

Presentazione del caso in esame: Saldatura Profonda

Lo scopo dell'elaborato è quello di verificare la fattibilità del processo di saldatura di due lastre di *alluminio 3003 H-18* dello spessore $s = 1\text{ mm}$ perfettamente accostate (saldatura passante, di testa, di un tratto lineare lungo $w = 80\text{ mm}$). Si è scelto di utilizzare una sorgente laser continua *Nd:YAG* caratterizzata dai seguenti dati di targa

$$P_{max} = 300\text{ W}$$

$$M^2 = 1 \text{ (sorgente gaussiana)}$$

$$\lambda = 1064\text{ nm}$$

Il sistema di ottica di tale laser è sintetizzabile nelle variabili di distanza e diametro focale

$$f = 127\text{ mm}$$

$$d_f = 8\text{ mm}$$

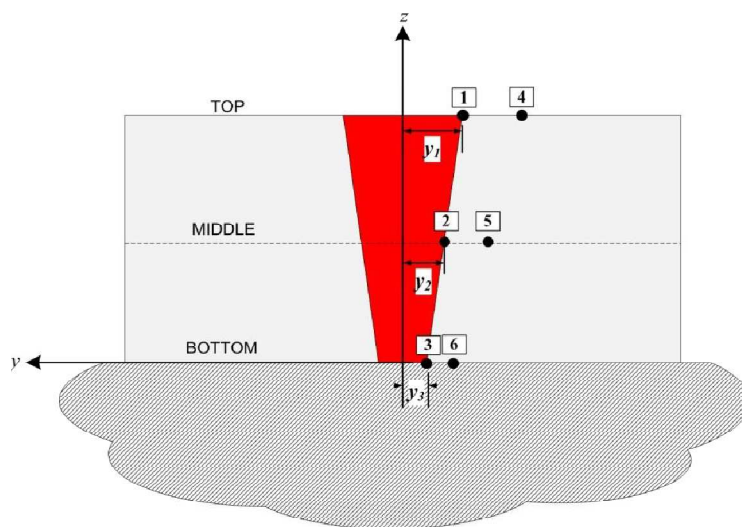
Si ipotizzano due condizioni di funzionamento ottimali con l'obiettivo di garantire una saldatura profonda *key-hole*, mantenendo la posizione del fuoco a metà dello spessore delle lamiere:

condizione 1	$P_{in} = 150\text{ W}$	$v = 40\text{ mm/s}$
condizione 2	$P_{in} = 200\text{ W}$	$v = 20\text{ mm/s}$

Una volta verificata la possibilità di compiere una saldatura profonda nelle due condizioni, si descrive il processo con un modello analitico e con un modello numerico ad elementi finiti.

In particolare si vuole valutare per entrambi i casi la forma della zona fusa e l'ampiezza dell'isoterma del cordone di saldatura sulla superficie superiore, a metà spessore e sulla superficie inferiore (si veda in proposito la figura).

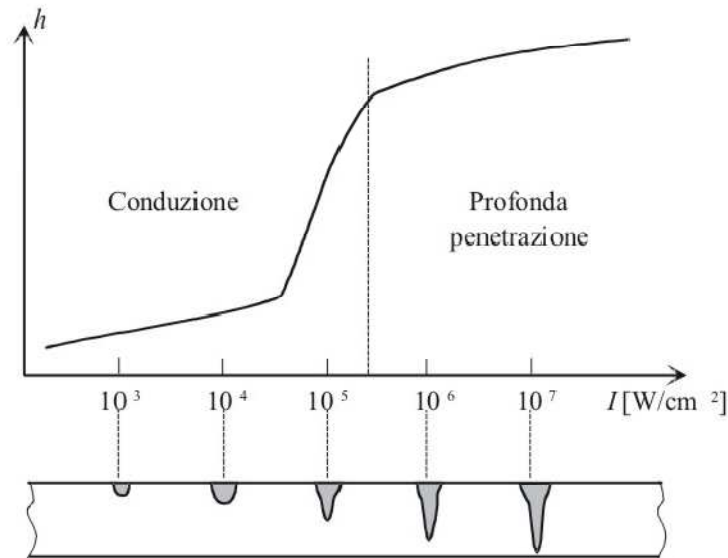
In un secondo momento si vuole indagare la velocità di raffreddamento in funzione del tempo dei punti 4, 5 e 6 in figura.



L'analisi verrà condotta confrontando il modello analitico con la simulazione ad elementi finiti, con l'ausilio rispettivamente dei software *MATLAB* e *COMSOL Multiphysics*.

Verifica di fattibilità

Per stabilire se effettivamente i parametri di processo soddisfano la condizione di saldatura profonda, si deve verificare che l'irradianza sia sufficiente per garantire su tutto lo spessore un valore minimo di 10^6 W/cm^2 . Oltre tale valore critico si può cominciare a parlare di saldatura profonda.



Dalle tabelle della lega di alluminio considerata si ricavano le seguenti proprietà chimico-fisiche:

Al 3003 H-18

$$\rho = 2730 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$c_p = 0,893 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$k = 155 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$$

$$T_{\text{solidus}} = 643 \text{ }^\circ\text{C} = 916.15 \text{ K}$$

$$T_{\text{liquidus}} = 654 \text{ }^\circ\text{C} = 927.15 \text{ K}$$

La definizione di irradianza è la seguente

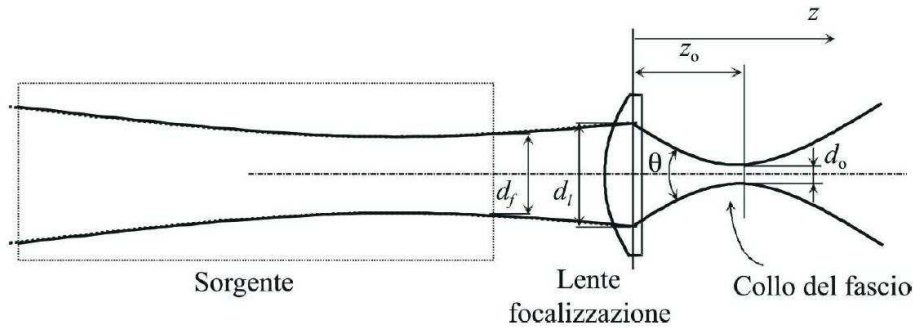
$$I(z) = \frac{P_{\text{in}}}{A(z)}$$

che è funzione di z perché il diametro dello spot laser varia sullo spessore. Infatti dall'equazione della caustica si ricava il diametro $d(z)$ a una distanza z dalla focale:

$$d^2(z) = d_0^2 + (z - z_0)^2 \theta^2$$

Da semplici considerazioni geometriche si possono esprimere il diametro minimo d_0 e la divergenza θ del fascio:

$$d^2(z) = d_0^2 + (z - z_0)^2 \theta^2 = \left(\frac{4}{\pi} \lambda \frac{f}{d_f} M^2 \right)^2 + (z - z_0)^2 \left(\frac{d_f}{f} M^2 \right)^2$$



Sapendo che il fascio è focalizzato a metà dello spessore, si verifica che l'irradianza alla coordinata $(z - z_0) = 0,5$ sia superiore al valore critico di 10^6 W/cm^2 .

$$d_{0g} = \frac{4}{\pi} \lambda \frac{f}{d_f} M^2 = 0,0215 \text{ mm}$$

$$\theta_g = \frac{d_f}{f} M^2 = 0,063 \text{ rad}$$

$$d = \sqrt{d_0^2 + (0,5)^2 \theta^2} = 0,0381 \text{ mm}$$

Pertanto la superficie irradiata per tale diametro, che è la massima sullo spessore, è pari a

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = 1,14 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2$$

Nelle due condizioni considerate varia la potenza, e di conseguenza l'irradianza si calcola come

$$I(P_1) = \frac{P_1}{A(z)} = 13130490 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

$$I(P_2) = \frac{P_2}{A(z)} = 17507320 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

Questi valori soddisfano entrambi le condizioni minime di saldatura profonda.

Una volta appurato che l'irradianza permette l'operazione di saldatura in profondità, è necessario valutare se effettivamente anche la velocità è compatibile con una saldatura di tipo *key-hole* passante. Per fare ciò si utilizza un approccio energetico.

