



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

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

Confindustria Ceramica, Sassuolo 17/05/2017



Outline

Obiettivi

Introduzione

Model azione

Analisi

Prove sperimentali

Sviluppo software

Conclusioni

- **Obiettivi**
- **Introduzione**
- **Modellazione numerica**
- **Analisi processo industriale**
- **Prove sperimentali**
- **Sviluppo software**



Outline

Obiettivi

Introduzione

Model azione

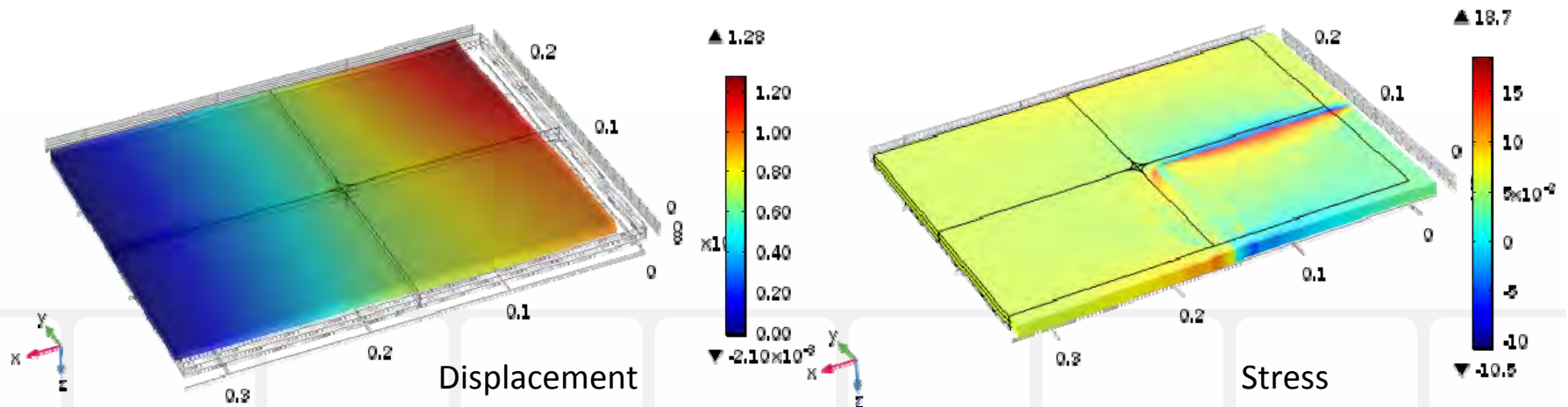
Analisi

Prove sperimentali

Sviluppo software

Conclusioni

- **Comportamento degli impasti durante il processo di sinterizzazione e di raffreddamento (in collaborazione con CNR-ISTEC)**
- **Valutazione delle tensioni residue e deformazioni: sviluppo di tecniche sperimentali e numeriche atte a mappare le tensioni residue e lo stato deformativo della lastra ceramica.**



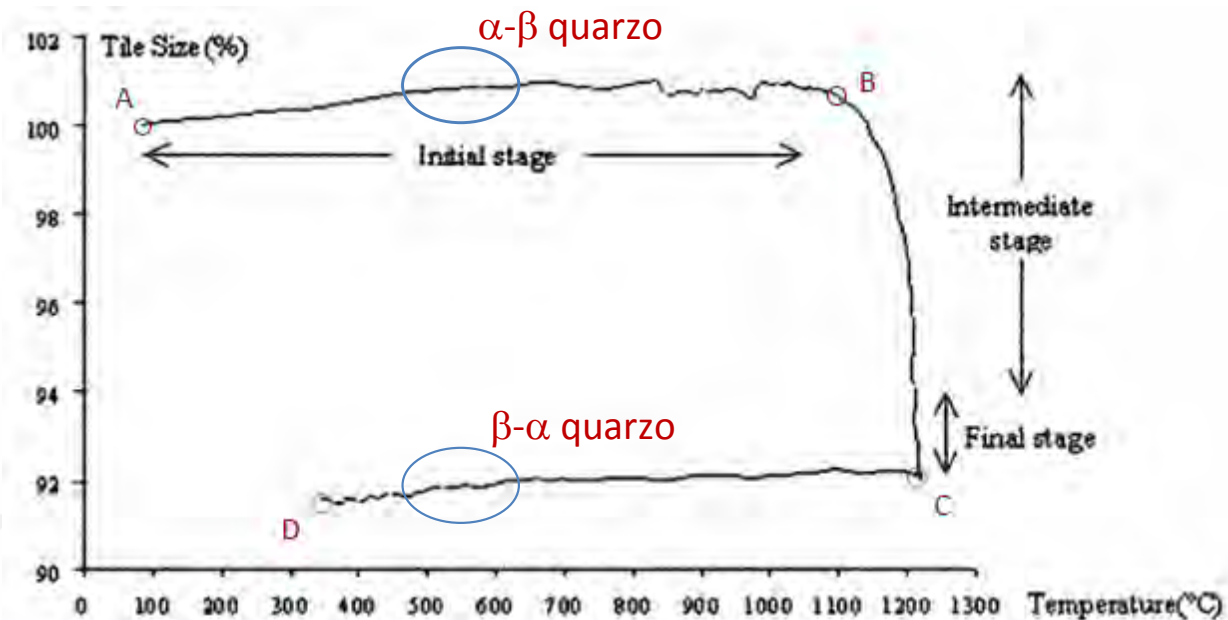
Sinterizzazione e raffreddamento



- Outline
- Obiettivi
- Introduzione**
- Model azione
- Analisi
- Prove sperimentali
- Sviluppo software
- Conclusioni

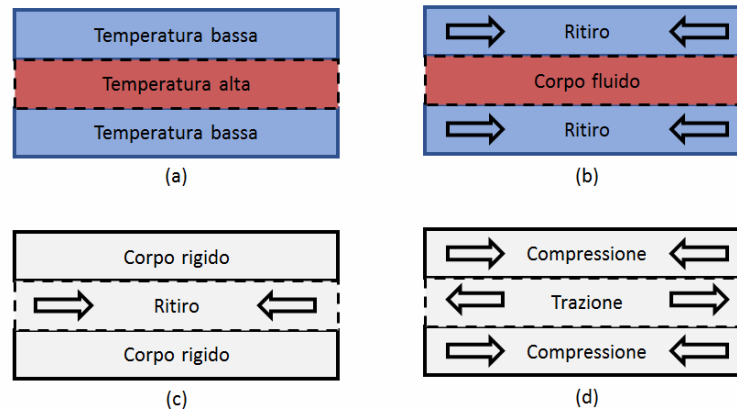
Ai fini della **simulazione numerica**, il processo produttivo della lastra ceramica può essere diviso in due step:

1. Tratto AC: cottura fino a completa sinterizzazione,
2. Tratto CD: raffreddamento fino a temperatura ambiente.



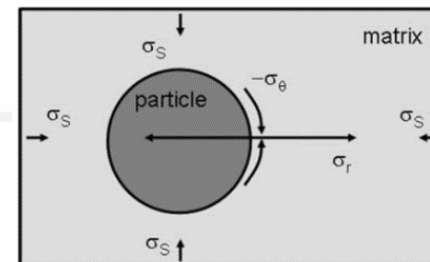
- Outline
- Obiettivi
- Introduzione**
- Model azione
- Analisi
- Prove sperimentali
- Sviluppo software
- Conclusioni

- **Tensioni macroscopiche:** differente temperatura tra la superficie esterna e la parte interna (**velocità di raffreddamento** e **bassa conducibilità termica**).



➔ **AUTOTENSIONI**

- **Tensioni microscopiche:** differenza tra i **coefficienti di dilatazione termica** tra le particelle cristalline e la matrice vetrosa.



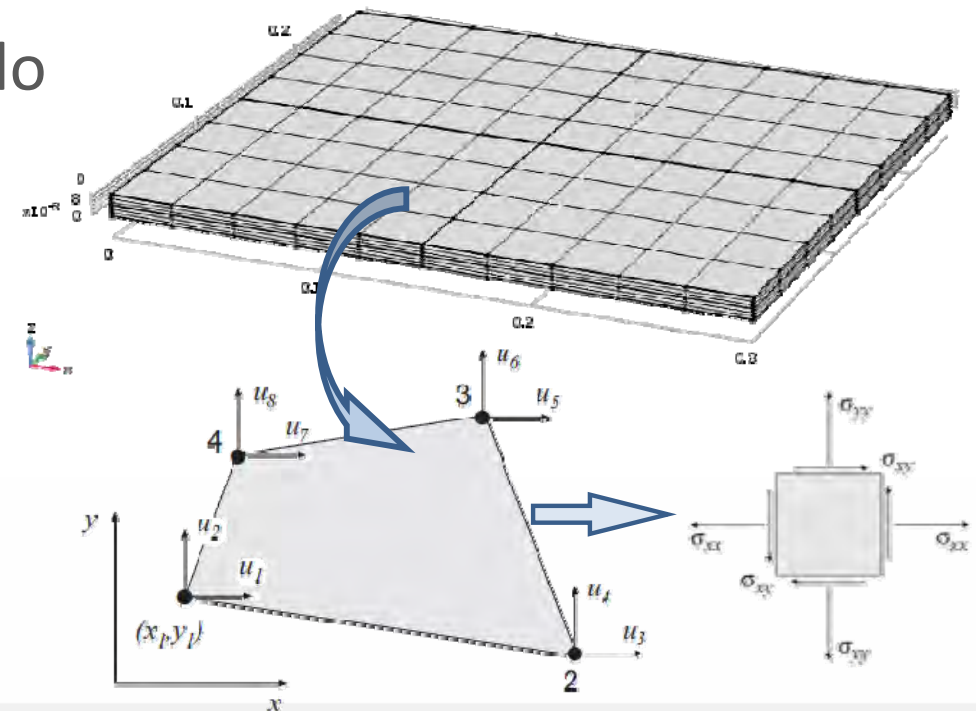


- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Modellazione**
- Analisi
- Prove sperimentali
- Sviluppo software
- Conclusioni

L'**analisi agli elementi finiti** è una tecnica di simulazione che utilizza il metodo agli elementi finiti (**FEM**) per risolvere sistemi di equazioni alle derivate parziali.

