

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di laurea in Ingegneria Meccanica

Esame di: **Trasmissione del calore.**

TESINA

**DIMENSIONAMENTO DELLO STRATO DI ISOLANTE DA
APPORRE ALLE PARETI DI UN FORNO.**

Docente:

Prof. Ing. Gennaro Cuccurullo

Cammarano Aniello 0620300023

Somma Giorgio 0620300046

Anno accademico 2006/2007

Sommario

Traccia tesina	3
Introduzione	4
1 Struttura di un forno industriale	5
1.1 Materiali refrattari.....	5
1.2 Materiali isolanti.....	7
2 Modello di corpo semi-infinito	9
3 Temperatura di contatto	14
4 Dimensionamento	16
Appendice.....	30

Traccia tesina

Si consideri un forno le cui pareti sono costituite tipicamente da materiale refrattario e da isolante. Sapendo che le temperature di esercizio raggiungono i 1200°C , allo scopo di garantire la sicurezza dei lavoratori, si vuole dimensionare lo spessore di isolante così da non avere sulla faccia esterna una temperatura superiore a 50°C . Si stimi il tempo necessario affinché si raggiungano le condizioni di equilibrio. Ci si chieda come varia lo spessore di isolante se la temperatura della faccia esterna è assunta essere quella di contatto mano-isolate.

Introduzione

Nella seguente tesina si vuole affrontare un problema di isolamento termico di un forno per usi industriali, in particolare si vuole determinare lo spessore di isolante da apporre alle pareti. In ambito della progettazione di apparecchiature industriali (ad esempio forni) infatti, è molto importante determinare in maniera accurata lo spessore di isolante da apporre all'apparecchiatura che si sta progettando. La determinazione dello stesso, deve essere eseguita tenendo presente che lo strato di isolante che si deve apporre, deve assolvere due importanti ruoli:

- limitare al minimo le perdite energetiche (sotto forma di calore) verso l'ambiente esterno, al fine di garantire elevate performance all'apparecchiatura;
- proteggere l'operatore addetto all'utilizzo dell'apparecchiatura da eventuali scottature o addirittura ustioni di entità più o meno gravosa.

In particolare l'ultimo punto evidenziato è un problema particolarmente sentito da un decennio a questa parte, da quando sono state emanate in maniera chiara e dettagliata le norme di sicurezza da attuare nei luoghi di lavoro. La legge inerente questa problematica recita:

“D.P.R. 27 aprile 1955, n. 547: Norme per la prevenzione degli infortuni sul lavoro (Pubblicato sul S.O.G.U. 12 luglio 1955, n.158)

(Aggiornato con le modifiche apportate dalla legge 2 maggio 1983, n. 128; dalla legge 5 novembre 1990, n. 320; dal d.lgs. 19 settembre 1994, n. 626; dal d.lgs. 19 marzo 1996, n. 242; dal d.lgs 14 agosto 1996, n. 493; dal d.lgs 4 agosto 1999, n. 359 e dal DPR 22 ottobre 2001, n. 462; dal D.lgs 12 giugno 2003, n. 233)

Art. 240 - Protezione delle pareti esterne a temperatura elevata - *Le pareti e le parti esterne dei recipienti, serbatoi, vasche, tubazioni, forni e porte, che possono assumere temperature pericolose per effetto del calore delle materie contenute o di quello dell'ambiente interno, devono essere efficacemente rivestite di materiale termicamente isolante o protette contro il contatto accidentale.*

I lavoratori, se sono esposti al rischio di ustioni, devono essere provvisti e fare uso di idonei mezzi di protezione individuale.”

Quindi sulla base di quanto enunciato dalla legge e sfruttando le nozioni teoriche presenti nella letteratura tecnica in ambito della trasmissione del calore (modello di corpo semi-infinito, temperatura di contatto), si procederà alla risoluzione del problema posto alla nostra attenzione.

1 Struttura di un forno industriale

I forni per usi industriali come quello da noi considerato in questa trattazione, sono caratterizzati dall'aver delle temperature di esercizio molto elevate (nel nostro caso di 1200 °C), per questo per garantire che lo stesso funzioni in maniera ottimale, occorre che il forno abbia una struttura realizzata in modo tale da non disperdere all'esterno il calore prodotto dalla sorgente termica adoperata per riscaldarlo. Il forno infatti, deve avere una camera (per camera si intende semplicemente la zona interna del forno in cui si inseriscono i pezzi da trattare) realizzata con mattoni refrattari rivestiti esternamente da uno strato di materiale isolante, invece tutta la struttura esterna del forno è di materiale metallico.



Figura: esempio di forno per usi industriali.

1.1 Materiali refrattari

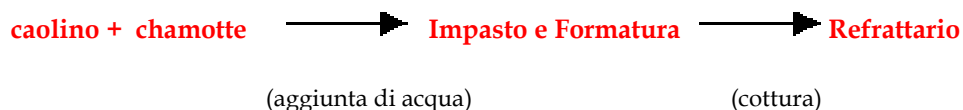
L'attributo “*refrattari*” è riferito a quei materiali in grado di resistere a temperature particolarmente elevate (almeno di 1000 °C) mantenendo inalterate le loro proprietà chimiche e meccaniche. In effetti si può affermare che qualunque prodotto ceramico possiede un certo grado di refrattarietà, se non altro per aver subito un processo di cottura a temperatura elevata. D'altra parte è altrettanto chiaro che i materiali necessari alla realizzazione di forni, stufe o camini sono certamente sottoposti a sollecitazioni termiche e meccaniche molto più elevate di quelle sopportabili dai comuni laterizi utilizzati in edilizia. Per questo richiedono tecniche di lavorazione e produzione specifiche, ponendo particolare cura alla composizione dell'impasto e nella fase di cottura. Le caratteristiche imprescindibili di un materiale refrattari sono:

- l'invariabilità del volume con un basso coefficiente di dilatazione termica per assicurare la stabilità dei manufatti;
- una buona capacità di resistere alle sollecitazioni meccaniche, specie alle alte temperature, condizioni nella quale, invece, molti laterizi comuni divengono fragili;
- una porosità minima, per resistere alle azioni chimiche e corrosive delle sostanze con cui vengono a contatto (ad esempio i prodotti della combustione).

Un materiale refrattario di alta qualità si ottiene controllando la natura chimica dei componenti, eliminando le eventuali impurità presenti nella maggior parte delle argille, sottoponendo il materiale a una lavorazione meccanica e a una cottura sapientemente eseguita. Le impurità e gli ossidi presenti nella maggior parte delle argille infatti, possono essere sottoposti a modificazioni chimiche a causa delle alte temperature, o reagire chimicamente con i prodotti della combustione, originando un rapido deterioramento del refrattario. Anche la lavorazione meccanica ha la sua importanza nella realizzazione di prodotti refrattari. Una grana fine e omogenea (e una compressione notevole durante la realizzazione) conferiscono un'elevata resistenza alla compressione. D'altra parte fondamentali risultano anche l'impasto e il processo di cottura. I laterizi comuni vengono cotti a

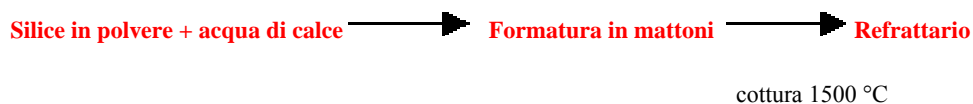
temperature che difficilmente completano il processo di vetrificazione degli idrosilicati di alluminio che costituiscono l'argilla. Ne consegue che la successiva esposizione ad elevate temperature può avviare un processo di vetrificazione incontrollato, con modifiche nel volume o rigonfiamenti causati da reazioni chimiche in presenza di eventuali impurità che compromettono le qualità meccaniche e la stabilità dell'intera struttura. Per ovviare a tutto ciò, l'impasto del materiale refrattario da sottoporre a formatura è realizzato a secco, miscelando piccole quantità di paste leganti con la *chamotte*, un materiale refrattario già sottoposto a cottura, sino al punto di non poter più subire ulteriori contrazioni di volume, e quindi sbriciolato e utilizzato come inerte. L'impasto è poi leggermente umidificato, sottoposto a formatura a forte compressione e ulteriore cottura. In base alla quantità di chamotte e di pasta legante utilizzate, alla grana dell'impasto prescelta, alla forza di compressione impiegata e alla temperatura di cottura finale utilizzata, si otterranno prodotti refrattari di caratteristiche anche molto diverse. L'utilizzabilità di un refrattario per uno specifico uso dipende dalle sue caratteristiche meccaniche e dal suo grado di refrattarietà. Per fare un esempio, un refrattario utilizzato per il rivestimento di forni in cui si raggiungono alte temperature per lungo tempo (o in cui vi può essere contatto con metalli fusi) dovrebbe avere una grana finissima, alta densità e consistenza plastica. Nel caso in cui si richieda soprattutto resistenza a forti sbalzi di temperatura, sono da ricercarsi una grana più grossolana e una plasticità inferiore. In base al tipo di materia prima utilizzata i materiali refrattari si classificano in:

- **Refrattari neutri:** i più importanti sono quelli silico-alluminosi che si producono partendo da caolino (il caolino è una roccia costituita prevalentemente da caolinite) e chamotte che mescolati insieme formano un impasto che viene opportunamente formato e cotto al fine di garantire la refrattarietà.

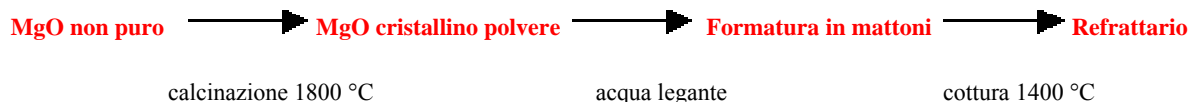


Questi tipi di materiali resistono agli sbalzi di temperatura. Usati negli altiforni e nel rivestimento delle siviere per il travaso dell'acciaio liquido.

- **Refrattari acidi** sono quelli a base di silice. Questo tipo di materiale si ottiene impastando la silice ridotta in polvere (non troppo fine) con acqua di calce. L'impasto ottenuto viene modellato per compressione in forma di mattoni che vengono cotti a circa 1500 °C. Tali materiali sono resistenti agli agenti chimici e ai gas di combustione, ma non resistono invece agli agenti basici. Sono impiegati generalmente nelle camere di distillazione.