Se si bilancia la potenza entrante dovuta al raggio laser con quella assorbita dal materiale per fondersi si arriva a un'equazione del tipo

$$A \cdot P = w \cdot t \cdot v \cdot \rho \cdot [c_p(T_f - T_a) + L_f + m' L_v]$$

in cui A è il coefficiente di assorbimento, P è la potenza incidente, w l'ampiezza media del cordone, t lo spessore della lamiera, ρ la densità, c_p il calore specifico, T_f la temperatura di fusione, T_a la temperatura ambiente, L_f e L_v il calore latente di fusione e vaporizzazione.

Perché tutto il cordone fonda deve essere almeno

$$A \cdot P > w \cdot t \cdot v \cdot \rho \cdot [c_p(T_f - T_a) + L_f + m' L_v]$$

$$P > \frac{w \cdot t \cdot v \cdot \rho \cdot [c_p(T_f - T_a) + L_f + m' L_v]}{A}$$

Si considera in prima approssimazione la larghezza del cordone di saldatura pari al diametro del raggio laser $w = d_0$. Inoltre si considera il coefficiente $A = 1$, in quanto una volta innescata la fusione l'assorbimento è pressoché unitario. Si ipotizza che il 10% del metallo vaporizza, mentre si trascura l'energia assorbita nell'eventuale formazione di plasma.

Nel caso di velocità di taglio $v_1 = 0.04 \text{ m/s}$, perché la lamiera si fonda per tutto lo spessore deve essere

$$P > 4,77 \text{ W}$$

relazione che è pienamente verificata

Nel caso in cui invece $v_2 = 0.02 \text{ m/s}$ è necessaria una potenza minima

$$P > 2,38 \text{ W}$$

che rispetta il parametro $P = 200 \text{ W}$.

Quindi, apparentemente, in entrambi i casi è possibile compiere una saldatura profonda passante. In seguito si discuterà la bontà del modello appena utilizzato e delle considerazioni applicate, alla luce dei risultati ottenuti con metodi più precisi.

Modello analitico: cordone di saldatura

Per descrivere il fenomeno di saldatura laser si ricorre a un modello di sorgente lineare in movimento. Per rappresentare il campo termico nell'intorno della sorgente ci si serve di un sistema di riferimento solidale con essa. In questo caso non c'è alcuna variazione temporale della temperatura attorno alla sorgente in movimento; l'equazione di tale sistema è

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -2\lambda v \frac{\partial T}{\partial \xi}$$

La soluzione della EDP precedente, considerando la geometria delle piastre come 2D e la forma della sorgente lineare è la seguente:

$$T(\xi, y) = T_i + \frac{q'}{2\pi k} \exp(-\lambda v \xi) \text{Bessel}K_0(\lambda v r)$$

che rappresenta il campo di temperatura nel sistema traslante con velocità v . Il valore di temperatura T_i è pari alla $T_{amb} = 300 \text{ K}$; $\lambda = \frac{1}{2\alpha}$ dove $\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p}$ è la diffusività termica.

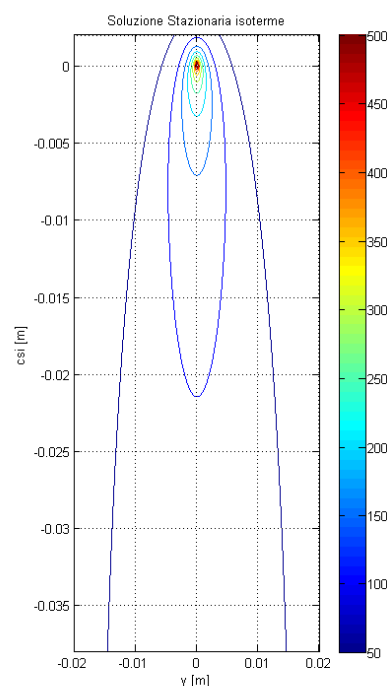
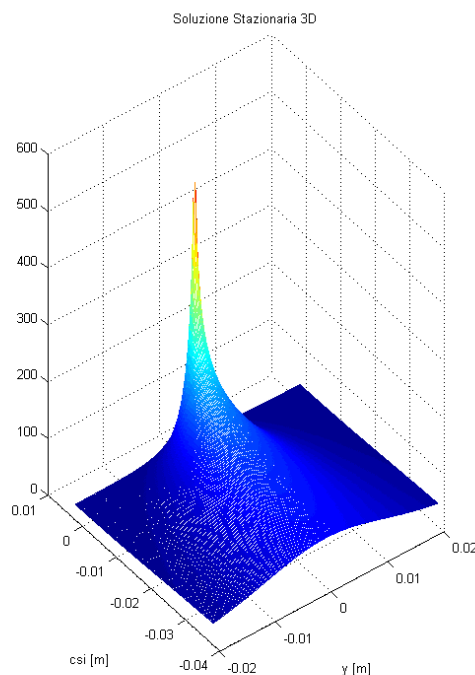
Le condizioni di funzionamento prese in esame definiscono i parametri di flusso lineare $q' = \frac{P_{in}}{s}$ e il valore della velocità di lavoro.

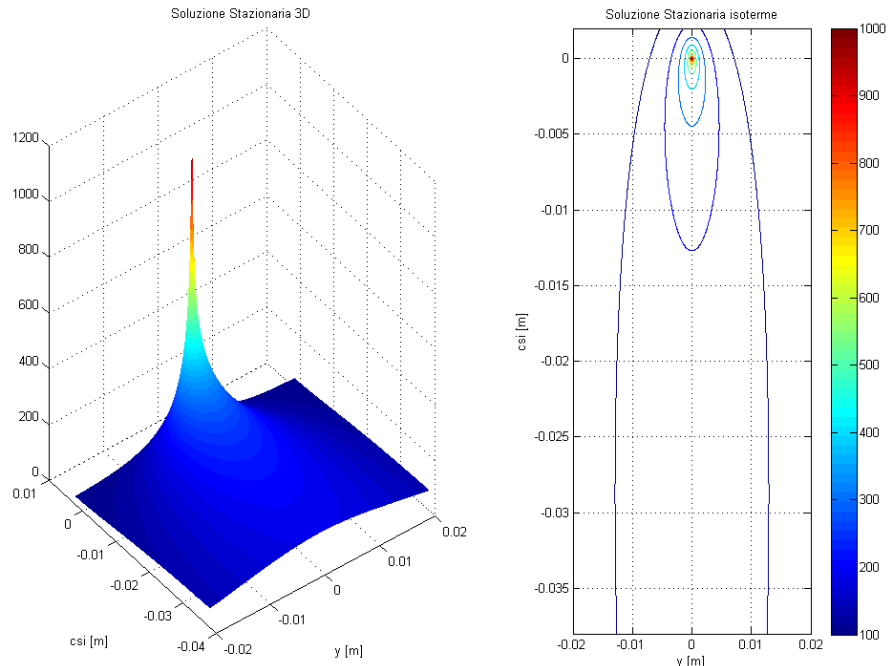
Trascrivendo questa fenomenologia fisica in linguaggio MATLAB è possibile tracciare l'andamento della temperatura in un grafico 3D. Per completezza si riporta anche il grafico delle isoterme.