Il **set-up** del modello prevede i seguenti step:

- **Modello Costitutivo**
- **Discretizzazione**
- **Condizioni al contorno**
- **Risultati**





- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Modellazione**
- Analisi
- Prove sperimentali
- Sviluppo software
- Conclusioni

Il modello costitutivo:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_e + \dot{\epsilon}_{th} + \dot{\epsilon}_v$$

↓ ↓ ↓

Elastico Termico Viscoso

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f} = 0 \\ \boldsymbol{\epsilon} = \nabla^s \mathbf{u} \\ \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}(T)(\boldsymbol{\epsilon} - \boldsymbol{\epsilon}_{th} - \boldsymbol{\epsilon}_v) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Equilibrio} \\ \text{Congruenza} \\ \text{Legame} \end{array}$$

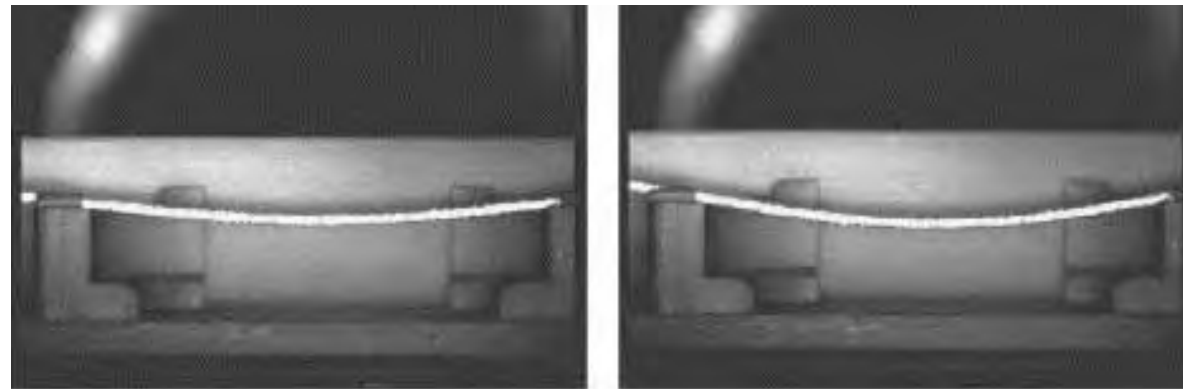
FEM - Modello costitutivo

Viscosità (1/2)



- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Modellazione**
- Analisi
- Prove sperimentali
- Sviluppo software
- Conclusioni

La **deformazione piroplastica** è rappresentata dall'inflessione della lastra ceramica sotto l'effetto del peso proprio durante il trattamento termico.



La piroplasticità si evidenzia durante la **fase liquida** a **bassa viscosità** del processo di sinterizzazione.

FEM - Modello costitutivo

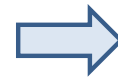
Viscosità (2/2)



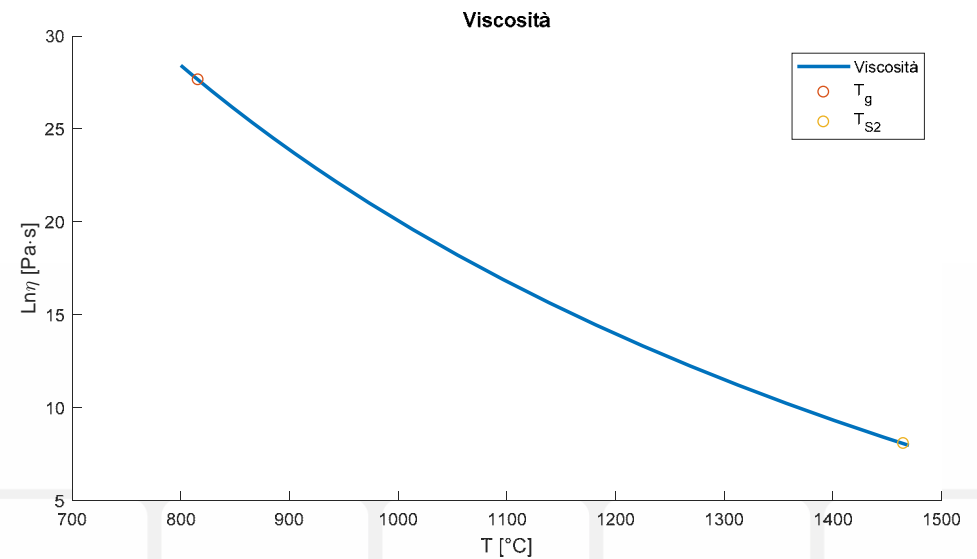
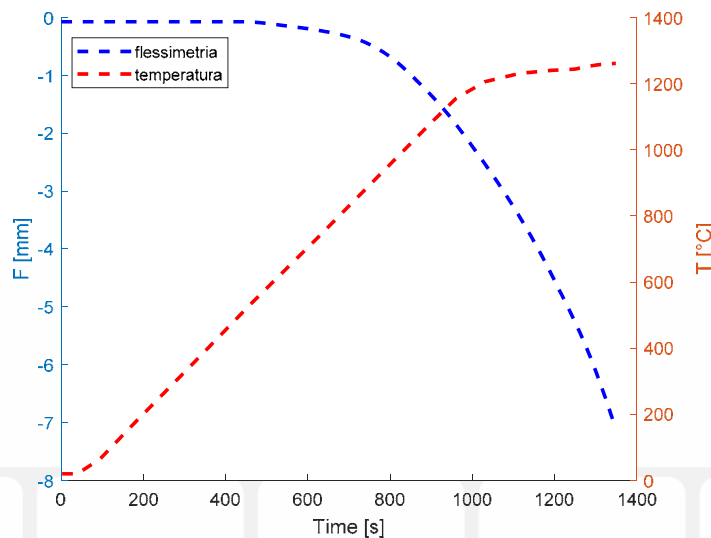
- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Modellazione**
- Analisi
- Prove sperimentali
- Sviluppo software
- Conclusioni

Valutando la **velocità di inflessione** del provino è possibile risalire alla curva di **viscosità**.

$$\eta = \frac{5\rho g L^4}{32\dot{\delta} h^2}$$



$$\begin{cases} \dot{\epsilon}_v = \frac{\sigma}{\eta} \\ \eta = \eta_0 e^{\Theta/T} \end{cases}$$

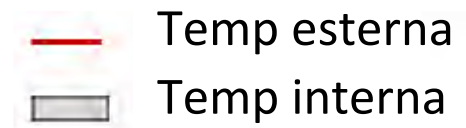




- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Modellazione**
- Analisi
- Prove sperimentali
- Sviluppo software
- Conclusioni

Prendiamo in esame un **modello 2D** della lastra ceramica.