- **Refrattari basici** i più usati sono i magnesiaci costituiti da ossido di magnesio. Il processo tecnologico per la preparazione del refrattario può essere così riassunta:



Tali materiali resistono alla corrosione dei metalli e delle scorie basiche. Si usano per rivestimenti di forni Martin a procedimento basico, per i forni elettrici e per i forni da cemento.

- **Super-refrattari** che sono prodotti a base di carburi, nitruri e ossidi refrattari sinterizzati. Vengono usati nelle industrie tecnologicamente più avanzate come ad esempio quelle degli aerei, dei razzi e dell'energia nucleare.

In commercio si trovano componenti in materiale refrattario aventi non solo dimensioni e forme differenti (mattoni, listelli, tavole, etc.) ma anche con una notevole variabilità nella composizione e nella cottura.

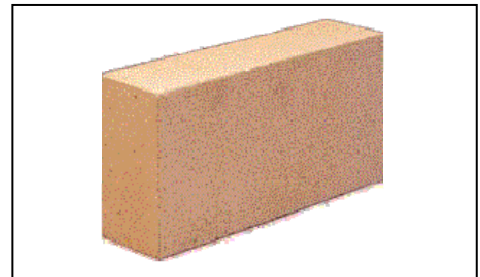


Figura: esempio di mattone ad alto contenuto di allumina utilizzato principalmente per la realizzazione di caldaie e nel rivestimento di forni industriali. Resistente fino a temperature di 1600 °C.

1.2 Materiali isolanti

Molti materiali isolanti basano il loro potere isolante sul fatto che sono materiali poco conduttori (trasmissione per conduzione ridotta al minimo) e molto porosi, intrappolando così, entro piccole celle al loro interno, dell'aria che quindi non si può avvalere del meccanismo di scambio termico per convezione. La capacità isolante di un determinato materiale si può apprezzare valutando la sua conducibilità termica che è dell'ordine di grandezza di 10^{-2} W/mK, quindi di gran lunga inferiore a quella dei materiali metallici che come è noto sono ottimi conduttori termici, possedendo una conducibilità termica dell'ordine di $10^1 \div 10^2$ W/mK. Per l'isolamento termico dei forni si utilizzano generalmente isolanti in fibra ceramica e mattoni isolanti di malta di gesso. La *fibra ceramica* si produce mediante la fusione a circa 2000 °C e successiva filatura, ottenuta mediante trattamento centrifugo, delle materie prime (alluminio e silicio) da cui è composta, per poi essere apprettata con leganti di origine organica al fine di garantire una perfetta coesione tra le fibre da cui è formata. Questa tipologia di fibra ha importanti caratteristiche, quali: l'estrema leggerezza, il bassissimo coefficiente di conducibilità termica, il limitato assorbimento di calore e l'assoluta insensibilità allo sbalzo termico. Dopo il processo di produzione delle fibre, le stesse subiscono una successiva lavorazione per ottenere:

- **Materassini e pannelli** caratterizzati da eccellenti prestazioni di isolamento termico, elevata resistenza agli shock termici (per shock termici si intende la formazione di stress termici in un

componente in seguito all'esposizione ad una differenza di temperatura tra la superficie e il suo interno o tra diverse porzioni del componente), bassa conducibilità termica ed una elevata riflessione del calore. I materassini che si trovano in commercio sono realizzati con fibra ceramica di colore bianco che possono essere nudi o ricoperti su un lato con alluminio rinforzato (totalmente senza amianto). Facili da tagliare e da installare, sono disponibili in vari spessori e densità. Per la loro capacità di resistere a temperature superiori ai 1100 °C sono particolarmente adatti per applicazioni industriali, caldaie, forni, cisterne e tubazioni attraversate da fluidi ad elevata temperatura.



Figura: esempio di materassino in fibra ceramica.

- **Carta ceramica:** è una carta termoisolante avente una temperatura massima di utilizzo di 1260 °C ed è caratterizzata da eccellenti proprietà di isolamento termico e di resistenza meccanica allo strappamento. Al tempo stesso può essere facilmente tagliata e sagomata in modo da potersi adattare alle diverse esigenze di utilizzo. La carta termoisolante è ideale nella realizzazione di giunti di dilatazione e per l'isolamento di parti interne dei forni industriali.

L'altra tipologia di materiale isolante è rappresentata dai **mattoni isolanti in malta di gesso**. La malta di gesso ottenuta mescolando un volume di gesso con mezzo volume di acqua, viene opportunamente modellata per ottenere mattoni isolanti. Questi mattoni vengono adoperati come isolanti per forni industriali perché oltre ad avere una bassa conducibilità termica hanno anche un costo molto contenuto avendo il gesso un costo modesto.

Anche i mattoni refrattari possono essere adoperati come elementi isolanti quando devono essere impiegati per l'isolamento in condizioni in cui la temperatura sia variabile, ma mai estremamente elevata. Questa tipologia di mattoni viene realizzata mescolando l'impasto argilloso con segatura di legno, che bruciando durante la cottura, restituisce una struttura estremamente porosa e dotata di bassissima conducibilità termica.

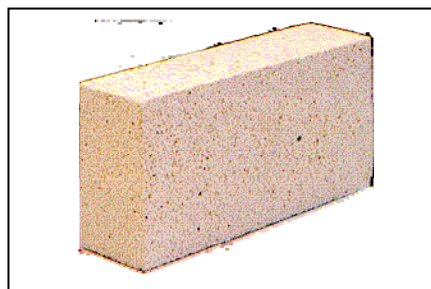


Figura: esempio di mattone refrattario isolante.

In conclusione la scelta del materiale isolante da impiegare deve essere condotta in relazione alle condizioni di esercizio e al costo di acquisto che si intende sostenere.

2 Modello di corpo semi-infinito

Per affrontare il problema posto alla nostra attenzione bisogna richiamare alcune nozioni teoriche riguardanti i problemi di trasmissione del calore. In particolare si richiama il modello di corpo semi-infinito nell'ipotesi di temperatura imposta alla parete e il concetto di temperatura di contatto.

Il modello di corpo semi-infinito nasce per descrivere l'evoluzione del campo di temperatura in un solido la cui estensione occupa un semipiano. L'estensione indefinita del solido potrebbe suscitare perplessità poiché in prima battuta risulta difficile trovare nella pratica applicazioni di questo modello. La validità dello stesso però, risiede nel fatto che durante i primi istanti del fenomeno di conduzione termica, la perturbazione introdotta ad esempio su una delle due superfici di una lastra piana e più in generale di un corpo descrivibile attraverso modelli unidimensionali, non raggiunge l'altra superficie che di fatto rimane imperturbata. Quindi si può affermare che un corpo semi-infinito dal punto di vista fisico non esiste, ma da un punto di vista comportamentale se ci si limita ai primi istanti di osservazione del fenomeno qualunque corpo si comporta come infinito. Per spiegare il modello di corpo semi-infinito si consideri una lastra piana semi-infinita avente una temperatura iniziale pari a T_i sottoposta ad un riscaldamento istantaneo sulla faccia ad $x=0$ tale da portare la stessa istantaneamente a una temperatura pari a T_0 maggiore di T_i . Applicando il principio di conservazione dell'energia è possibile scrivere l'equazione fondamentale della conduzione e le relative condizioni al contorno e la condizione iniziale:

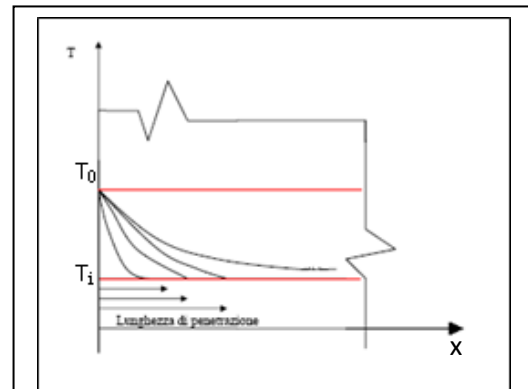


Figura: modello di corpo semi-infinito.

$$(1) T_{xx} = \frac{1}{\alpha} T_t$$

$$(2) T(x = 0, t) = T_0$$

$$(3) T(x \rightarrow \infty, t) = T_i$$

$$(4) T(x, t = 0) = T_i$$

Come si può vedere l'equazione (1) essendo del secondo ordine nello spazio richiede due condizioni al contorno (la 2 e la 3) dove la condizione (3) evidenzia come la faccia ad infinito rimane imperturbata perché non risente della condizione imposta ad $x=0$, inoltre essendo l'equazione del primo ordine nel tempo richiede una condizione iniziale (la 4). Essendo la temperatura funzione di cinque variabili $T=T(x,\alpha,t,T_0,T_i)$ si ritiene opportuno adimensionalizzare il set di equazioni scritto sopra. Si definisce una temperatura adimensionale θ , un tempo adimensionale τ e una lunghezza adimensionale ξ :

$$\theta = \frac{T - T_i}{\Delta T_{rif}} = \frac{T - T_i}{T_0 - T_i}$$

$$\tau = \frac{t}{t_{rif}}$$

$$\xi = \frac{X}{X_{rif}}$$

In queste espressioni risultano incognite i valori di t_{rif} e X_{rif} quindi si spera che sia il processo di adimensionalizzazione a suggerirci il loro valore.