condizione 1

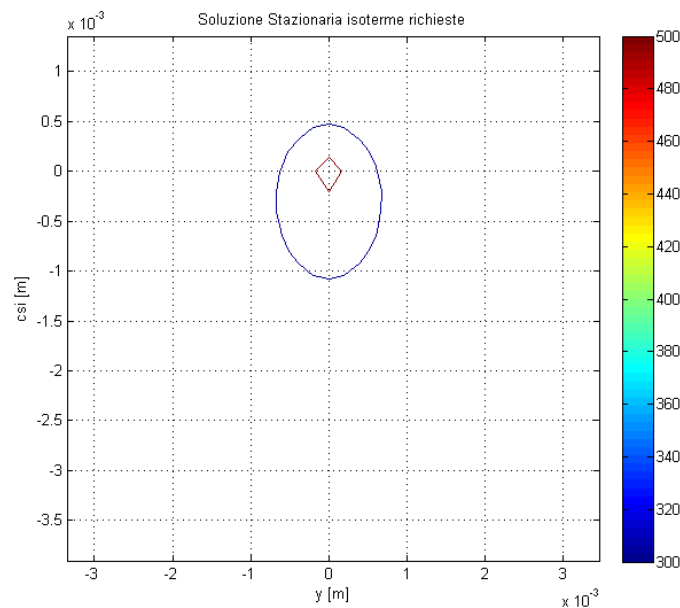
$P_{in} = 150 \text{ W}$

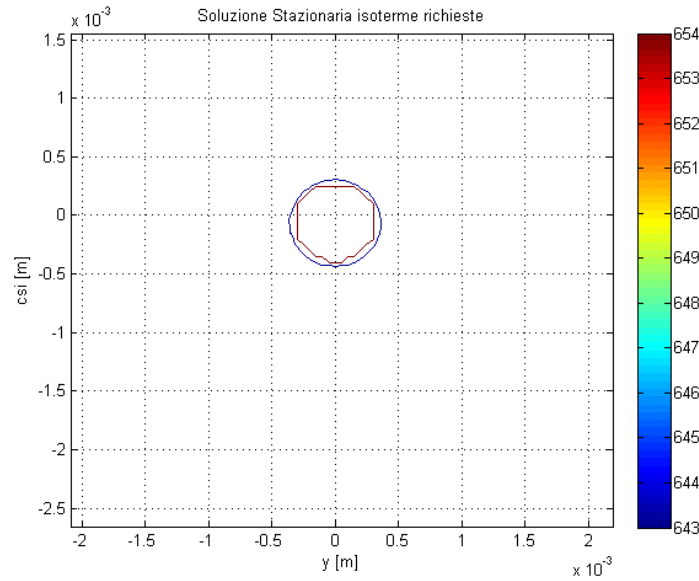
$v = 40 \text{ mm/s}$





Per valutare la larghezza del cordone di saldatura si considera la regione della superficie racchiusa nell'isoterma avente temperatura di fusione $T_f = T_{liquidus}$; l'ampiezza di tale curva in direzione y è una buona approssimazione dell'entità del cordone di saldatura. Poiché il modello utilizzato considera 2 dimensioni prevalenti sullo spessore, vale la condizione $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$, ovvero la temperatura è costante lungo lo spessore. Nei grafici viene evidenziata anche l'isoterma a $T_{solidus}$ che identifica la zona termicamente alterata delle lamiere.





Si nota che con il primo set di parametri la lamiera non arriva a temperatura di fusione; sono state graficate due isoterme puramente indicative. Nel secondo caso invece l'entità del cordone di saldatura è pari all'ampiezza dell'isoterma a $T_{liquidus}$ (linea di colore rosso), ovvero si ha un'ampiezza di materiale fuso di $w = 0.6 \text{ mm}$ lungo tutto lo spessore. La *heat affected zone* è praticamente limitata al materiale fuso, in quanto l'isoterma a $T_{solidus}$ (linea blu) è di fatto sovrapponibile a quella della temperatura di fusione.

Già da questi risultati troviamo una netta discordanza da quanto trovato con un modello decisamente semplificato sulla fattibilità di saldatura. Introducendo una maggiore complessità analitica, ad esempio introducendo l'equazione di conduzione del calore, ci si rende conto dei limiti di un primo approccio basato su un modello energetico grossolano. Alla luce di queste nuove conclusioni, si può affermare che nelle condizioni 1 le lastre non sono saldabili.

Modello analitico: velocità di raffreddamento

L'analisi dei tempi di raffreddamento porta a considerare un altro sistema di riferimento per poter meglio descrivere il fenomeno. Si utilizza ora un sistema assoluto tempo variante, che modifica in questo modo l'espressione del campo di temperature:

$$T(x, y, t) = T_i + \frac{q'}{2\pi k} \exp(-\lambda v(x - vt)) \text{Bessel}K_0(\lambda v \sqrt{(x - vt)^2 + y^2})$$

Con questa formulazione è pertanto possibile descrivere l'andamento spazio-temporale della temperatura del punto in esame, ovvero quello a distanza dalla linea di saldatura 0.6 mm . Insieme alla

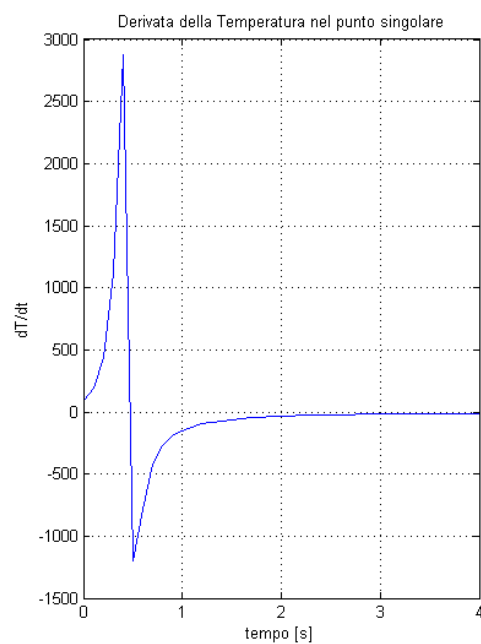
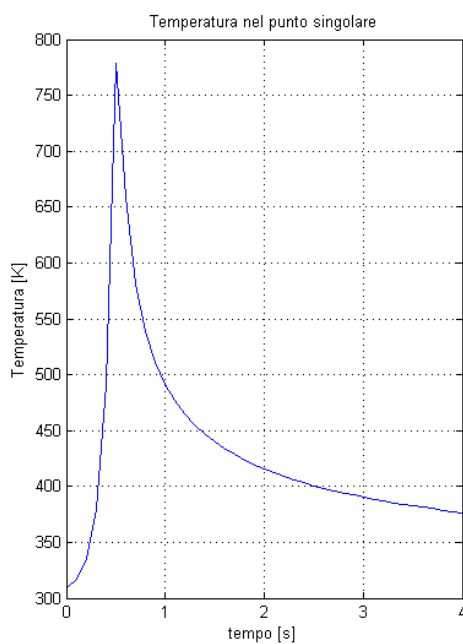
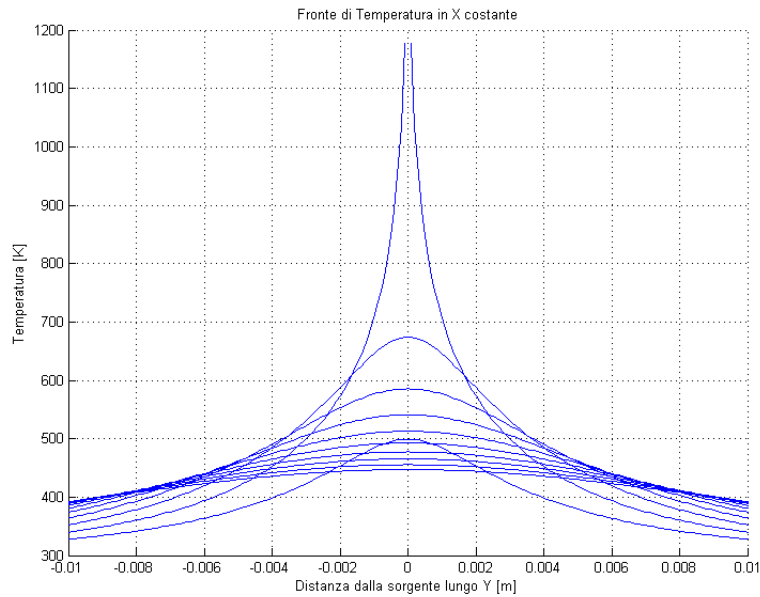
storia temporale graficata nel diagramma (T, t) , viene rappresentato anche il rateo di raffreddamento, che non è altro che la derivata temporale della funzione precedente, visibile sui diagrammi $\left(\frac{\partial T}{\partial t}, t\right)$.

Si rappresentano anche le curve di temperatura ai diversi istanti temporali sullo spessore, di modo da mettere in risalto il raffreddamento sul piano ortogonale al cordone di saldatura. Si considera solamente la condizione 2, l'unica in cui si ha fusione di materiale:

condizione 2

$P_{in} = 200 \text{ W}$

$v = 20 \text{ mm/s}$



Simulazione a elementi finiti

Si procede quindi alla validazione del modello analitico impostato in MATLAB. Con l'ausilio del software di simulazione *COMSOL* si rappresenta la sorgente di calore lineare in movimento che agisce sulle piastre tridimensionali.