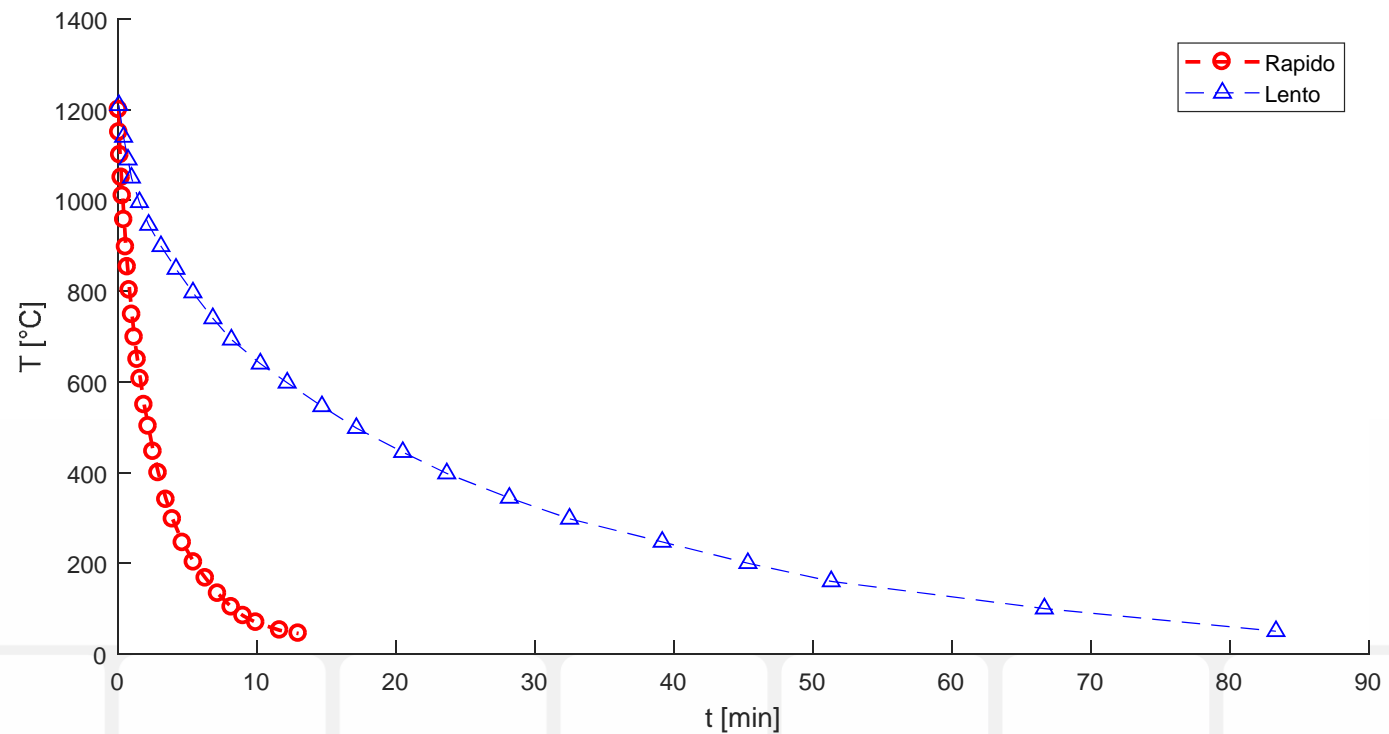
$h=6\text{mm}$, $L=20\text{mm}$,
12x12 elementi





- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Modellazione**
- Analisi
- Prove sperimentali
- Sviluppo software
- Conclusioni

- T_{iniziale} pari a quella di sinterizzazione,
- $T_{\text{esterna}}(t)$ secondo due differenti **curve di raffreddamento**, una lenta ed una rapida.

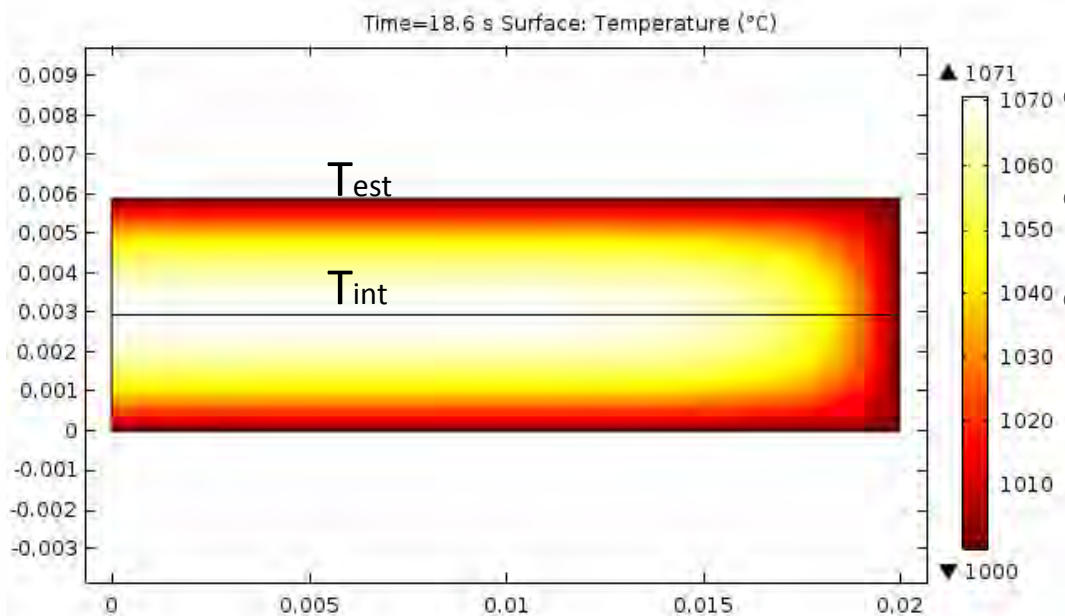


FEM - Risultati: Profilo di temperatura (1/2)



- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Modellazione**
- Analisi
- Prove sperimentali
- Sviluppo software
- Conclusioni

La parte esterna si raffredda prima di quella interna e la **differenza di temperatura** tra esterno ed interno per la stessa curva di raffreddamento diminuisce all'aumentare della diffusività termica:



- Conducibilità termica
- Densità
- Calore specifico

$$\alpha(T) = \frac{k}{\rho c_p}$$

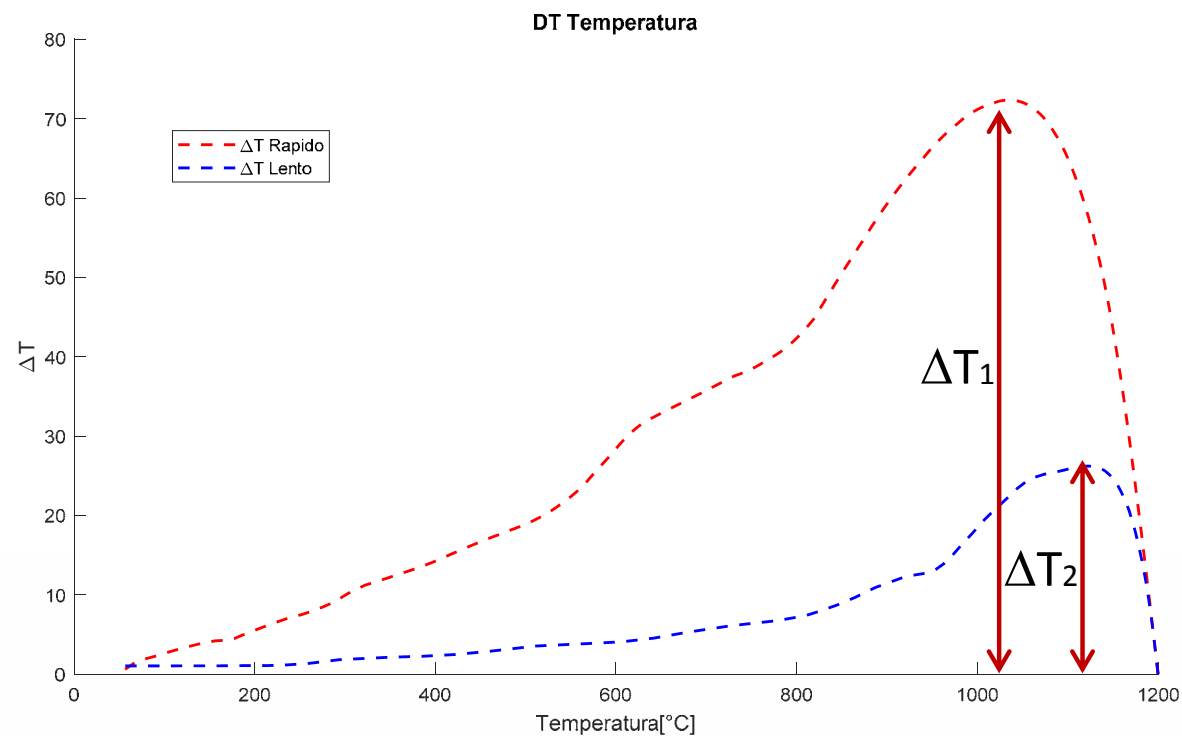
$$\alpha \uparrow \quad \Delta T = (T_{est} - T_{int}) \downarrow$$

FEM - Risultati: Profilo di temperatura (2/2)



- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Modellazione**
- Analisi
- Prove sperimentali
- Sviluppo software
- Conclusioni

Differenza di temperatura nella lastra per le due differenti curve di raffreddamento.