L'equazione (1) adimensionale assume la seguente forma:

$$\frac{\Delta T_{rif}}{X_{rif}^2} \theta_{\xi\xi} = \frac{1}{\alpha} \frac{\Delta T_{rif}}{t_{rif}}$$

Si sceglie per problemi di “pulizia matematica” il valore:

$$X_{rif}^2 = \alpha t_{rif}$$

Il sistema di equazioni adimensionale è:

$$(1') \theta_{\xi\xi} = \theta_{\tau}$$

$$(2') \theta(\xi = 0, \tau) = 1$$

$$(3') \theta(\xi \rightarrow \infty, \tau) = 0$$

$$(4') \theta(\xi, \tau = 0) = 0$$

Questo sistema di equazioni non può essere risolto con il metodo di separazione delle variabili perché l'equazione (2') è non omogenea. Infatti il metodo di separazione delle variabili si può applicare solo quando le equazioni sono lineari ed hanno condizioni omogenee lungo una variabile spaziale, per questo si utilizza *il metodo delle soluzioni simili*. Questo metodo consiste nel prendere una soluzione del tipo:

$$\theta(\xi, \tau) = \theta(s) \quad (A)$$

dove “s” è la **variabile di similitudine** che sulla base del legame definito tra X_{rif} e t_{rif} si conviene porre uguale a:

$$s = \xi f(\tau)$$

Per vedere se effettivamente la relazione (A) è soluzione bisogna sostituirla all'interno del set di equazioni adimensionali ottenendo quanto segue:

$$(1'') \quad \theta_{ss} = \theta_s s \left[\frac{f_\tau}{f^3} \right]$$

$$(2'') \quad \theta(s = 0) = 1$$

$$(3'') \quad \theta(s = \infty f(\tau)) = 0$$

$$(4'') \quad \theta(\xi f(0)) = 0$$

Come si può facilmente vedere l'equazione (1'') è del secondo ordine rispetto alla variabile di similitudine s, per questo avendo una condizione al contorno in più si decide di porre:

$$f(\tau = 0) = \infty$$

In questo modo la (3'') e la (4'') collassano in un'unica equazione ottenendo il seguente set di equazioni:

$$(1'') \quad \theta_{ss} = \theta_s s \left[\frac{f_\tau}{f^3} \right]$$

$$(2'') \quad \theta(s = 0) = 1$$

$$(3'') \quad \theta(\xi f(\tau = 0)) = 0$$

$$(B) \quad \frac{f_\tau}{f^3} = 0 \quad f(\tau = 0) = \infty$$

Si procede alla risoluzione dell'equazione (B):

$$\frac{df}{f^3} = \pm c^2 d\tau \quad \rightarrow \quad \frac{1}{(-2)} \frac{1}{f^2} = \pm c^2 \tau + C_1$$

Applicando la condizione:

$$f(\tau = 0) = \infty \quad \rightarrow \quad C_1 = 0$$

Quindi scegliendo il segno meno davanti alla costante "c" in modo da avere soluzioni reali si ottiene il seguente valore di "f":

$$f = \frac{1}{\sqrt{2c^2\tau}}$$

La scelta della costante c^2 è libera, per questo per evidente semplicità si pone $c^2=2$. Invece per la risoluzione dell'equazione (1") si procede nel seguente modo:

$$\text{Si pone: } p = \theta_s \quad \rightarrow \quad \frac{dp}{p} = -sc^2 ds \quad \rightarrow \quad \ln \frac{p}{C_2} = -s^2$$

$$\theta_s = C_2 e^{(-s^2)}$$

$$\theta = C_2 \int_0^s e^{(-z^2)} dz + C_3$$

Applicando le condizioni al contorno (2") e (3") si ottengono i valori delle costanti C_2 e C_3 :

$$C_3 = 1 \quad C_2 = -\frac{1}{\int_0^\infty e^{(-z^2)} dz} = -\frac{2}{\sqrt{\pi}}$$

Quindi il profilo di temperatura adimensionale è pari a:

$$\theta = -\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-z^2} dz + 1 = 1 - \operatorname{erf}(s) = \operatorname{erfc}(s)$$

dove $\operatorname{erf}(z)$ è la funzione degli errori e $\operatorname{erfc}(z)$ è il suo complemento a uno. In forma dimensionale il profilo di temperatura è:

$$T = T_i + (T_0 - T_i) \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}} e^{-z^2} dz \right]$$

È possibile determinare il flusso termico specifico scambiato all'interfaccia solido-fluido applicando l'equazione di Fourier alla faccia a $x=0$:

$$\dot{q} = -k \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0}$$

Per calcolare la derivata presente all'interno dell'equazione del flusso termico specifico si applica il Teorema di Leibnitz che si usa quando gli estremi di integrazione sono funzione della variabile di integrazione:

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_{a(x)}^{b(x)} F(x, z) dz = \frac{\partial b}{\partial x} F(x, b) - \frac{\partial a}{\partial x} F(x, a) + \int_{a(x)}^{b(x)} \frac{\partial F(x, z)}{\partial x} dz$$

Quindi il flusso termico specifico è pari a:

$$\dot{q} = \frac{k(T_0 - T_i)}{\sqrt{\pi\alpha t}}$$

Dalla relazione ottenuta si evince che il flusso termico specifico risulta direttamente proporzionale alla conducibilità termica del materiale e al salto di temperatura ($T_0 - T_i$) ed inversamente proporzionale al tempo e alla diffusività termica. Quindi è possibile definire i seguenti casi limite:

- per $t \rightarrow 0$ il valore di $\dot{q} \rightarrow \infty$ (condizione di massimo trasferimento energetico);
- per $t \rightarrow \infty$ il valore di $\dot{q} \rightarrow 0$ quindi ai tempi lunghi lo scambio termico è ormai terminato.

3 Temperatura di contatto

Un importante applicazione del modello di corpo semi-infinito è quella relativa alla determinazione della temperatura di contatto e della sensazione di caldo e di freddo che si percepisce nel toccare oggetti di materiale diverso aventi la stessa temperatura ed inferiore a quella della mano.

Se si tocca ad esempio un oggetto di legno ed uno di metallo aventi entrambi la stessa temperatura ed inferiore a quella della mano, si avverte una sensazione di freddo quando si tocca il corpo di metallo e una sensazione di caldo quando si tocca quello di legno, almeno per i primi istanti di tempo. Questo fenomeno è spiegabile attraverso la determinazione della temperatura di contatto ed assume un ruolo di primaria importanza nella determinazione dello strato di isolante termico da apporre ad un corpo. Per determinare la temperatura di contatto si devono modellare i due corpi a contatto come semi infinito. Per questo motivo nel nostro caso possiamo modellare la parete del forno come il primo corpo semi-infinito a contatto lungo la superficie a $x=0$ con la mano che rappresenta il secondo corpo modellato anch'esso come semi-infinito. Prelevando un volume di controllo a cavallo della faccia ad $x=0$ ed eseguendo un bilancio locale di energia, si ottiene che la potenza termica specifica entrante nel volume di controllo è uguale a quella uscente (principio di conservazione dell'energia):

$$\dot{q}_{x=0^-} = \dot{q}_{x=0^+}$$

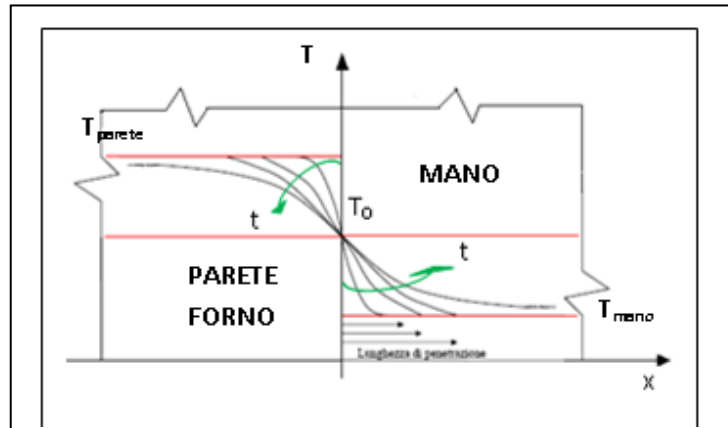


Figura: schematizzazione della mano a contatto con la parete del forno.

Per determinare la temperatura di contatto si devono modellare i due corpi a contatto come semi infinito. Per questo motivo nel nostro caso possiamo modellare la parete del forno come il primo corpo semi-infinito a contatto lungo la superficie a $x=0$ con la mano che rappresenta il secondo corpo modellato anch'esso come semi-infinito. Prelevando un volume di controllo a cavallo della faccia ad $x=0$ ed eseguendo un bilancio locale di energia, si ottiene che la potenza termica specifica entrante nel volume di controllo è uguale a quella uscente (principio di conservazione dell'energia):

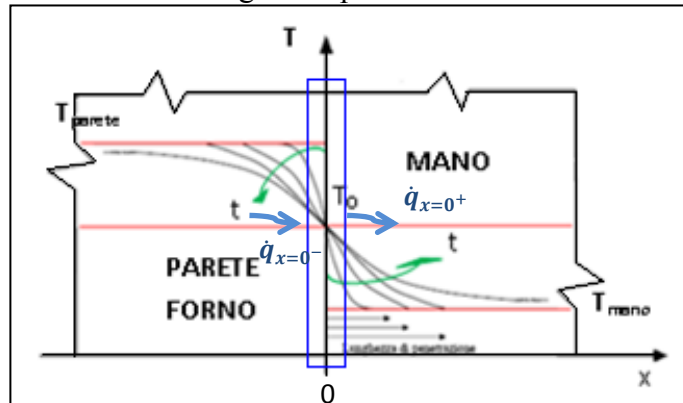


Figura: volume di controllo.

$$\frac{k_{mano} \Delta T_{mano}}{\sqrt{\pi \alpha_{mano} t}} = \frac{k_{parete} \Delta T_{parete}}{\sqrt{\pi \alpha_{parete} t}}$$

dove:

$$\Delta T_{mano} = T_0 - T_{mano}$$

$$\Delta T_{parete} = T_{parete} - T_0$$

$$\alpha_{mano} = \frac{k_{mano}}{\rho_{mano} c_{mano}}$$

$$\alpha_{parete} = \frac{k_{parete}}{\rho_{parete} c_{parete}}$$

La *temperatura di contatto* T_0 si definisce perché all'interfaccia mano-parete del forno la temperatura non può essere discontinua e deve assumere un unico valore che appunto si definisce temperatura di contatto. Questa temperatura si ipotizza che non vari con il tempo e se questo è vero vuol dire che si ha un vincolo a cui riferirsi per tracciare la temperatura a tempi successivi al primo. Sostituendo i valori sopra definiti all'interno dell'equazione e semplificando i termini simili si ottiene:

$$T_0 = \frac{T_{mano} \sqrt{k_{mano} \rho_{mano} c_{mano}} + T_{parete} \sqrt{k_{parete} \rho_{parete} c_{parete}}}{\sqrt{k_{mano} \rho_{mano} c_{mano}} + \sqrt{k_{parete} \rho_{parete} c_{parete}}}$$

Quindi la temperatura di contatto è la media pesata tra la temperatura della mano e quella della parete del forno dove come pesi ci sono i rispettivi prodotti del calore specifico volumico (ρc) per la conducibilità termica k . Siccome per quasi tutti i corpi solidi il calore specifico "c" e la densità hanno ordine di grandezza 10^3 e quindi il calore specifico volumico ha ordine di grandezza 10^6 , si ha che il peso assunto dalle due temperature dipende principalmente dal valore dei rispettivi k . Quindi ritornando all'esempio fatto all'inizio del paragrafo, quando si tocca un corpo di materiale metallico e uno di legno aventi entrambi una temperatura inferiore a quella della mano, si percepisce una sensazione di freddo quando si tocca il corpo di materiale metallico perché essendo la conducibilità termica del metallo di ordine di grandezza $10^1 \div 10^2 \frac{W}{mK}$, mentre quella della mano è $1 \frac{W}{mK}$, la temperatura T_0 sarà per questo più vicina a quella del corpo metallico. Invece quando si tocca un corpo di legno essendo la conducibilità termica del legno di ordine di grandezza pari a $10^{-2} \frac{W}{mK}$ essendo inferiore alla conducibilità termica della mano, risulta quindi che T_0 è più vicina alla temperatura della mano percependo così una sensazione di caldo. Quanto detto assume una notevole importanza quando si vuole dimensionare lo strato di isolante da apporre ad un corpo, infatti come nel nostro caso per determinare lo spessore dell'isolante non bisogna riferirsi alla temperatura di esercizio del forno che è pari a $1200^\circ C$ ma alla temperatura percepita dall'operatore.