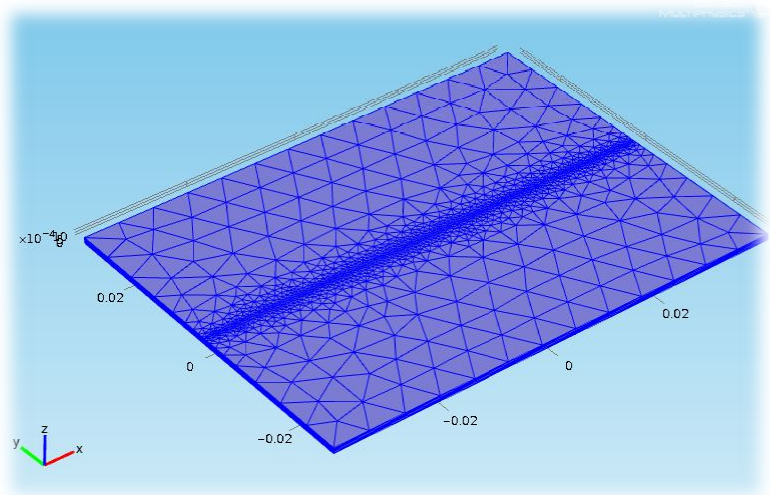
Al dominio rappresentato dalle piastre è associata l'equazione di conduzione del calore in 3D:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k \nabla T) = Q$$

dove in questo caso la generazione interna di calore è nulla, in quanto deriva dalla sorgente lineare. Per la definizione di quest'ultima, si è descritto un dominio lineare tramite la formulazione debole che considera sia la penetrazione che la conduzione del calore. Accoppiati i due modelli, si simula il fenomeno tempovariante.

Gli elementi finiti scelti per il dominio 3D sono di tipo triangolari, sweepati lungo lo spessore della piastra. Per ottimizzare le risorse di calcolo si è inoltre scelta una distribuzione più fine intorno alla linea rappresentante il cordone di saldatura, mentre si è optato per una mesh più lasca distante da tale punto di interesse.

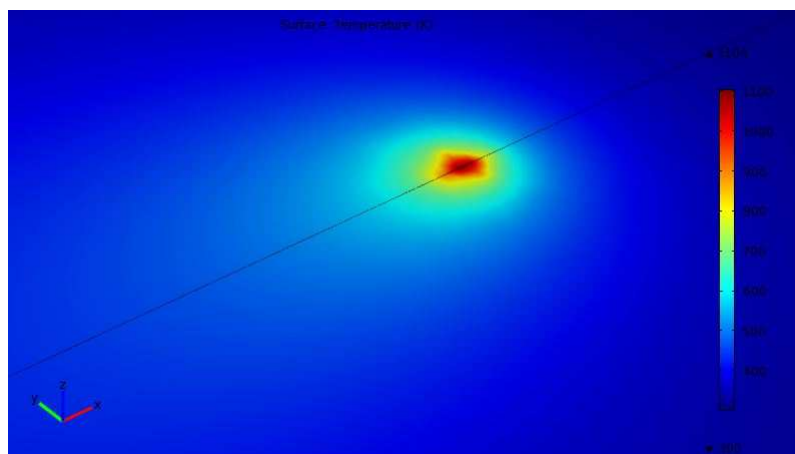
Nel seguito sono riportati i risultati della simulazione nei due casi, direttamente confrontabili con il modello analitico.

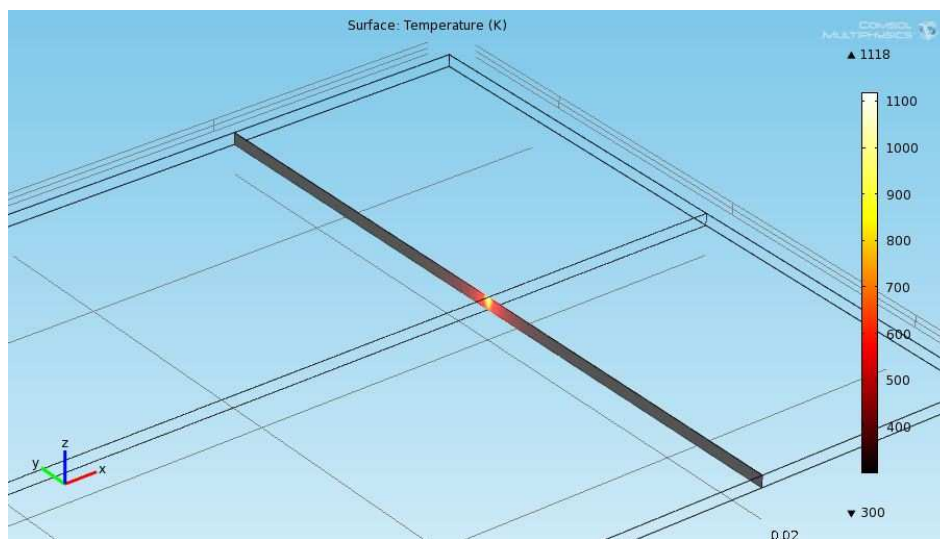


condizione 1

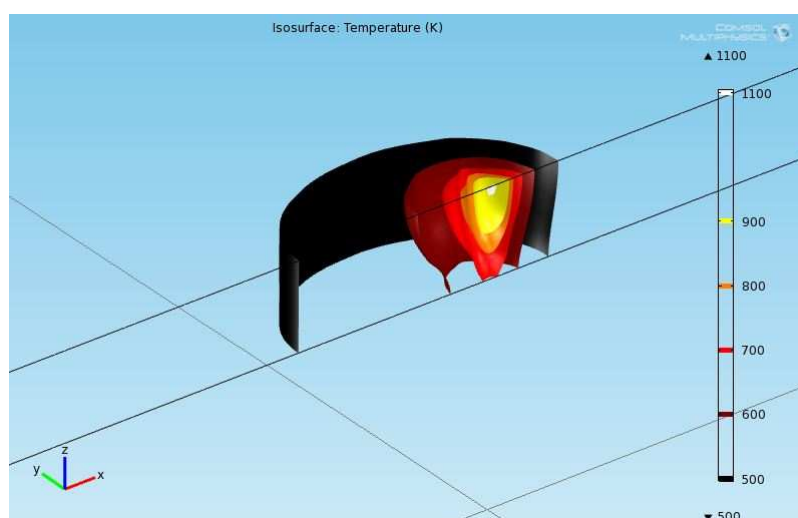
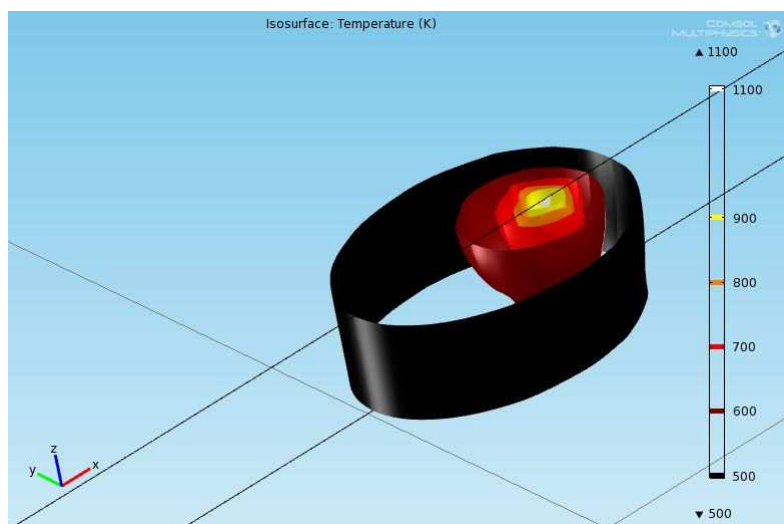
$P_{in} = 150 \text{ W}$