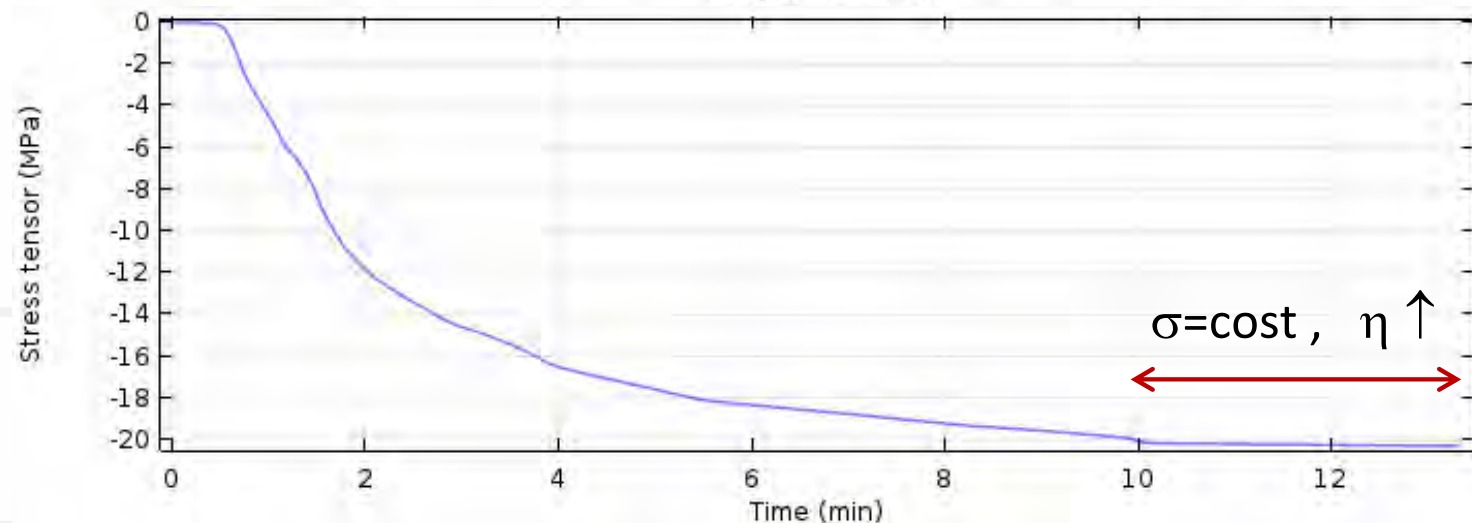
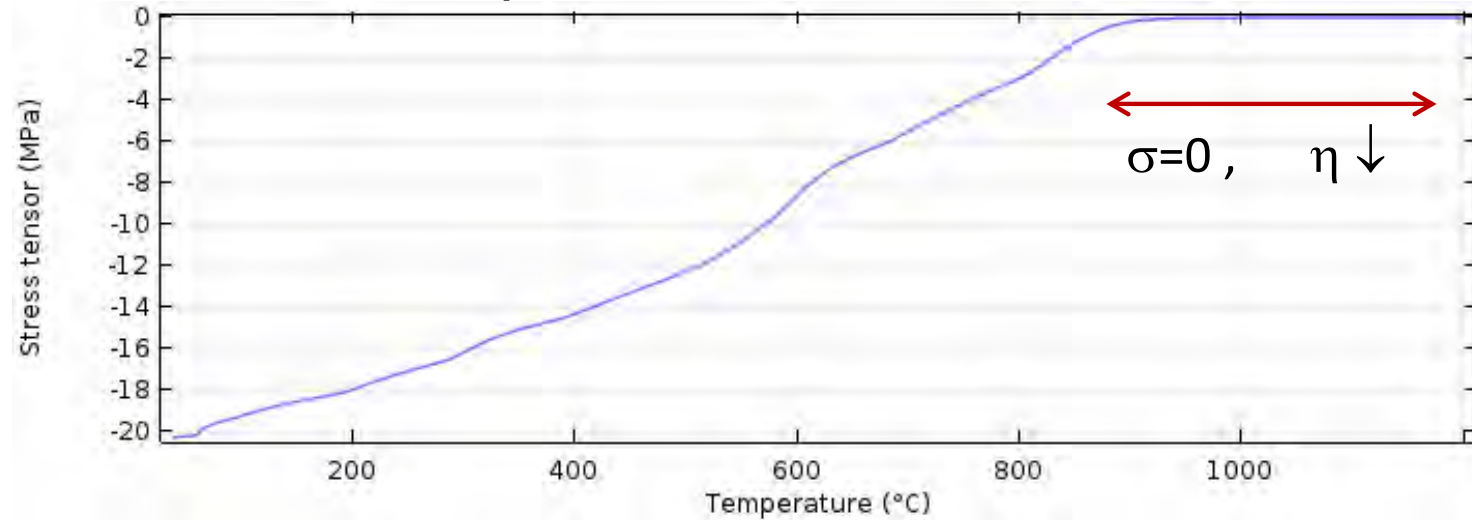


FEM - Risultati: Tensioni residue (1/2)



- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Modellazione**
- Analisi
- Prove sperimentali
- Sviluppo software
- Conclusioni

Andamento delle **tensioni** sulla superficie della lastra i funzione della temperatura di raffreddamento.

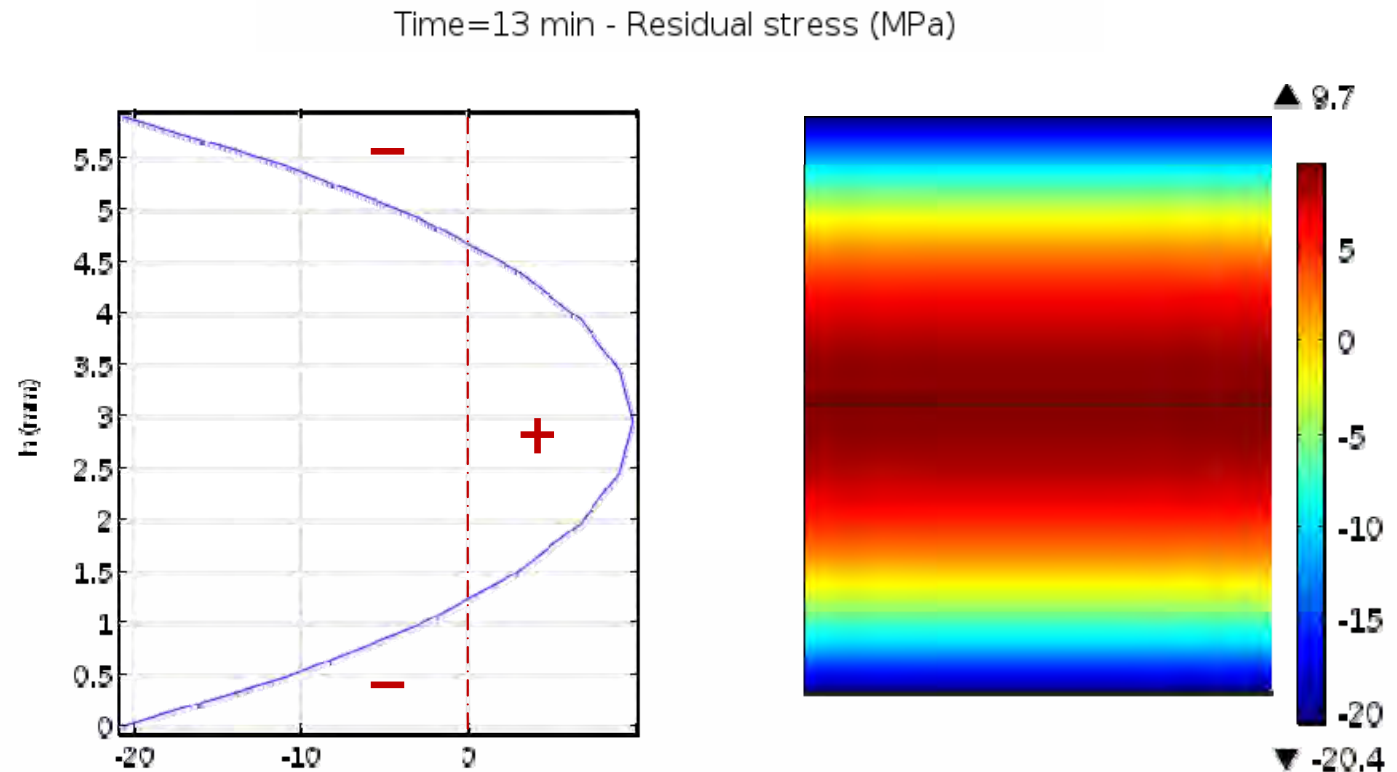


FEM - Risultati: Tensioni residue (2/2)



- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Modellazione**
- Analisi
- Prove sperimentali
- Sviluppo software
- Conclusioni