4 Dimensionamento

➤ Considerazioni preliminari.

Per determinare lo spessore di isolante termico da apporre alle pareti del forno si eseguono le seguenti considerazioni:

- le pareti del forno si assumono essere realizzate in materiale refrattario, in particolare con mattoni refrattari di Cromo-Magnesite. Si utilizzano questi tipi di mattoni perché appartengono alla categoria dei materiali refrattari basici che sono particolarmente adatti ad essere utilizzati per la realizzazione di forni elettrici (vedi paragrafo 1.1);
- l'isolamento termico si realizza con materassini in fibra ceramica;
- si assume per la mano una temperatura pari a $T_{\text{mano}} = 35 \text{ }^\circ\text{C} = 308 \text{ K}$ e proprietà pari a quella dell'acqua essendo il corpo umano costituito in media dal 75% di acqua;
- si assume che le pareti esterne del forno siano lambite da aria in quiete alla temperatura $T_{\text{amb.}} = 20 \text{ }^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$. Per il coefficiente di scambio termico convettivo in condizione di convezione naturale si è considerata la tabella UNI 7357/76 relativa ai valori dei coefficienti di scambio termico convettivo per pareti in muratura di edifici e la tabella 3 entrambe riportate in appendice. Si è deciso di utilizzare la tabella 2 nell'ipotesi che siano simili le caratteristiche fisiche delle pareti in muratura e le pareti del forno realizzate in materiale refrattario ed isolante. Nell'ipotesi che il forno oggetto di studio debba essere installato in capannoni industriali si è scelto $h_{\text{amb.}} = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Si riportano in tabella i valori della densità, del calore specifico e della conducibilità termica del Cromo-Magnesite, dei materassini in fibra ceramica, dell'acqua e dell'aria.

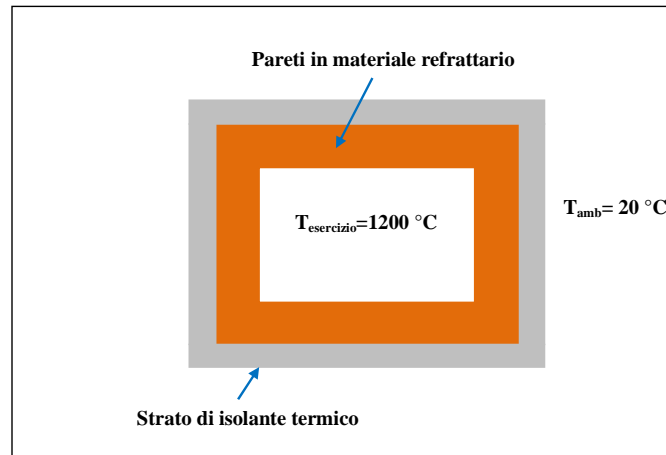
	Densità [Kg/m^3]	Calore specifico [Ws/KgK]	Conducibilità termica [W/mK]
Cromo-Magnesite	2800 ÷ 3200	0.31*	2.08**
Materassini in fibra ceramica	96	1130	0.367
Acqua a 35 °C	1000	4187	0.56
Aria a 20 °C	1.193	1007	0.0258

(*) Calore specifico espresso in [$\text{Wh/kg}^\circ\text{C}$]

(**) Conducibilità termica espressa in [$\text{W/m}^\circ\text{C}$]

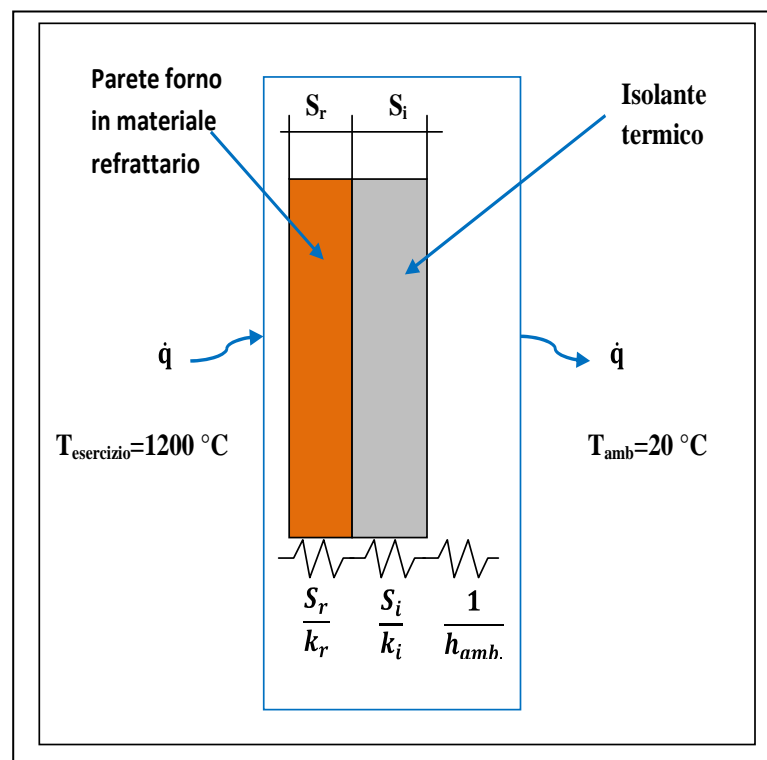
➤ **Determinazione dello spessore di isolante termico.**

Considerando che il forno ha una struttura di questo tipo:



e lavora con una temperatura di esercizio pari a: $T_{\text{esercizio}} = 1200 \text{ °C} = 1473 \text{ K}$. Per le pareti in materiale refrattario da un'analisi effettuata dello stato dell'arte si è deciso di assumere uno spessore di: $s_r = 20 \text{ cm}$.

Si esegue una sezione del forno e si applica il principio di conservazione dell'energia al volume di controllo di colore blu:



La determinazione dello spessore di isolante è stata eseguita considerando sulla faccia esterna del forno una temperatura che non superi i 50 °C ($T_{\text{parete}} = 50 \text{ °C} = 323 \text{ K}$) per proteggere l'operatore dal rischio di eventuali ustioni. Il flusso termico specifico per andare

dalla camera del forno all'ambiente esterno deve attraversare la parete in materiale refrattario, lo strato di isolante e l'aria, questo percorso, utilizzando l'analogia con il modello elettrico viene schematizzato attraverso due resistenze termiche conduttive e una resistenza termica convettiva. Dal bilancio di energia si ottiene:

$$\dot{q} = \frac{T_{esercizio} - T_{amb.}}{\frac{s_r}{k_r} + \frac{s_i}{k_i} + \frac{1}{h_{amb.}}} = \frac{T_{parete} - T_{amb.}}{\frac{1}{h_{amb.}}}$$

Dove con il pedice "r" si indicano le grandezze relative al materiale refrattario e con il pedice "i" quelle relative all'isolante.

Eseguendo la formula inversa si ricava il valore di s_i :

$$s_i = \left[\left(\frac{T_{esercizio} - T_{amb.}}{T_{parete} - T_{amb.}} \right) \frac{1}{h_{amb.}} - \frac{s_r}{k_r} - \frac{1}{h_{amb.}} \right] k_i$$

$$s_i = \left[\left(\frac{1473 - 293}{323 - 293} \right) \frac{1}{20} - \frac{0.20}{2.08} - \frac{1}{20} \right] 0.367 = 0.668 \text{ m} = 66.8 \text{ cm}$$

Il valore ottenuto dello spessore di isolante è troppo elevato per poterlo considerare quale valore effettivo da impiegare per l'isolamento del forno, per questo se si considera cosa succede quando si tocca con la mano la parete esterna del forno, si può pensare che in quei pochi istanti di tempo in cui si ha il contatto la fenomenologia sia la stessa che si ha tra due corpi semi-infiniti. La temperatura imposta di 50 °C diventa la temperatura di contatto T_0 e si può ricavare la temperatura dell'isolante T_i supponendo per la mano una temperatura di 35 °C e proprietà pari a quelle dell'acqua.