$v = 40 \text{ mm/s}$

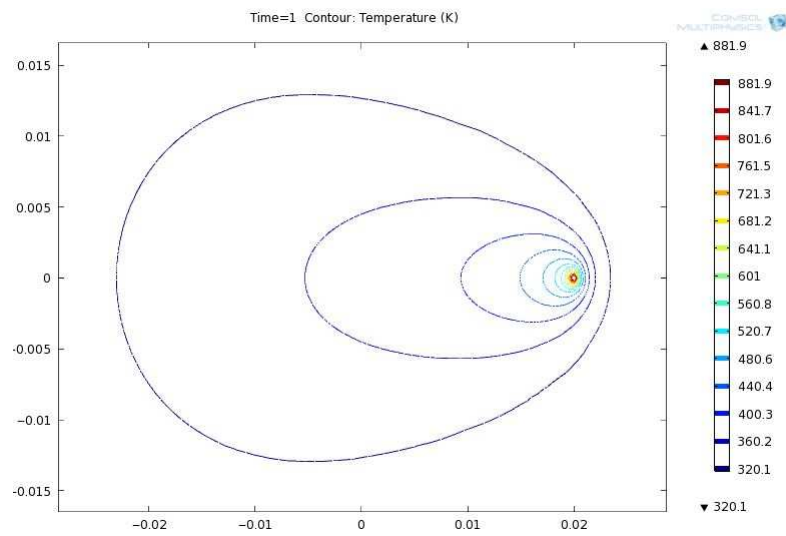




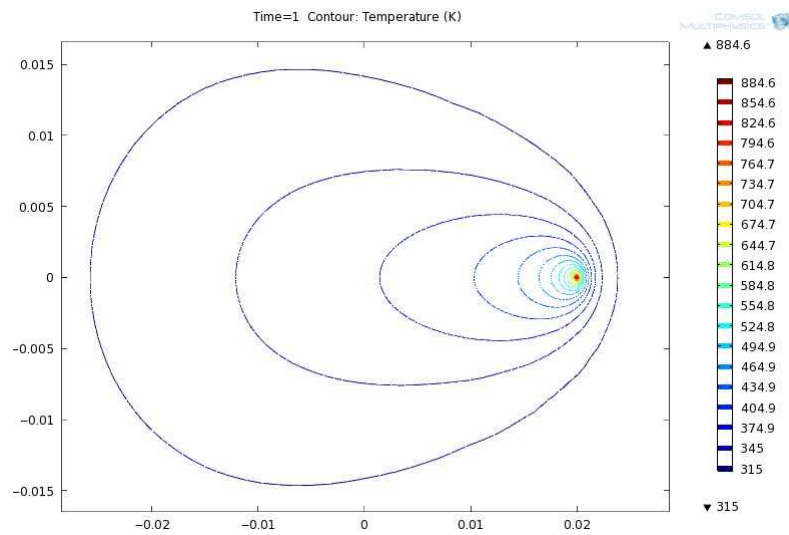
Isosuperfici



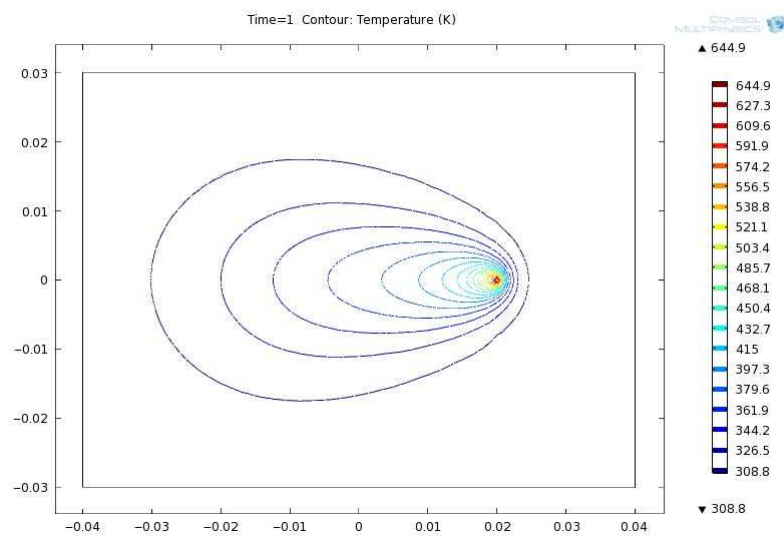
Isoterme in superficie



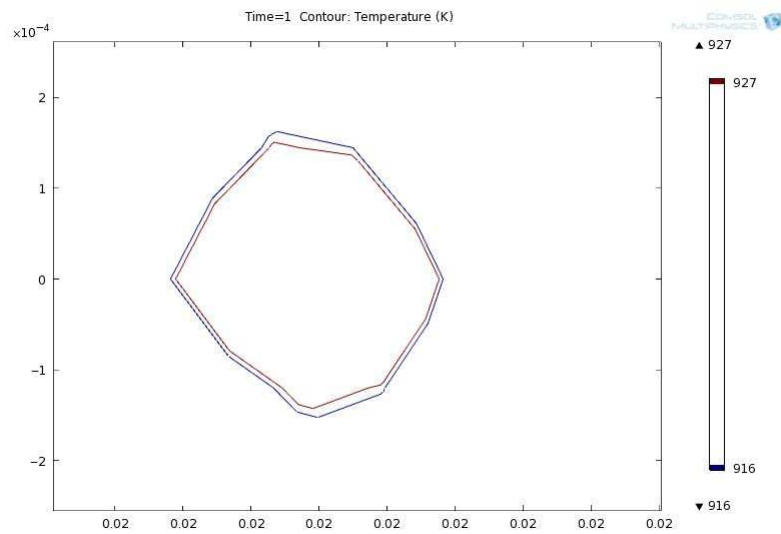
Isoterme a metà spessore



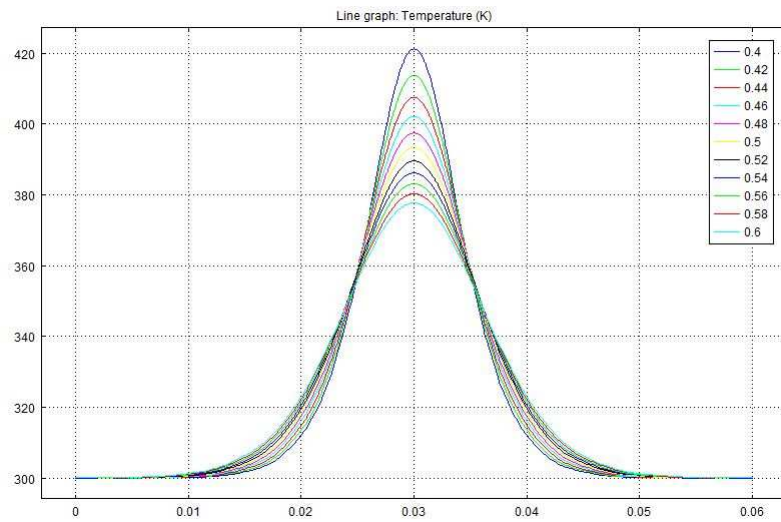
Isoterme alla base



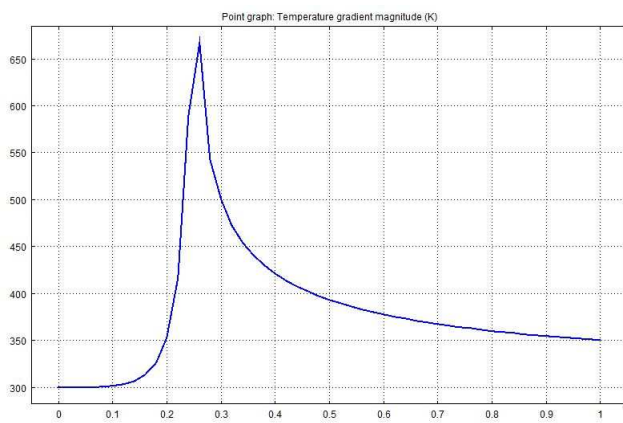
Zona fusa (superficie) ($y_1 = 0.15 \text{ mm}$)



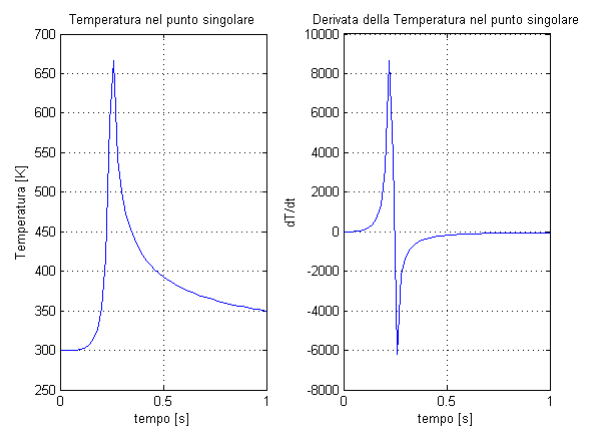
Temperatura sulla sezione al variare del tempo (superficie)