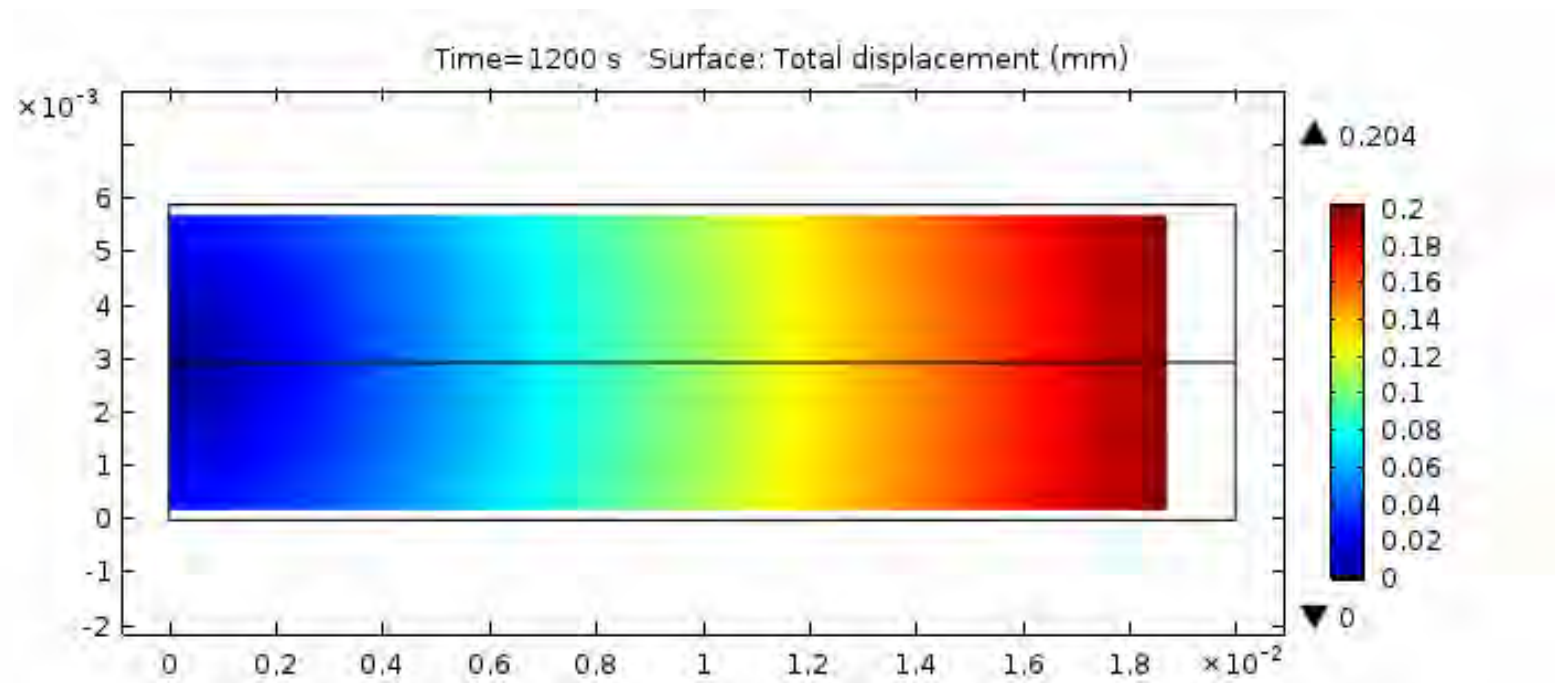
Andamento delle **tensioni residue** lungo la sezione della lastra al termine del processo di raffreddamento.





- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Modellazione**
- Analisi
- Prove sperimentali
- Sviluppo software
- Conclusioni

Deformata della lastra al termine del processo di raffreddamento





- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Model azione
- Analisi**
- Prove sperimentali
- Sviluppo software
- Conclusioni

A partire dalla tecnica di analisi precedentemente descritta vengono analizzati due fattori che possono portare a **difettosità del prodotto**:

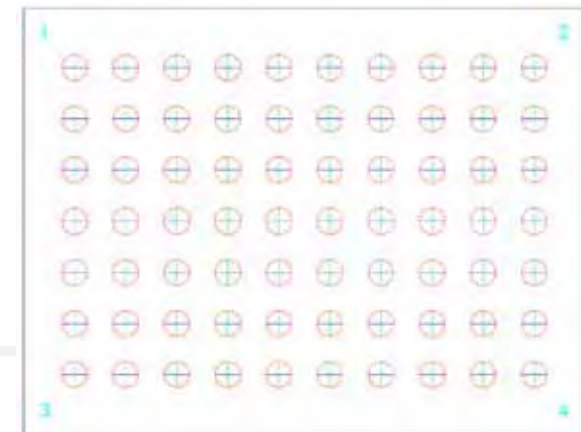
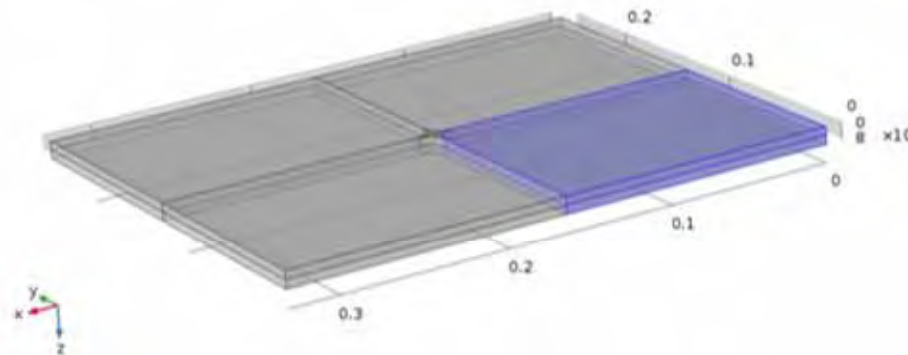
1. Difetto di densità.
2. Velocità di raffreddamento.

1-Difetto di densità



- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Model azione
- Analisi**
- Prove sperimentali
- Sviluppo software
- Conclusioni

- Creazione del difetto durante la fase di deposizione e compattazione dell'atomizzato,
- Stampa dei marker sulle lastre compatta,
- Acquisizione ad alta risoluzione della lastra cotta ,
- Confronto della deformata con i risultati ottenuti dalla simulazione numerica.



■ densità alta: $\rho_{max} = 2 \text{ g/cm}^3$
■ densità bassa: $\rho_{min} = 1.9 \text{ g/cm}^3$

1-Difetto di densità: Sinterizzazione (1/2)



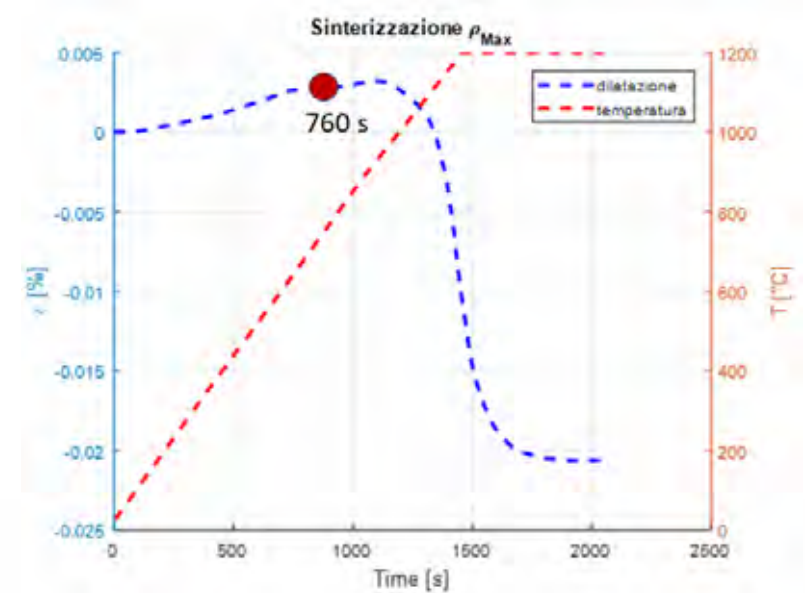
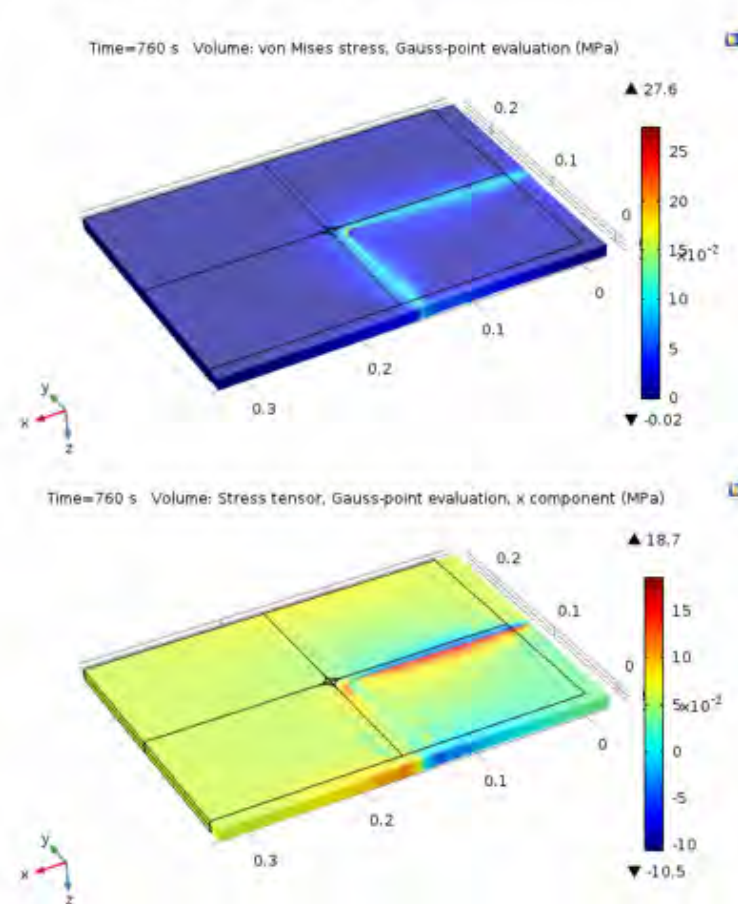
- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Model azione

Analisi

- Prove sperimentali
- Sviluppo software
- Conclusioni

Nella fase di cottura nascono delle tensioni all'interfaccia tra le due zone a diversa densità.