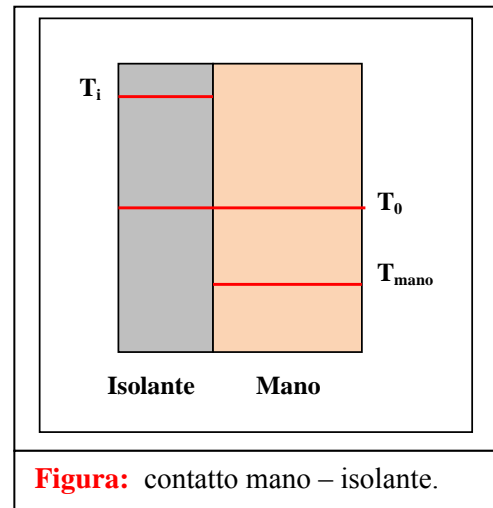


Figura: contatto mano – isolante.

$$T_0 = \frac{T_{mano} \sqrt{k_{mano} \rho_{mano} c_{mano}} + T_i \sqrt{k_i \rho_i c_i}}{\sqrt{k_{mano} \rho_{mano} c_{mano}} + \sqrt{k_i \rho_i c_i}}$$

$$T_i = \frac{T_0 [\sqrt{k_{mano} \rho_{mano} c_{mano}} + \sqrt{k_i \rho_i c_i}] - T_{mano} \sqrt{k_{mano} \rho_{mano} c_{mano}}}{\sqrt{k_i \rho_i c_i}}$$

Sostituendo i valori numerici all'interno dell'espressione sopra si ottiene:

$$T_i = \frac{323 [\sqrt{0.56 * 4187 * 10^3} + \sqrt{0.367 * 96 * 1130}] - 308 \sqrt{0.56 * 4187 * 10^3}}{\sqrt{0.367 * 96 * 1130}} = 438 \text{ K}$$

$$T_i = 165 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Nota la temperatura dell'isolante la si sostituisce nella relazione ottenuta in precedenza dal bilancio di energia applicato all'intera parete del forno:

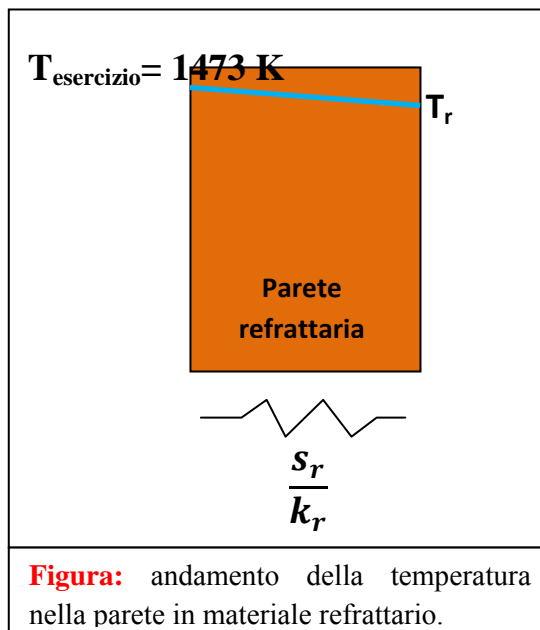
$$s_i^* = \left[\left(\frac{T_{esercizio} - T_{amb.}}{T_i - T_{amb.}} \right) \frac{1}{h_{amb.}} - \frac{s_r}{k_r} - \frac{1}{h_{amb.}} \right] k_i$$

$$s_i^* = \left[\left(\frac{1473 - 293}{438 - 293} \right) \frac{1}{20} - \frac{0.20}{2.08} - \frac{1}{20} \right] 0.367 = 0.0957 \text{ m} = 9.57 \text{ cm}$$

Quindi utilizzando il modello della temperatura di contatto si ottiene una drastica riduzione dello spessore di isolante da apporre alle pareti del forno. Infatti si è passati da uno spessore $s_i = 66.8 \text{ cm}$ ad uno spessore di $s_i^* = 9.57 \text{ cm}$ con conseguente riduzione del costo di acquisto dell'isolante che si deve sostenere. Da catalogo si sceglie di acquistare i MATERASSINI in fibra ceramica F.C.T.E. 1260 – 1450 °C (prodotti da SIR S.p.A.) di spessore pari a 13 cm.

➤ **Determinazione del tempo necessario al raggiungimento delle condizioni di equilibrio.**

1. Si vuole stimare il tempo necessario al raggiungimento della temperatura sulla faccia esterna dell'isolante di $T_i = 165\text{ °C} = 438\text{ K}$ ricavata attraverso l'applicazione del modello della temperatura di contatto (mano-isolante). Tale tempo lo si valuta considerando inizialmente, il tempo impiegato dallo spessore di isolante determinato analiticamente e pari a 9.57 cm e successivamente si ripetono i calcoli considerando il valore commerciale dello spessore di isolante che si intende acquistare. Applicando il principio di conservazione dell'energia al volume di controllo che circonda la parete di materiale refrattario si determina il valore della temperatura sulla parete refrattaria a contatto con l'isolante (T_r). Per ricavare il valore di tale temperatura bisogna conoscere innanzitutto il valore del potenza termica specifica scambiata dal forno verso l'ambiente esterno considerando lo spessore di $s_i^* = 9.57\text{ cm} = 0.0957\text{ m}$.



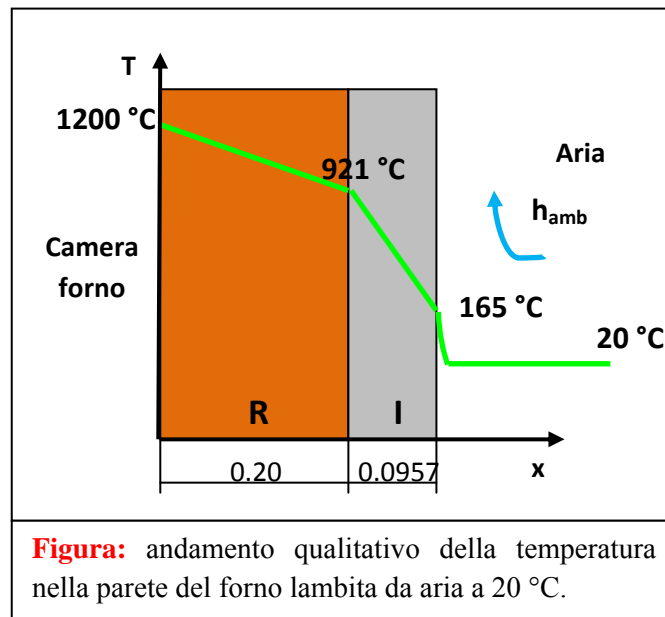
$$\dot{q} = \frac{T_{esercizio} - T_{amb.}}{\frac{s_r}{k_r} + \frac{s_i^*}{k_i} + \frac{1}{h_{amb.}}} = \frac{1200 - 20}{\frac{0.20}{2.08} + \frac{0.0957}{0.367} + \frac{1}{20}} = 2899.86 \frac{W}{m^2}$$

Nota la potenza termica specifica scambiata e considerando che la temperatura sulla faccia opposta della parete in materiale refrattario è pari alla temperatura di esercizio del forno si ottiene:

$$\dot{q} = \frac{T_{esercizio} - T_r}{\frac{s_r}{k_r}}$$

$$T_r = T_{esercizio} - \dot{q} \frac{s_r}{k_r} \rightarrow T_r = 1473 - 2899.86 \frac{0.20}{2.08} = 1194\text{ K} = 921\text{ °C}$$

Si riporta l'andamento qualitativo della temperatura all'interno dell'intera parete (parete refrattaria più isolante) del forno.



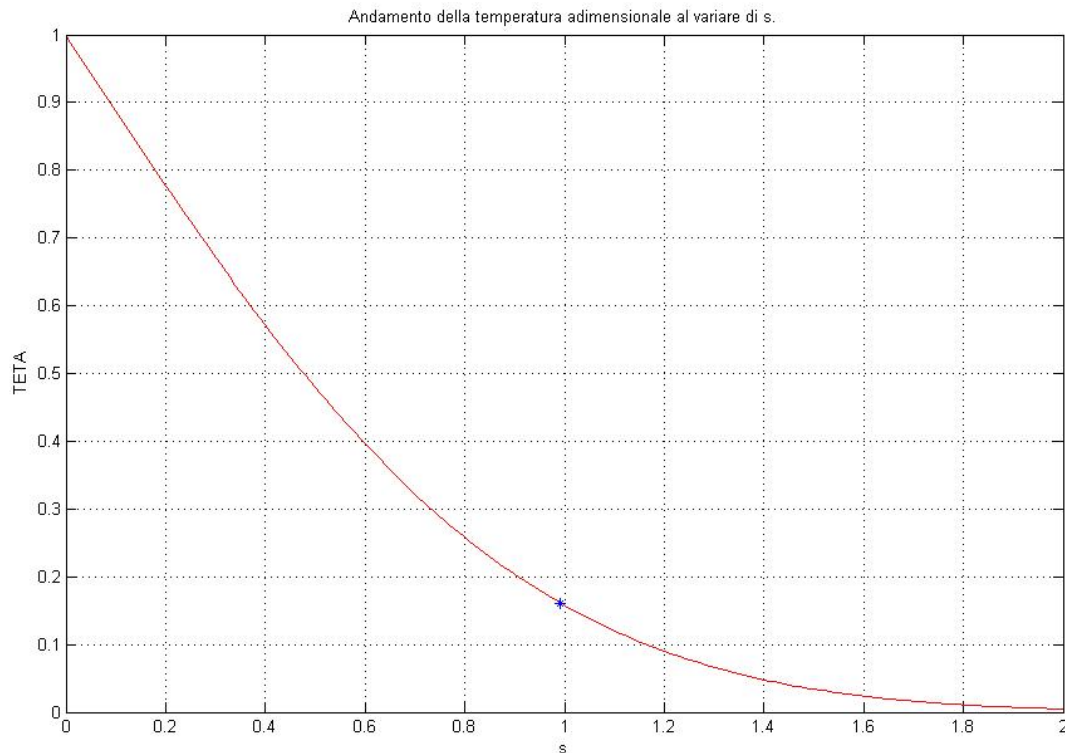
Noto il valore di T_r si determina il valore della temperatura adimensionale:

$$\theta = \frac{T - T_i}{T_0 - T_i} \quad \rightarrow \quad \theta = \frac{438 - 293}{1194 - 293} = 0.160$$

Applicando il modello di corpo semi-infinito si ricava dalla variabile di similitudine il tempo necessario affinché la faccia esterna dell'isolante raggiunga la temperatura di 165°C.

$$s = \frac{x}{\sqrt{4\alpha_i t}} \quad \rightarrow \quad t = \frac{x^2}{4s^2\alpha_i}$$

Il valore di s può essere letto dai diagrammi, rintracciabili in letteratura tecnica, della funzione degli errori complementare al variare del parametro "s" ($erfc(s)$), oppure è possibile ricavarlo attraverso l'implementazione di una semplice routine di calcolo in Matlab dove per $\theta = 0.160 \rightarrow s = 0.9913$.