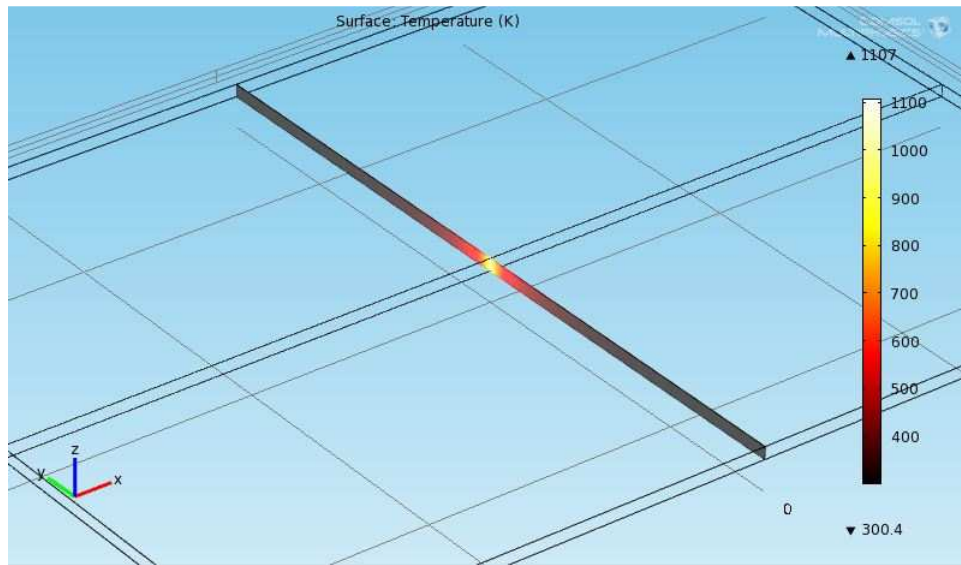


Temperatura nel tempo (punto 4) ($y_4 = 0.3 \text{ mm}$)

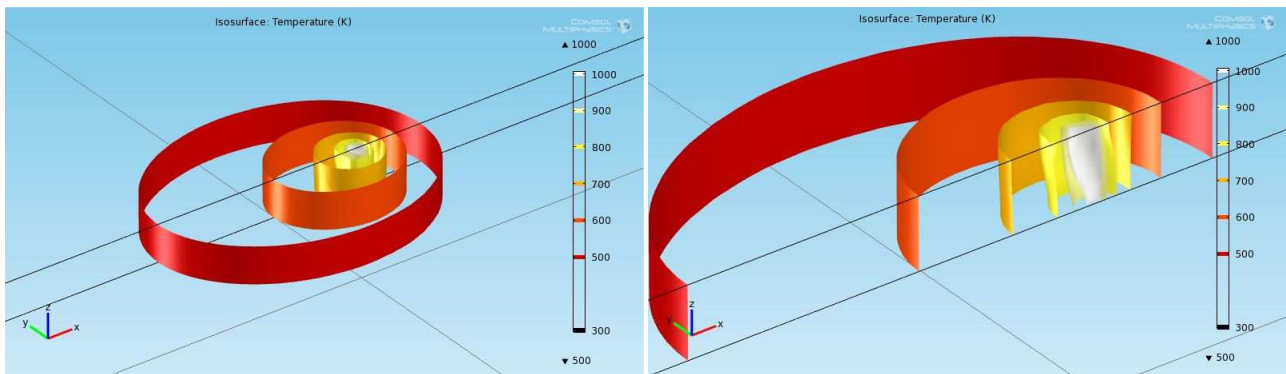


Velocità di raffreddamento (punto 4)