Time: 760s - Temp: 650°C



1-Difetto di densità: Sinterizzazione (2/2)



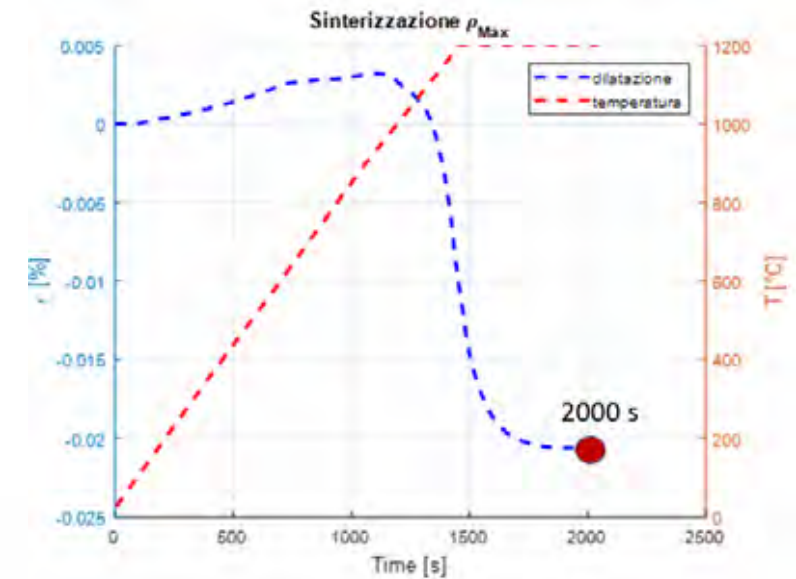
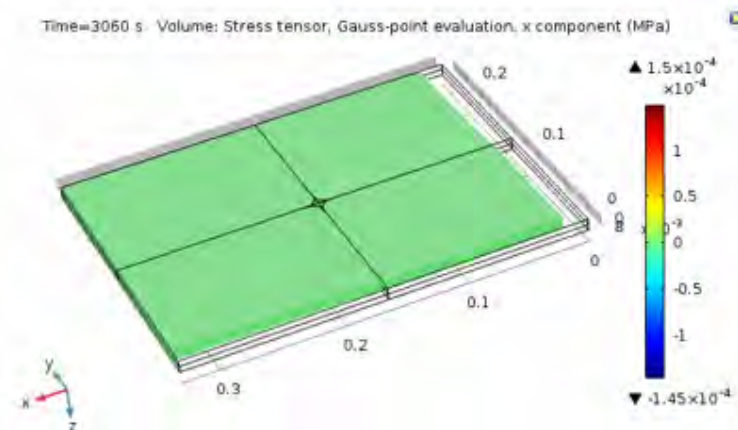
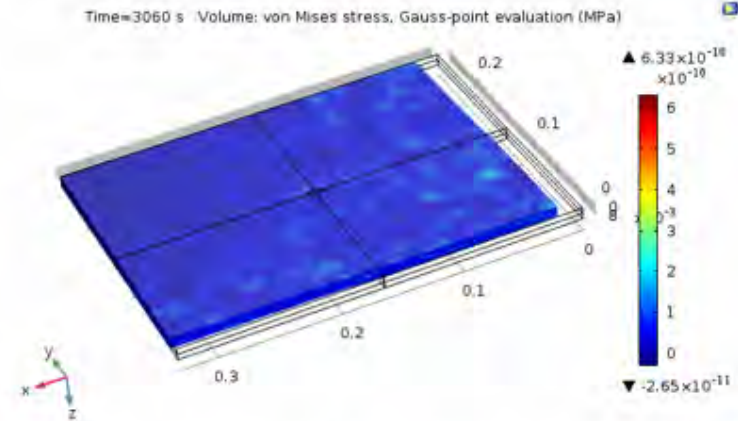
- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Model azione

Analisi

- Prove sperimentali
- Sviluppo software
- Conclusioni

Durante la sinterizzazione la viscosità è bassa e le tensioni si rilassano.

Time: 3060s - Temp: 1200°C

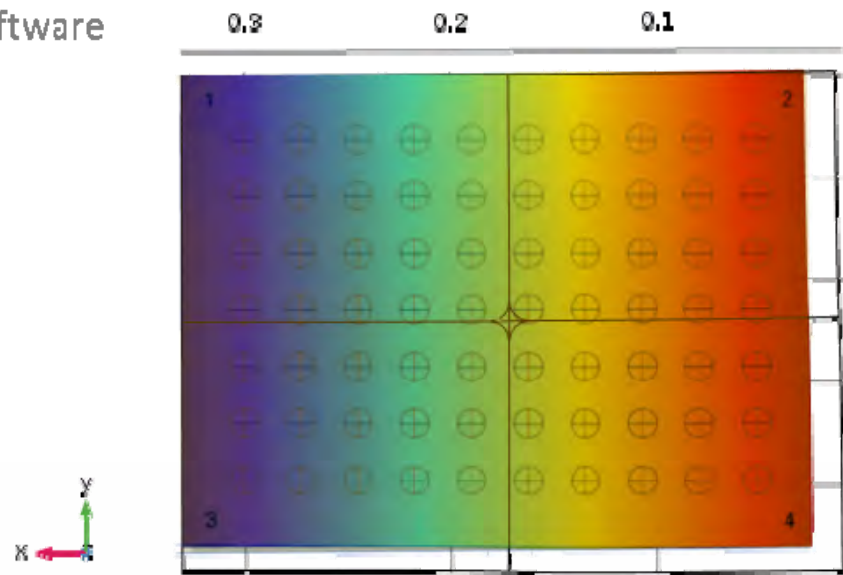


1-Difetto di densità: Raffreddamento

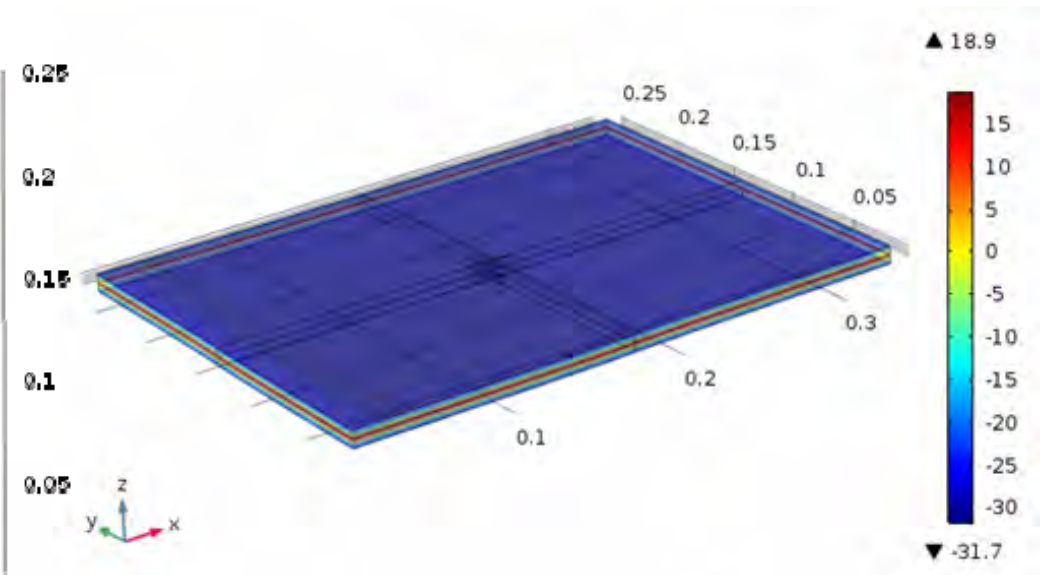


- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Model azione
- Analisi**
- Prove sperimentali
- Sviluppo software
- Conclusioni

La **deformata** che si ottiene con l'analisi trova riscontro con quella di una lastra cotta con difetto di densità la cui immagine è stata acquisita ad alta risoluzione.