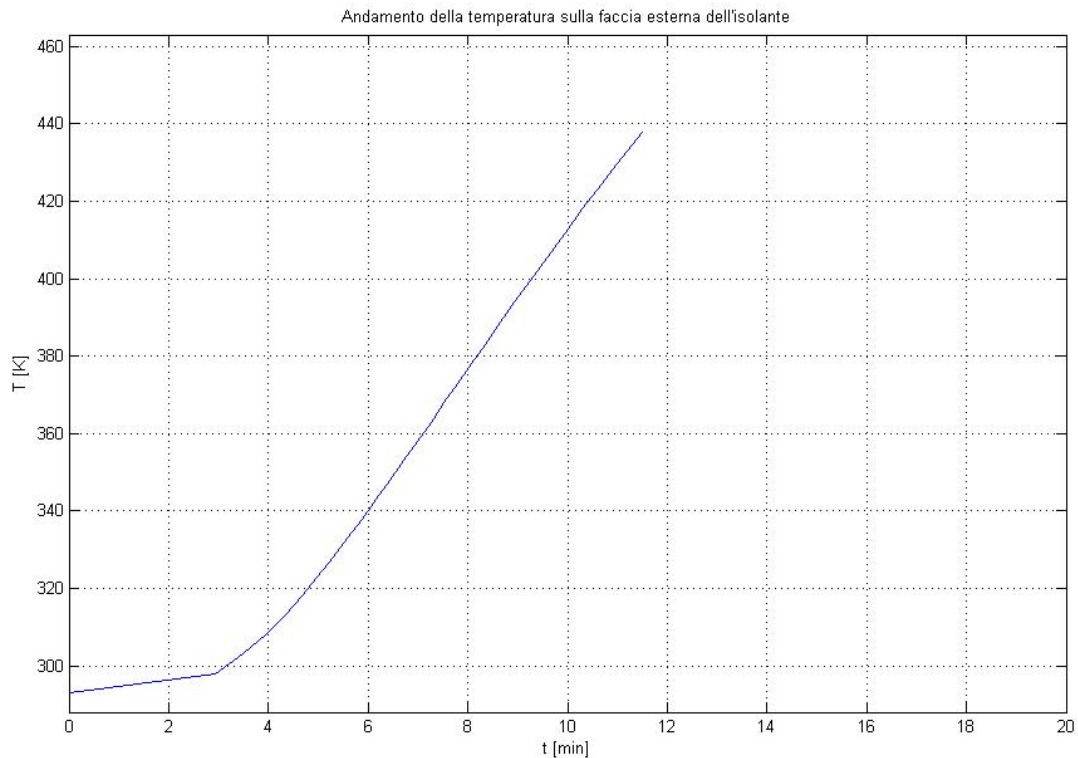


$$\alpha_i = \frac{k_i}{\rho_i c_i} = \frac{0.367}{96 * 1.13 * 10^3} = 3.38 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

$$t_1 = \frac{x^2}{4s^2\alpha} \rightarrow t_1 = \frac{0.0957^2}{4 * 0.9913^2 * 3.38 * 10^{-6}} = 689.34 s = 11.5 min$$

Quindi dopo circa 11.5 minuti la superficie dell'isolante lambita da aria alla temperatura di 20°C raggiunge la temperatura di 165°C.

Inoltre è stato valutato come varia la temperatura sulla faccia esterna dell'isolante al variare del tempo (da 20 °C a 165 °C) attraverso l'implementazione di una routine di calcolo in Matlab. Si riporta il grafico ottenuto.



2. Si considera ora il valore commerciale dello spessore di isolante $s_i = 13 \text{ cm} = 0.13 \text{ m}$.

Si determina il valore della potenza termica specifica scambiata dal forno verso l'ambiente esterno per determinare il valore di T_r .

$$\dot{q} = \frac{T_{\text{esercizio}} - T_{\text{amb.}}}{\frac{s_r}{k_r} + \frac{s_i}{k_i} + \frac{1}{h_{\text{amb.}}}} = \frac{1200 - 20}{\frac{0.20}{2.08} + \frac{0.13}{0.367} + \frac{1}{20}} = 2358.22 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$T_r = T_{\text{esercizio}} - \dot{q} \frac{s_r}{k_r} \rightarrow T_r = 1473 - 2358.22 \frac{0.20}{2.08} = 1246 \text{ K} = 973 \text{ }^\circ\text{C}$$

Nota il valore di T_r si determina il nuovo valore di T_i :

$$\dot{q} = \frac{T_r - T_i}{\frac{s_i}{k_i}} \rightarrow T_i = T_r - \dot{q} \frac{s_i}{k_i} = 1246 - 2358.22 \frac{0.13}{0.367} = 411 \text{ K} = 138 \text{ }^\circ\text{C}$$

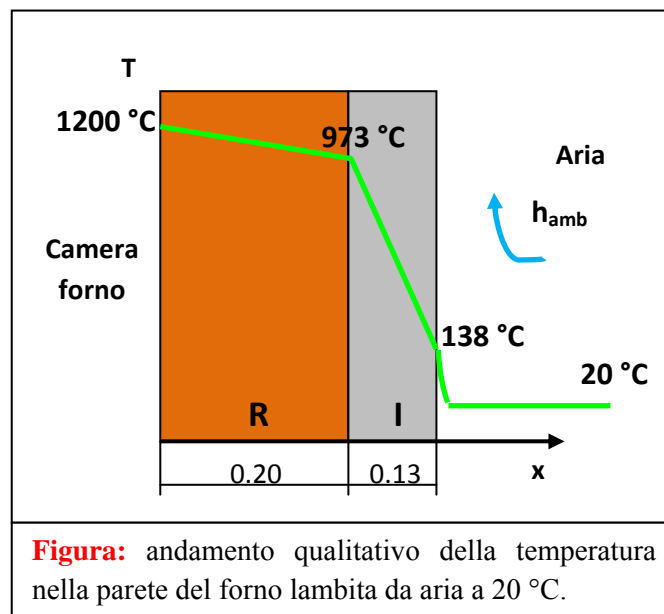
Nota il valore di T_i^* si determina il valore effettivo della temperatura di contatto mano-isolante:

$$T_0^* = \frac{T_{mano} \sqrt{k_{mano} \rho_{mano} c_{mano}} + T_i \sqrt{k_i \rho_i c_i}}{\sqrt{k_{mano} \rho_{mano} c_{mano}} + \sqrt{k_i \rho_i c_i}}$$

$$T_0^* = \frac{308 \sqrt{0.56 * 1000 * 4187} + 411 \sqrt{0.367 * 96 * 1130}}{\sqrt{0.56 * 1000 * 4187} + \sqrt{0.367 * 96 * 1130}} = 320 \text{ K} = 47 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La temperatura di contatto $T_0^* < 50^\circ\text{C}$ che è la temperatura di contatto adoperata per la determinazione analitica dello spessore di isolante ($s_i^* = 9.57 \text{ cm}$).

Si riporta l'andamento qualitativo della temperatura all'interno dell'intera parete (parete refrattaria più isolante) del forno.



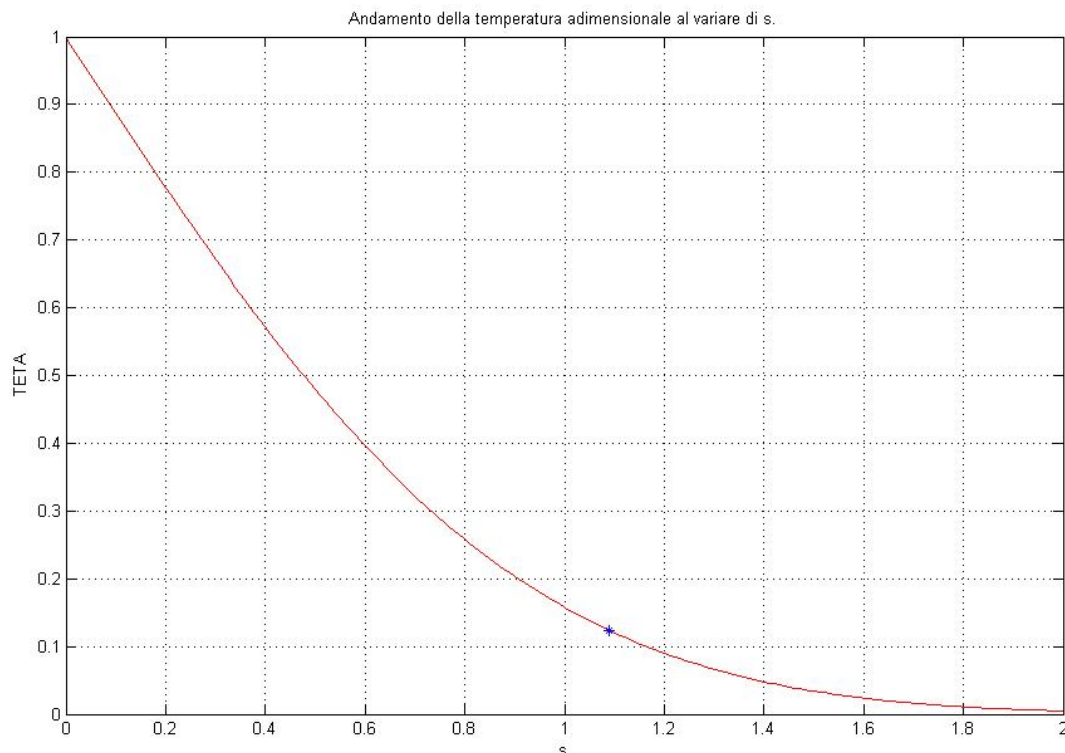
Nota il valore di T_r si determina il valore della temperatura adimensionale:

$$\theta = \frac{T - T_i}{T_0 - T_i} \rightarrow \theta = \frac{411 - 293}{1246 - 293} = 0.124$$

Applicando il modello di corpo semi-infinito si ricava dalla variabile di similitudine il tempo necessario affinché la faccia esterna dell'isolante raggiunga la temperatura di 138 °C a partire dalla temperatura ambiente di 20 °C.

$$s = \frac{x}{\sqrt{4\alpha_i t}} \quad \rightarrow \quad t = \frac{x^2}{4s^2\alpha_i}$$

Per $\theta = 0.124 \rightarrow s = 1.0882$.

