple restart analyses)

Strain
controlled

Stress
controlled

Carlotta Fusi

Simulazione di prove triassiali di compattazione

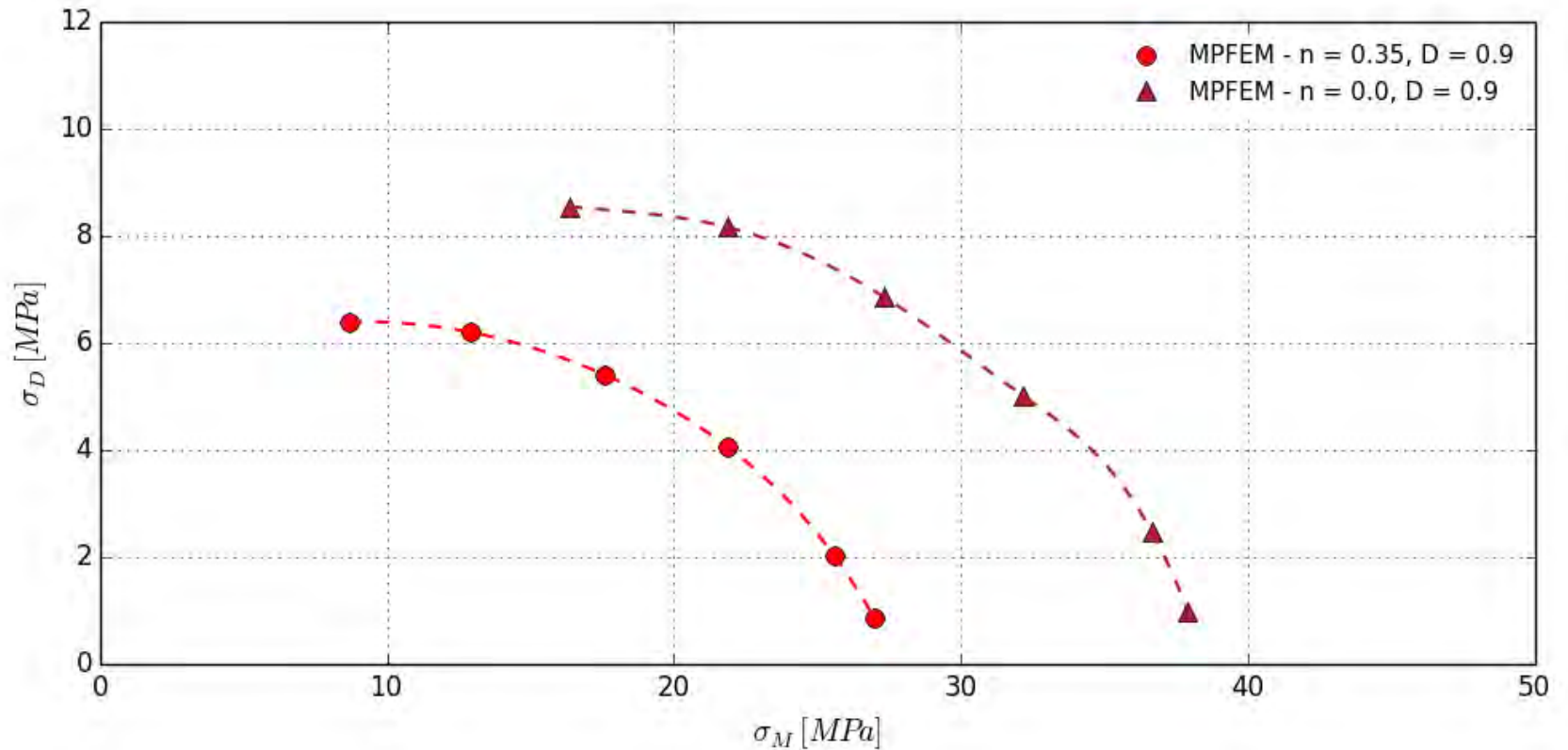


Outline
Obiettivi
Introduzione

Confronto fra materiale con legame elastico-perfettamente plastico ($n=0$) e legame elasto-plastico con hardening ($n>0$)