Deformata



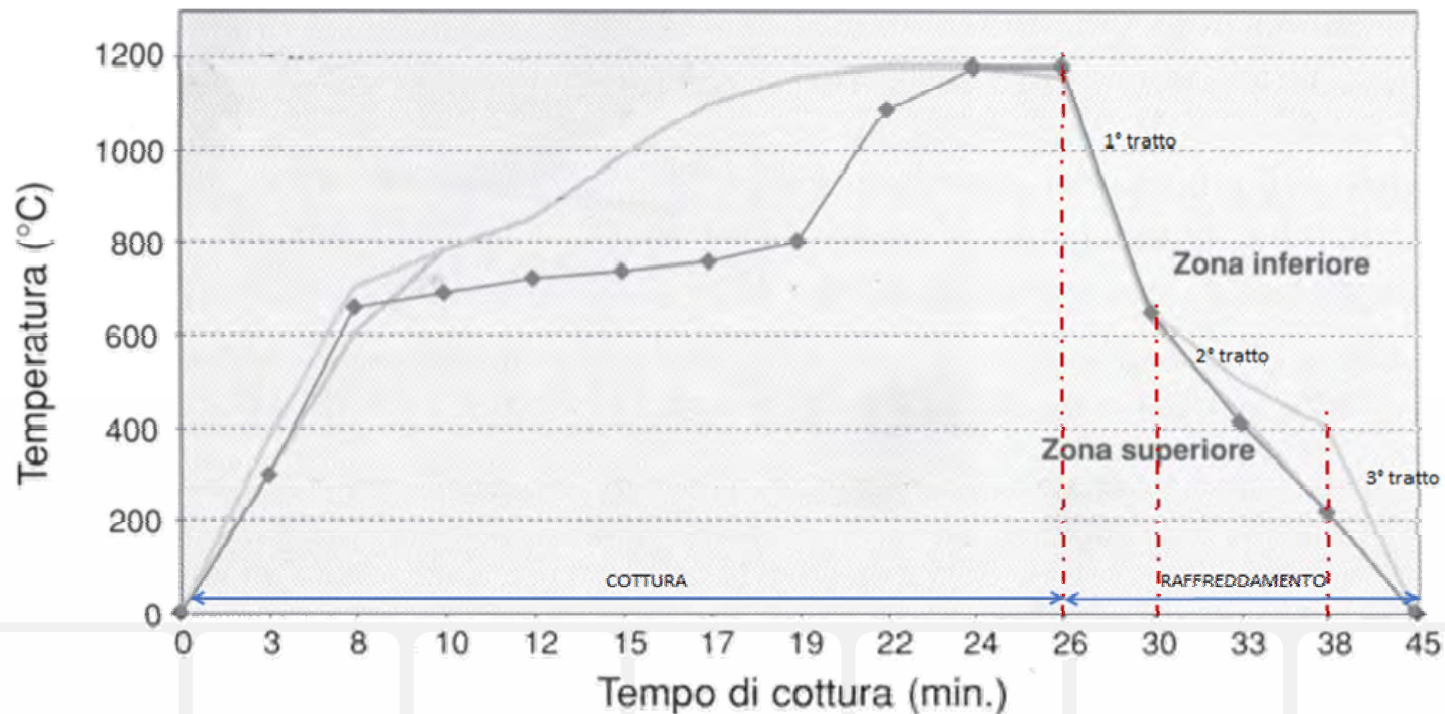
Tensioni residue

2-Variazione della curva di raffreddamento



- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Model azione
- Analisi**
- Prove sperimentali
- Sviluppo software
- Conclusioni

La prova consiste nel **riprodurre il processo di cottura** della lastra ceramica nella quale viene fatta variare solo la curva di raffreddamento (rapido, standard e lento).



2-Variazione della curva di raffreddamento: tensioni

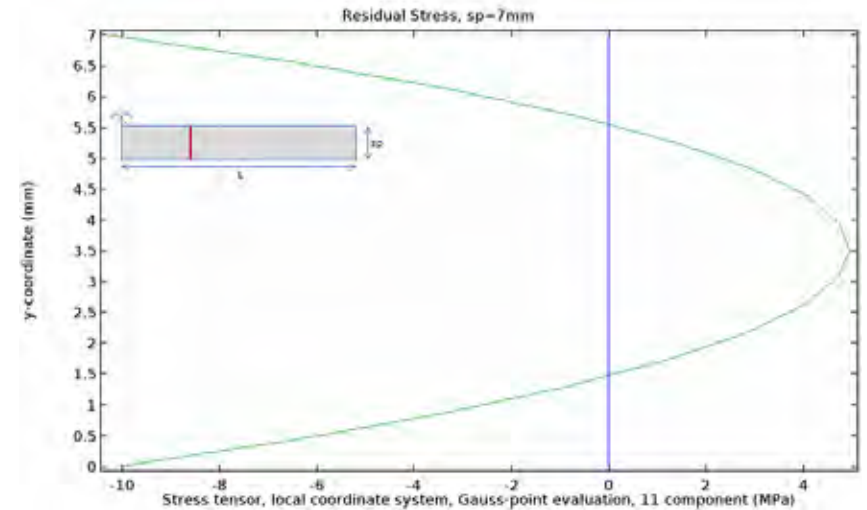
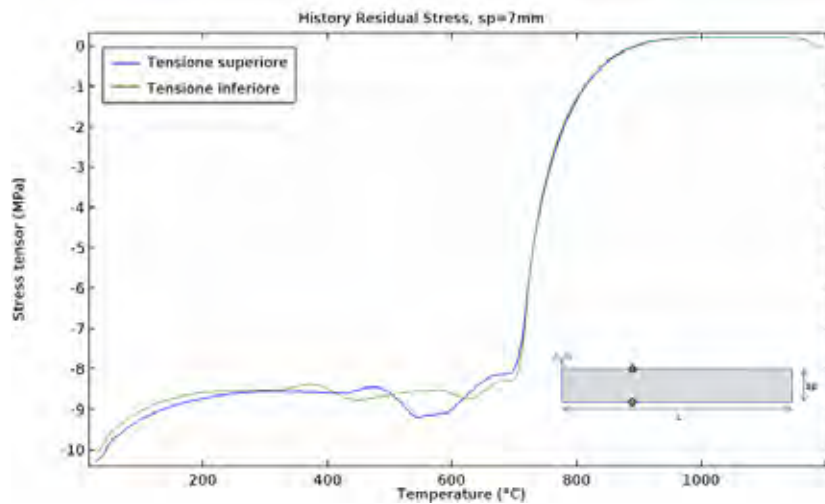


- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Model azione

Analisi

- Prove sperimentali
- Sviluppo software
- Conclusioni

Andamento delle tensioni sulla superficie e lungo lo spessore della lastra

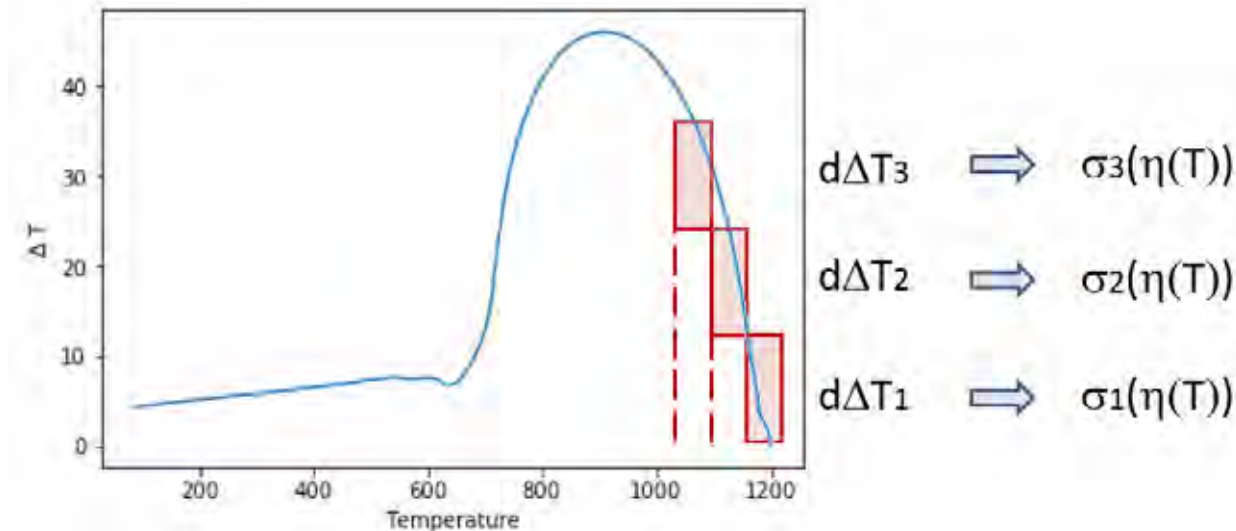


	Tensioni residue [MPa]		
Spessori lastra	7mm	14mm	21mm
Raffreddamento Rapido	-20	-30	-36
Raffreddamento Intermedio	-12	-21	-26
Raffreddamento Lento	-10	-15	-18



- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Modellazione
- Analisi
- Prove sperimentali
- Sviluppo software**
- Conclusioni

Procedura di calcolo semplificata (1D) sotto le ipotesi di profilo della temperatura parabolico e raffreddamento uniforme sulle superfici della lastra.



$$\sigma = \sigma^* e^{-dt/\tau} + \frac{2}{3} \cdot d\Delta T \cdot \alpha_r \cdot E \cdot e^{-dt/\tau}$$

dt = differenza tra il tempo iniziale e finale del singolo step di calcolo [s].

$d\Delta T$ = differenza di temperatura tra i step successivi di calcolo [°C].

τ = tempo di rilassamento [s].