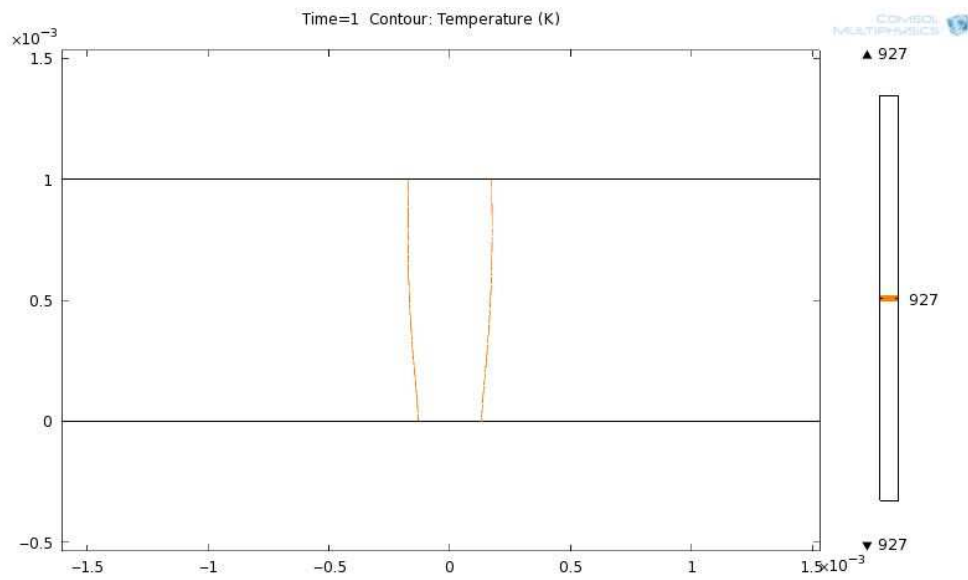




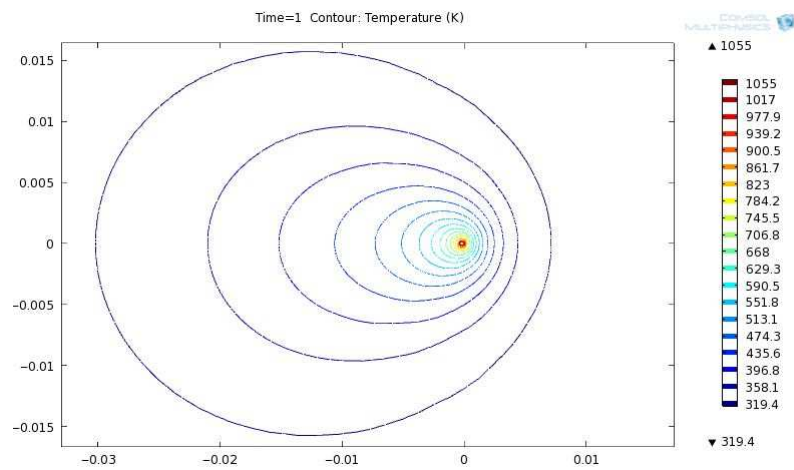
Isosuperfici



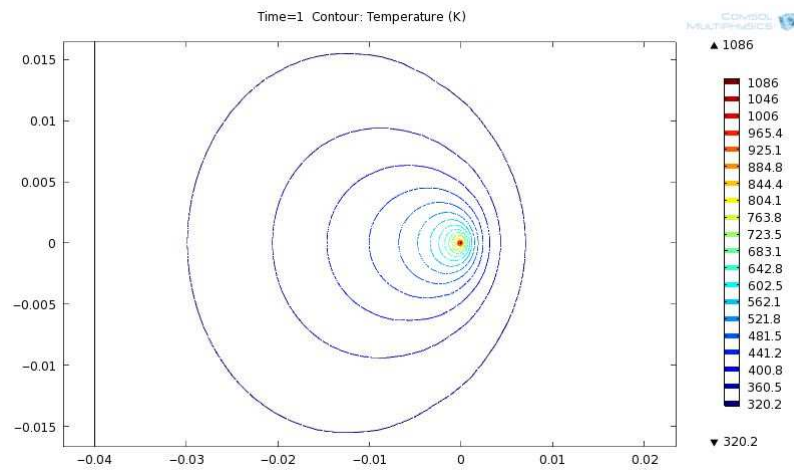
Zona fusa



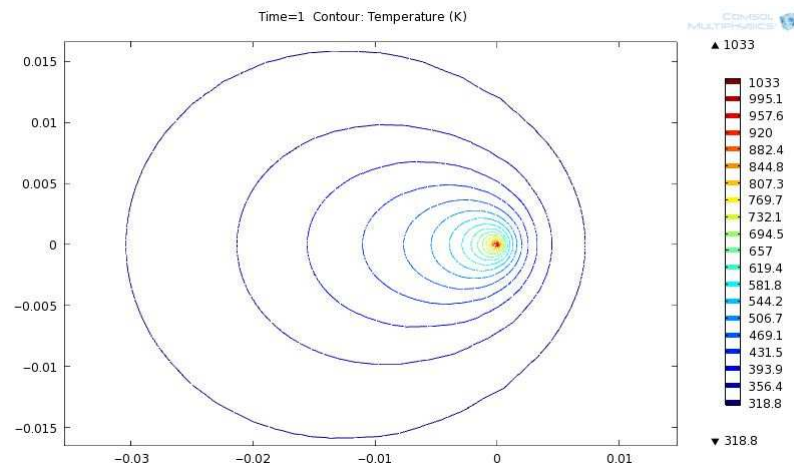
Isoterme in superficie



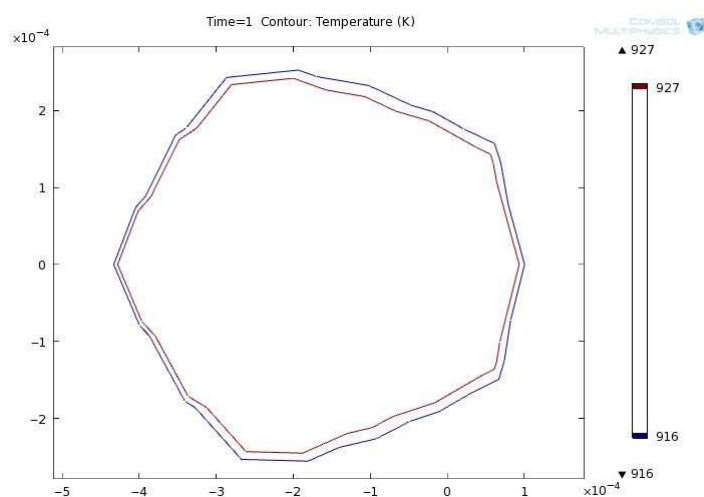
Isoterme a metà spessore



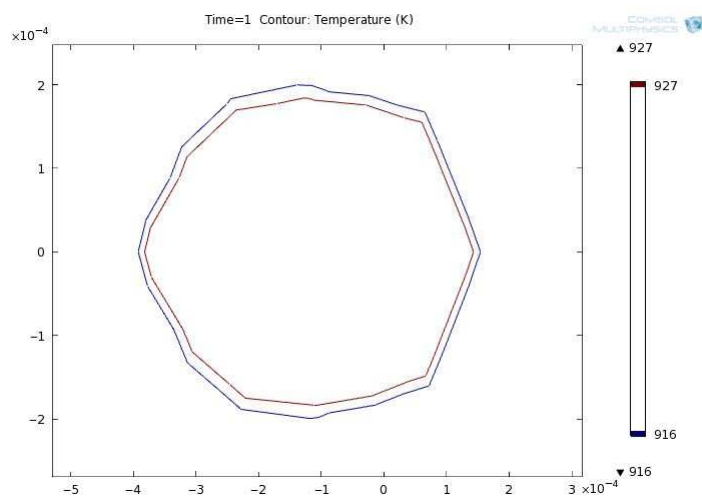
Isoterme alla base



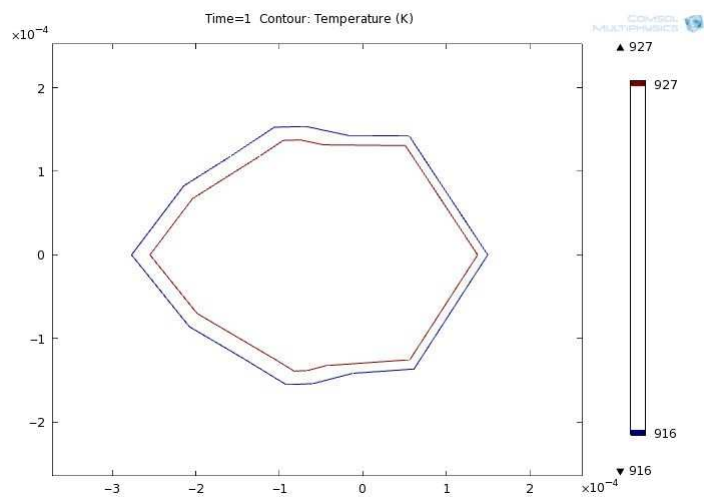
Zona fusa in superficie ($y_1 = 0.23 \text{ mm}$)



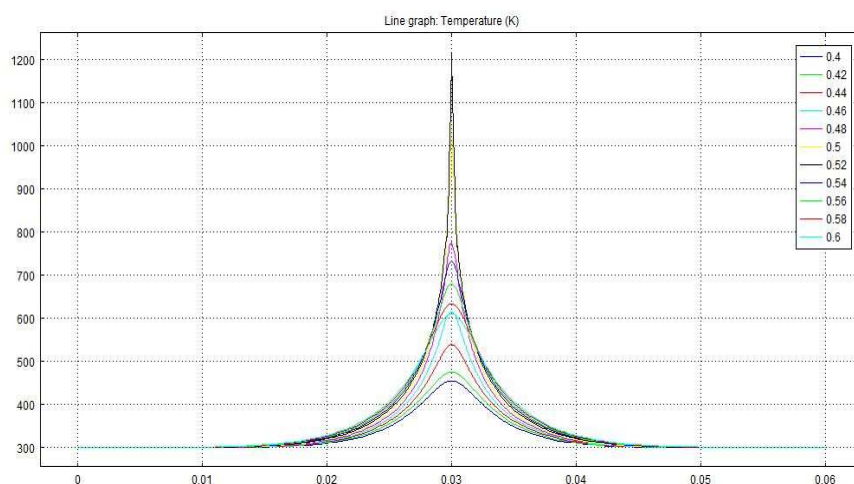
Zona fusa a metà spessore ($y_2 = 0.17 \text{ mm}$)



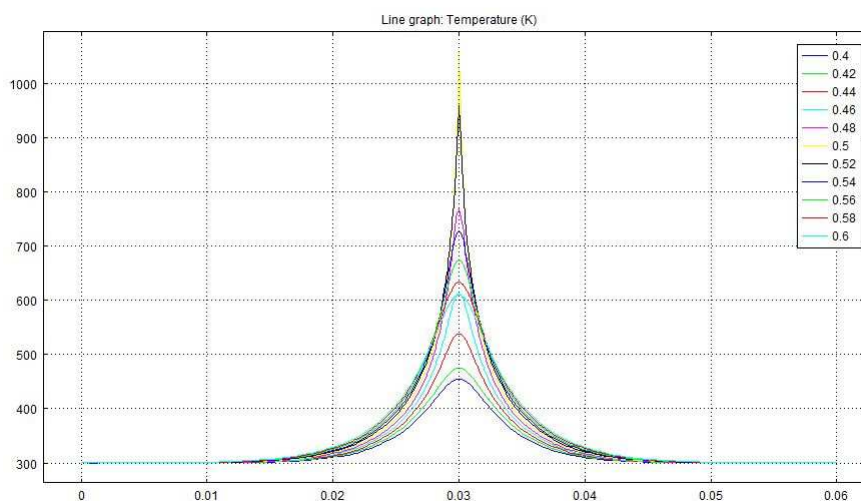
Zona fusa alla base ($y_3 = 0.13 \text{ mm}$)



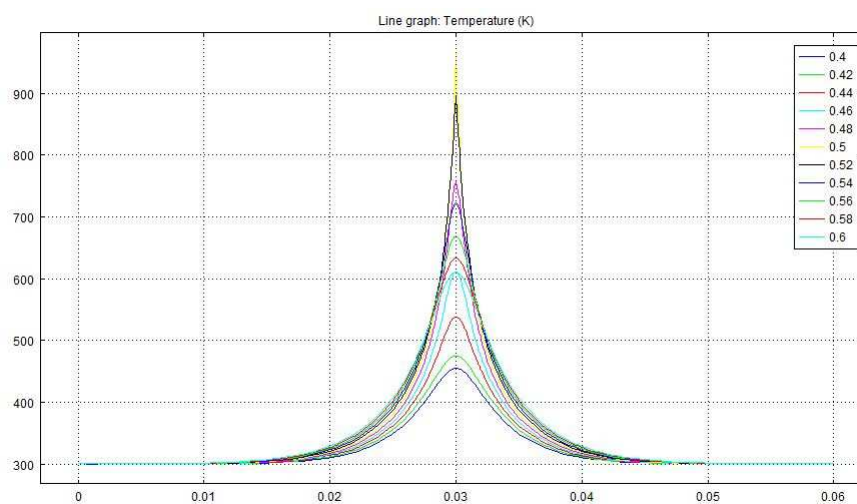
Temperatura sulla sezione al variare del tempo (superficie)