Modellazione
numerica
Deposizione
Compattazione

Conclusioni



Carlotta Fusi

Data-fitting con modelli al continuo

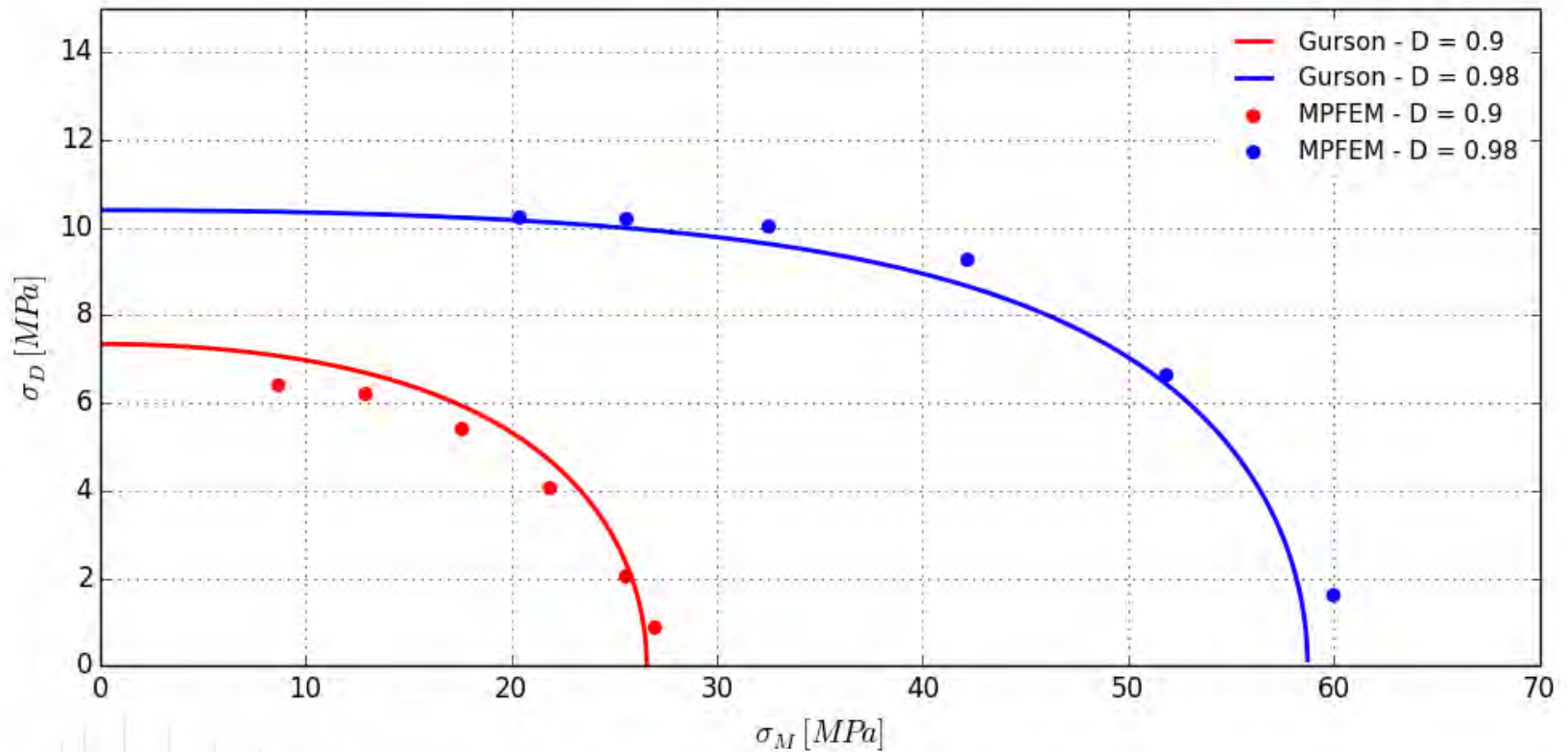


Outline
Obiettivi
Introduzione

Modellazione numerica
Deposizione
Compattazione

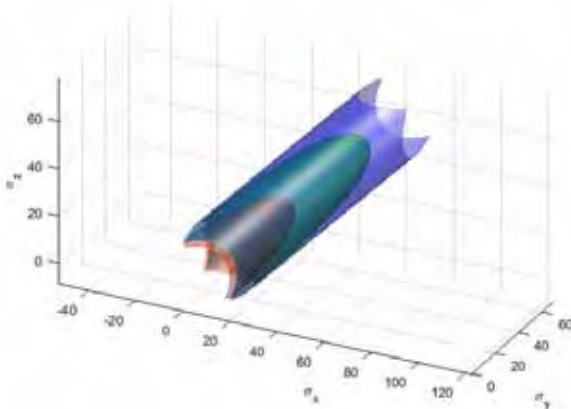
Conclusioni

Fitting dei dati numerici con modelli noti – **Gurson (1977)** per metalli porosi con densità relativa elevata



Carlotta Fusi

- Gurson p=0.1
- Gurson p=0.02
- Gurson p=0



Funzione di snervamento per materiali porosi:

$$AJ'_2 + BJ_1^2 = \delta Y_0^2 = Y_R^2$$

contributo della
componente idrostatica

A, B, δ → variabili il cui
valore dipende dalla
densità relativa, D

Conclusioni



- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Modellazione numerica
- Deposizione
- Compattazione

Conclusioni

- Individuazione e **analisi selettiva** delle **variabili** che influenzano i processi di **deposizione e compattazione** degli atomizzati.
- Confronto delle curve di compattazione numeriche e sperimentali e **calibrazione dei parametri meccanici** dei grani richiesti dal modello MPFEM per simulare il progressivo addensamento del materiale.
- Sviluppo di una **procedura numerica** atta a riprodurre **prove triassiali di compattazione** per determinare le caratteristiche meccaniche del verde.

Carlotta Fusi



GRAZIE PER L'ATTENZIONE!



INNOVAZIONE DI PROCESSO
PER LA FILIERA
DELLA PIASTRELLA
CERAMICA SOSTENIBILE

APPLICAZIONE DELLA SIMULAZIONE NUMERICA AL PROCESSO PRODUTTIVO DI PIASTRELLE/LASTRE CERAMICHE: VANTAGGI E PROSPETTIVE

Partner: CIRI-EC, Università di Bologna

Relatori: Carlotta Fusi*, Stefano de Miranda, Luca Patruno, Andrea Valli

Confindustria Ceramica, Sassuolo 17/05/2018