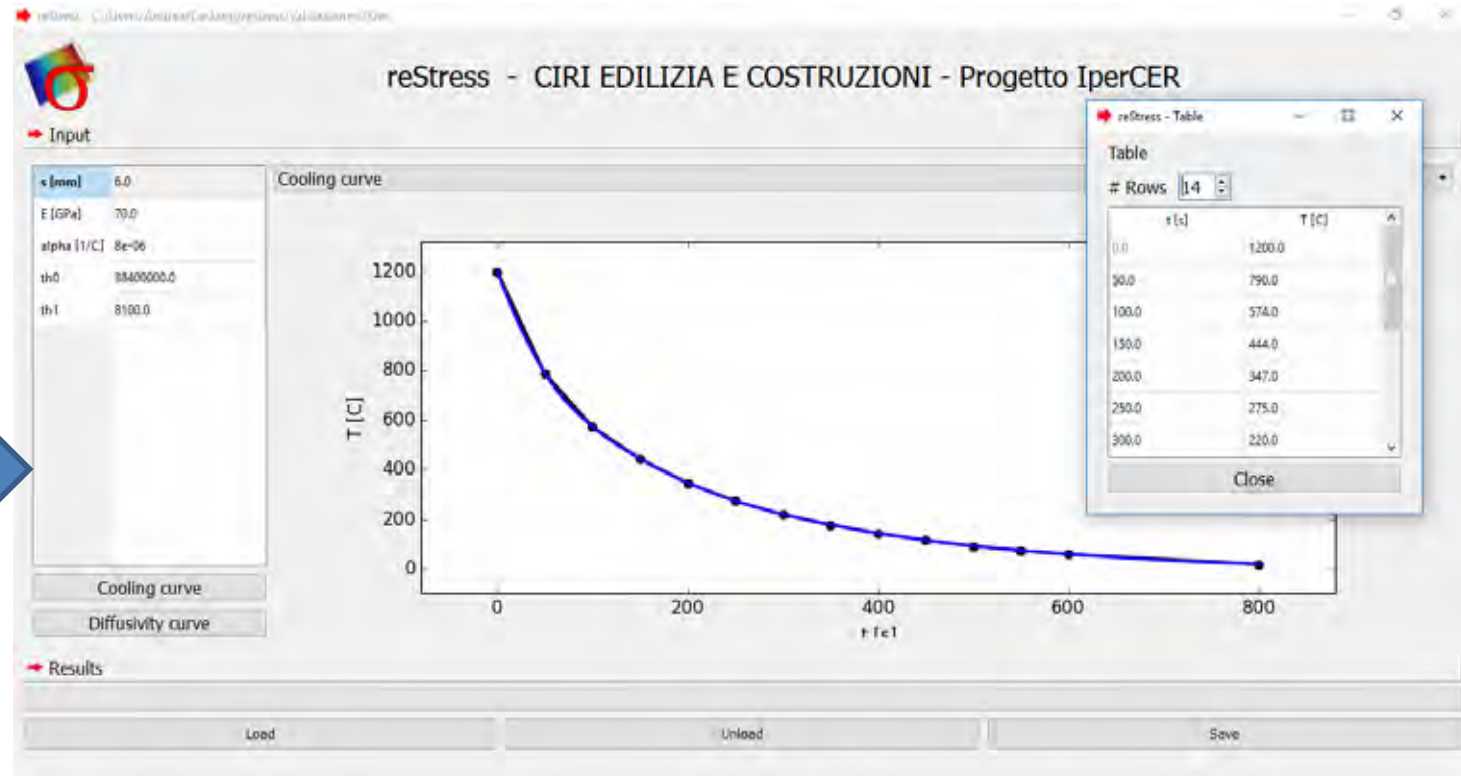
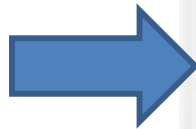
E = modulo elastico [Pa].

α_r = coefficiente di dilatazione termica [1/°C].

σ^* = tensione valutata allo step precedente [Pa].



- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Model azione
- Analisi
- Prove sperimentali
- Sviluppo software**
- Conclusioni

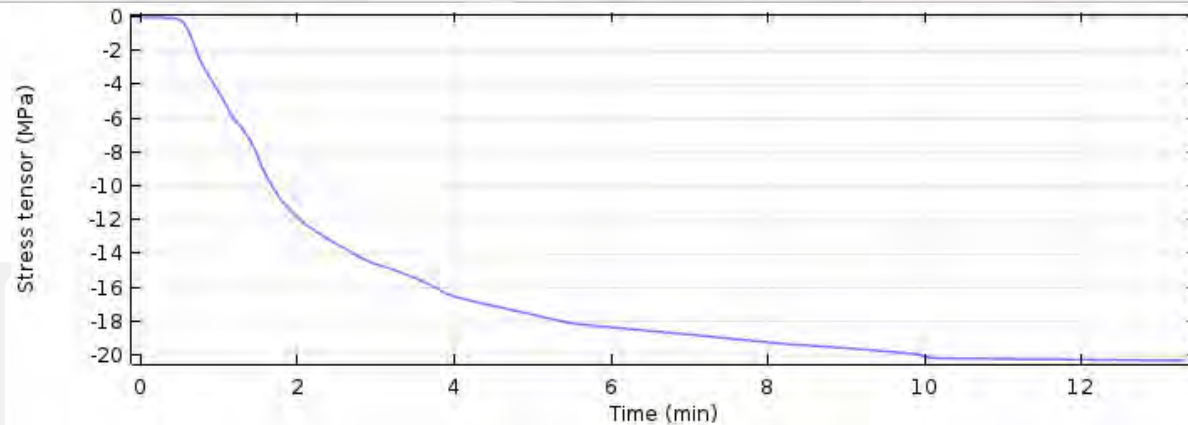
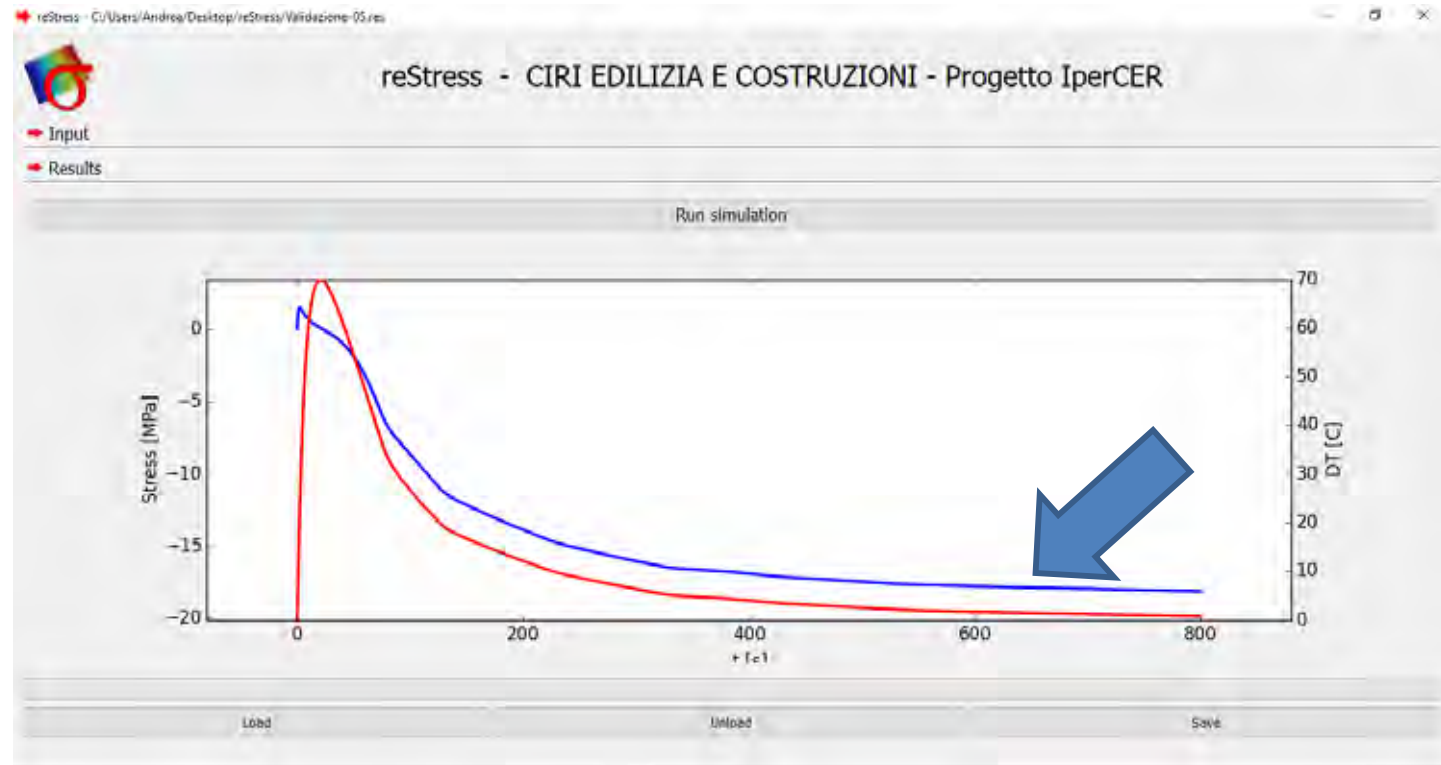


Vantaggi: - velocità di calcolo
- agile gestione dei parametri fondamentali per la stima delle tensioni:

Spessore, temperatura e viscosità



- Outline
- Obiettivi
- Introduzione
- Model azione
- Analisi
- Prove sperimentali
- Sviluppo software**
- Conclusioni





Outline

Obiettivi

Introduzione

Model azione

Analisi

Prove sperimentali

Sviluppo software

Conclusioni

- E' stato realizzato un modello numerico che consente di avere una **stima delle tensioni residue** al termine del processo produttivo,
- E' stato possibile valutare la **deformata** della lastra sia per effetti dovuti alle variazioni di densità che per l'utilizzo di differenti curve di raffreddamento,
- Il confronto tra i risultati ottenuti e quelli di letteratura conferma la bontà della procedura di analisi adottata.
- Lo studio condotto mette in luce le potenzialità degli strumenti di analisi numerica al fianco della ricerca nel settore ceramico.



GRAZIE PER L'ATTENZIONE!