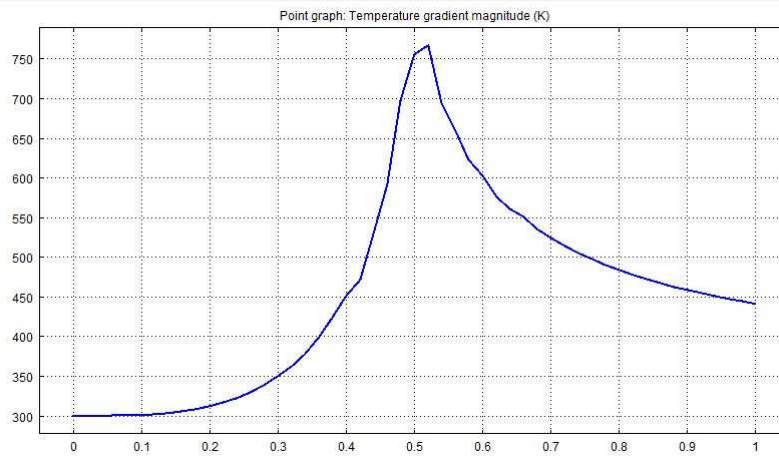
Temperatura sulla sezione al variare del tempo (mezzo)



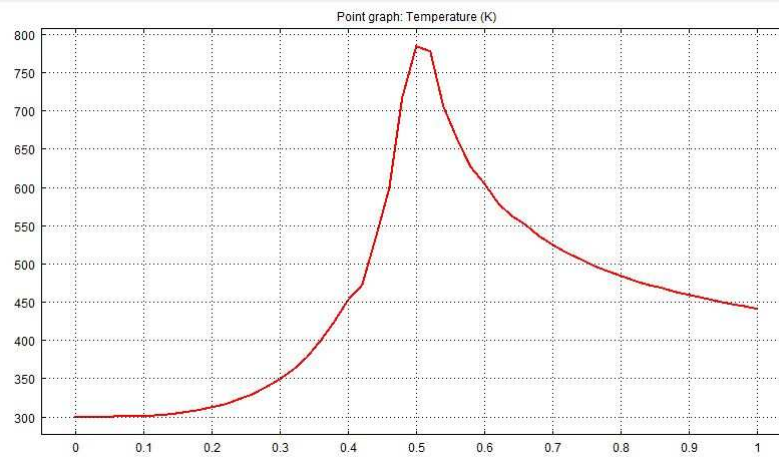
Temperatura sulla sezione al variare del tempo (base)



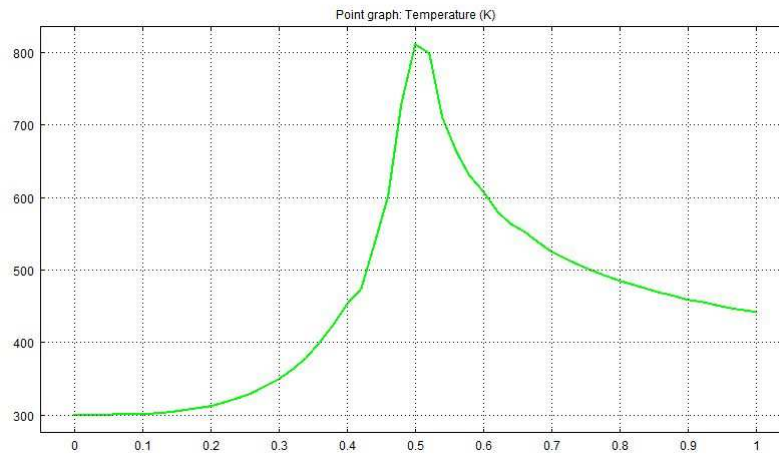
Temperatura nel tempo (punto 4) ($y_4 = 0.46 \text{ mm}$)



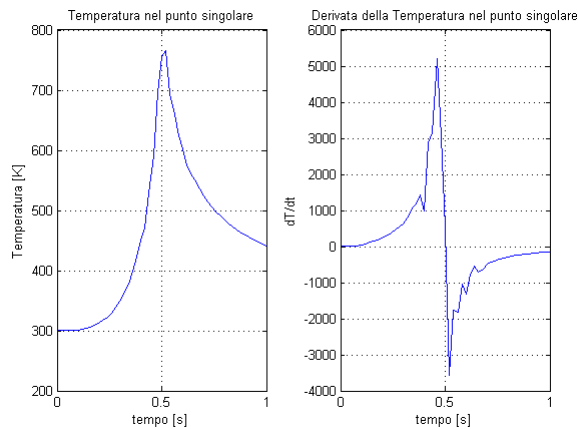
Temperatura nel tempo (punto 5) ($y_5 = 0.34 \text{ mm}$)



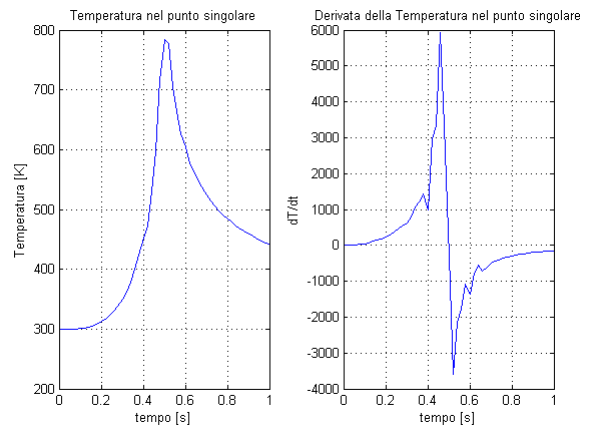
Temperatura nel tempo (punto 6) ($y_6 = 0.26 \text{ mm}$)



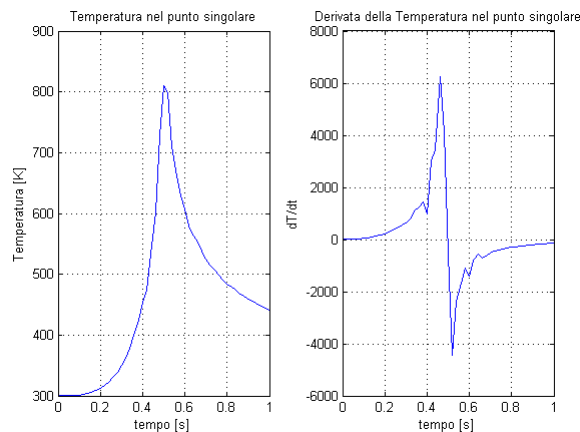
Velocità di raffreddamento (punto 4)



Velocità di raffreddamento (punto 5)



Velocità di raffreddamento (punto 6)



Per la velocità di raffreddamento si sono esportati i dati da *COMSOL* e rielaborati in *MATLAB*, di modo da derivare agevolmente il grafico temperatura-tempo.

Sono molteplici le differenze del modello a elementi finiti rispetto al modello analitico. In primo luogo la risoluzione in *MATLAB* ha richiesto una fondamentale semplificazione: la temperatura sullo spessore è ipotizzata costante, mentre con la simulazione per mezzo di *COMSOL* si è potuti indagare il gradiente di temperatura sulla coordinata z . Inoltre il modello analitico contempla solamente il fenomeno di conduzione pura.

In definitiva si è potuto apprezzare un miglioramento del risultato dovuto a un progressivo affinamento del modello considerato. Da un iniziale approccio energetico qualitativo, si è passati a un più complesso modello analitico, inserendo l'equazione del calore (sorgente lineare in movimento). Lo step successivo è stato quello di migliorare la descrizione della fonte di calore e di modellizzare la lastra nelle 3 dimensioni. Gli strumenti di calcolo necessari sono via via diventati più complessi, tanto da richiedere un tempo di computazione non trascurabile per il modello a *FE*. Tuttavia l'approccio al fenomeno con modelli concettuali sempre più dettagliati ha condotto verso risultati molto più precisi.