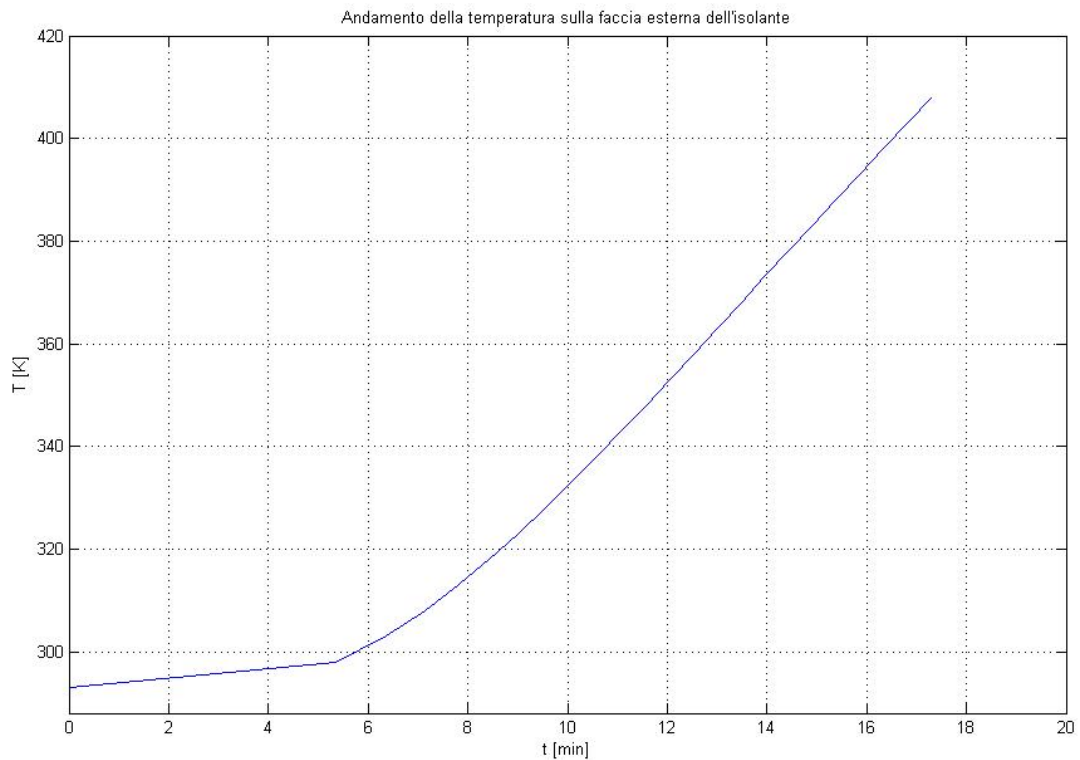


$$t_{effettivo} = \frac{x^2}{4s^2\alpha} \rightarrow t_{effettivo} = \frac{0.13^2}{4 * 1.0882^2 * 3.38 * 10^{-6}} = 1055.58 \text{ s} = 17.6 \text{ min}$$

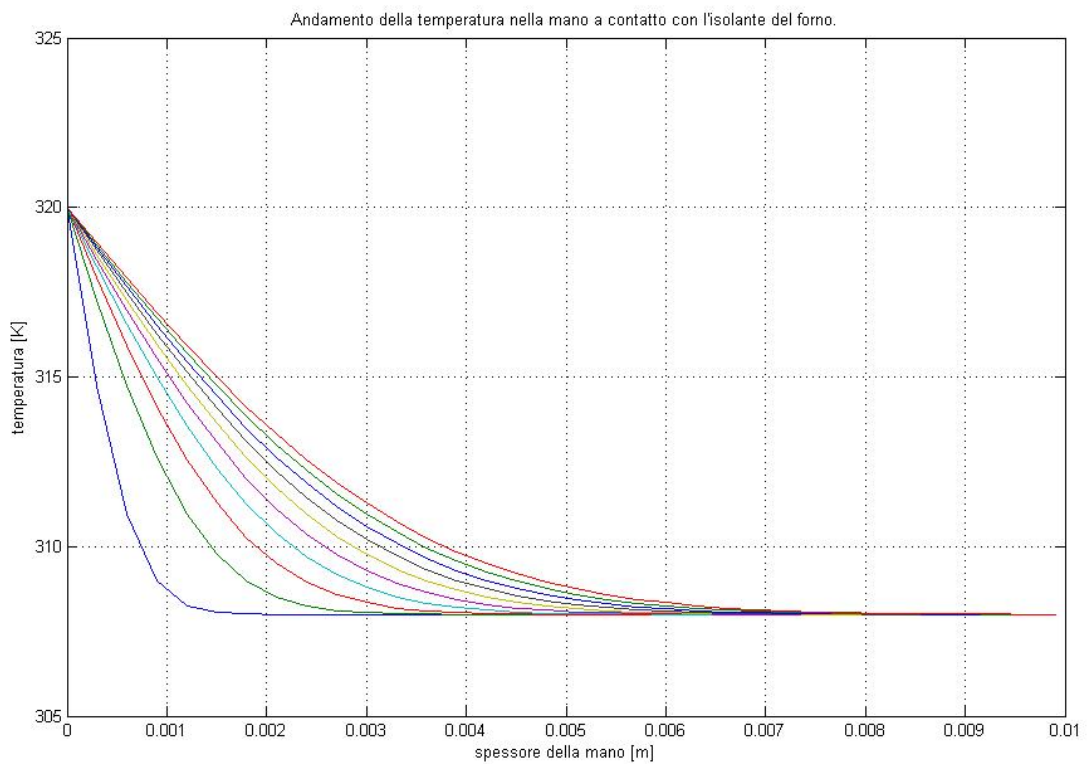
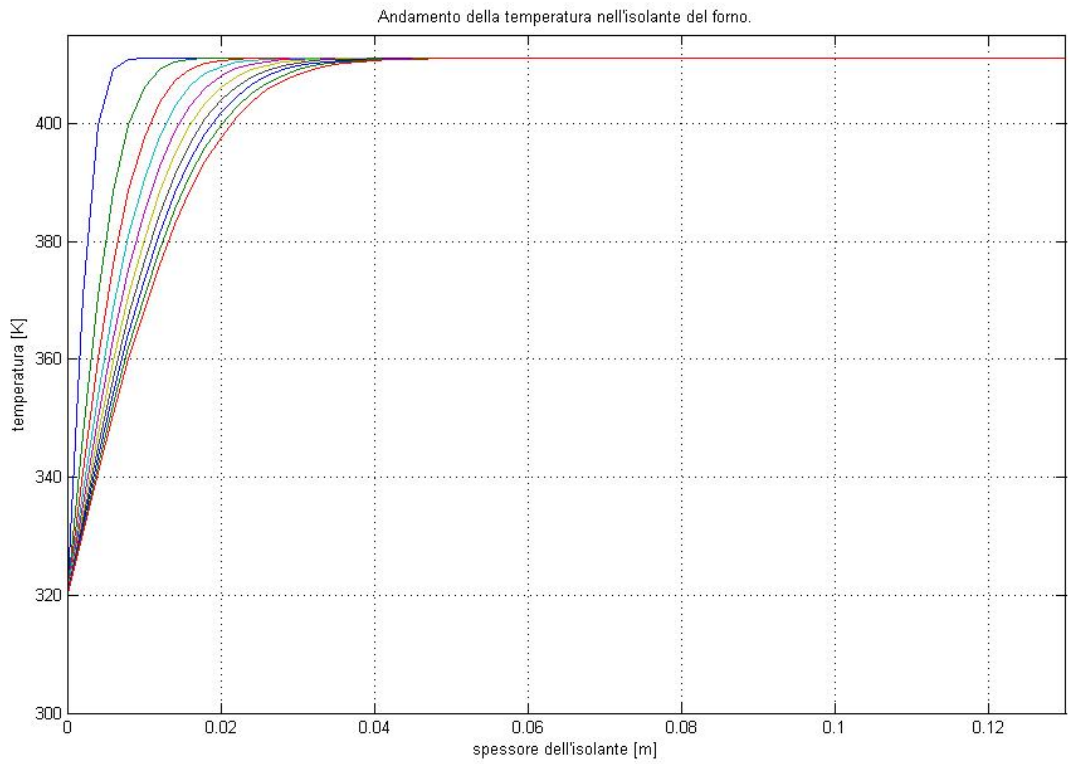
Quindi installando i materassini in fibra ceramica di spessore pari a 13 cm il tempo necessario per raggiungere la temperatura di 138 °C a partire dalla temperatura ambiente di 20 °C è pari a 17.6 min perciò la differenza tra il tempo determinato considerando uno spessore di 9.57 cm e il tempo determinato considerando lo spessore di 13 cm è pari a:

$$\Delta t = t_{effettivo} - t_1 = 17.6 - 11.5 = 6.1 \text{ min}$$

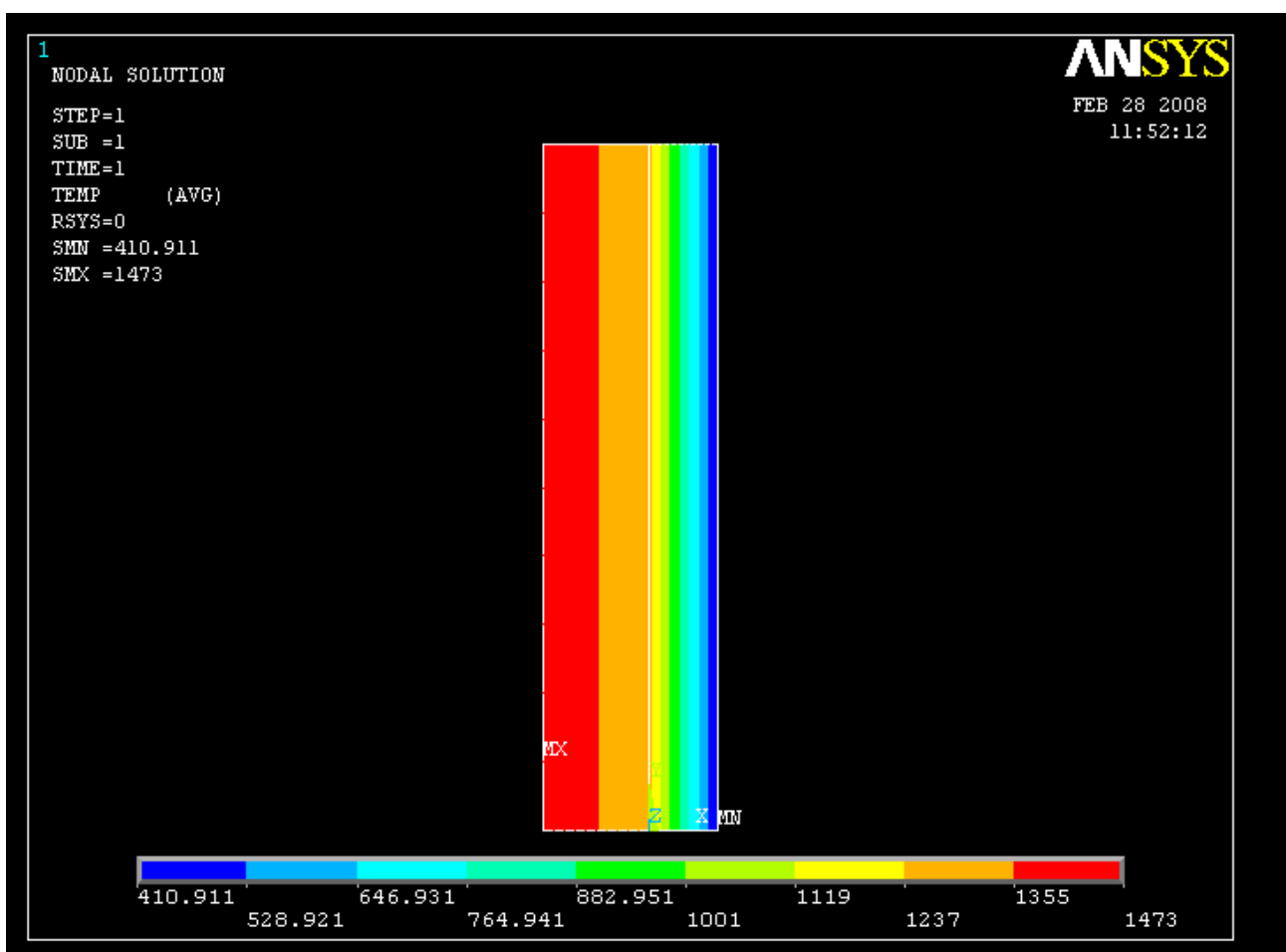
Si riporta l'andamento della temperatura sulla faccia esterna dell'isolante al variare del tempo (da 20 °C a 138 °C).



Si riporta inoltre l'andamento della temperatura nella mano e nell'isolante del forno quando sono in contatto. Per visualizzare l'andamento della temperatura si è implementato una routine di calcolo in Matlab.

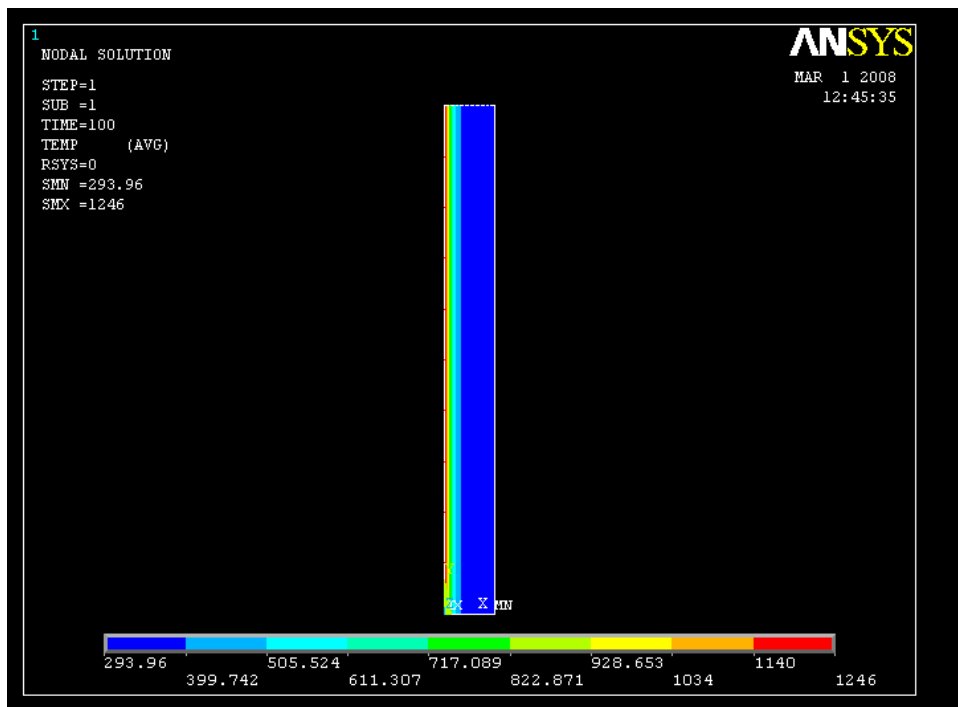


Utilizzando il metodo degli elementi finiti (FEM) si è valutato l'andamento della temperatura all'interno della parete del forno. L'analisi FEM è un metodo di calcolo che, attraverso la suddivisione del componente considerato in elementini (*mesh*), consente di determinarne il comportamento assegnate le condizioni al contorno. Nel caso in esame, utilizzando il software Ansys si è modellata la parete del forno assegnando le conducibilità termiche dei materiali costituenti. È stata imposta la temperatura di 1473 K sulla superficie interna della parete refrattaria e una condizione di flusso convettivo sulla superficie dell'isolante lambita da aria con valori di temperatura e coefficiente di scambio termico convettivo pari a quelli dell'aria ($T_{amb.} = 20\text{ }^{\circ}\text{C} = 293\text{ K}$; $h_{amb.} = 20\text{ W/m}^2\text{K}$). Nella figura riportata sotto è mostrato il risultato dell'analisi; attraverso gradazioni di colore si evidenzia l'andamento della temperatura interna alla parete nel caso stazionario.

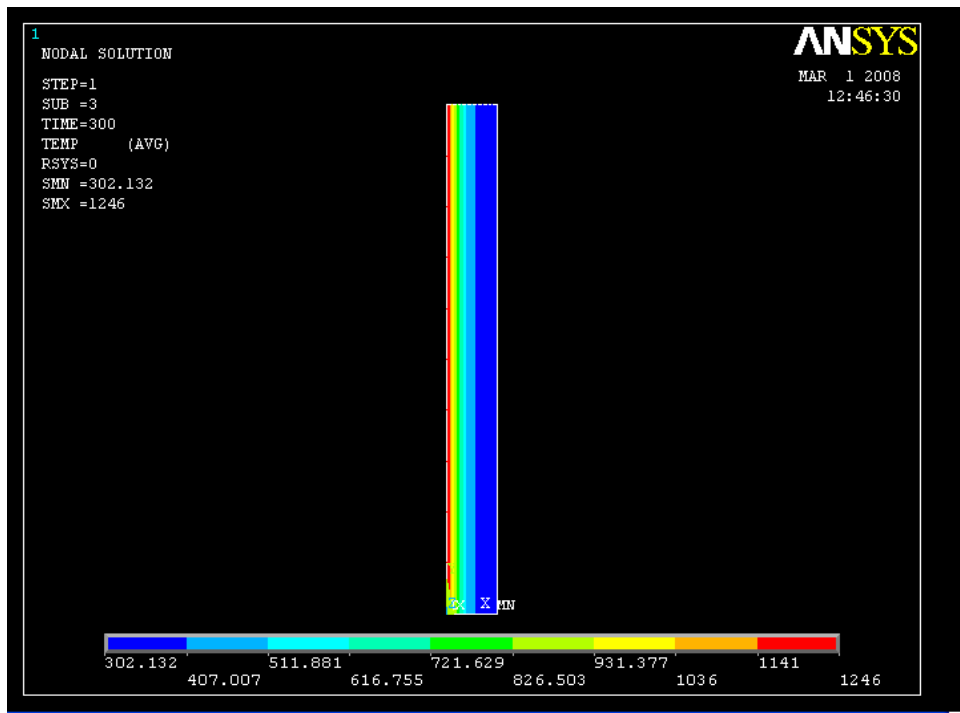


Si riporta anche l'andamento della temperatura nello strato di isolante del forno al variare del tempo (condizioni di transitorio) valutato attraverso l'utilizzo di Ansys.

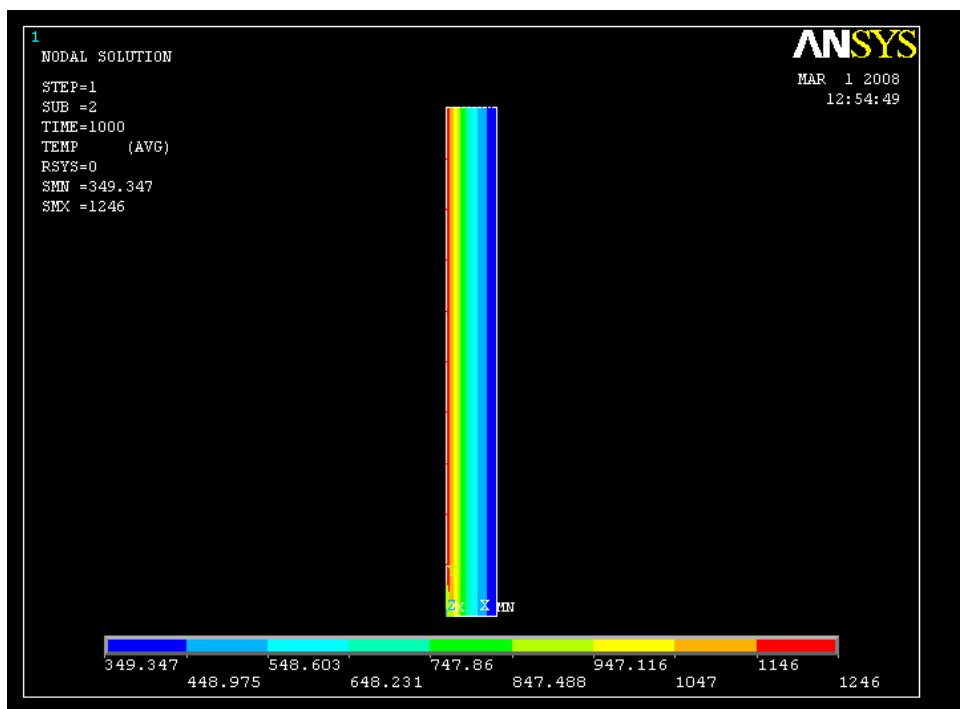
- Andamento della temperatura do 100 s:



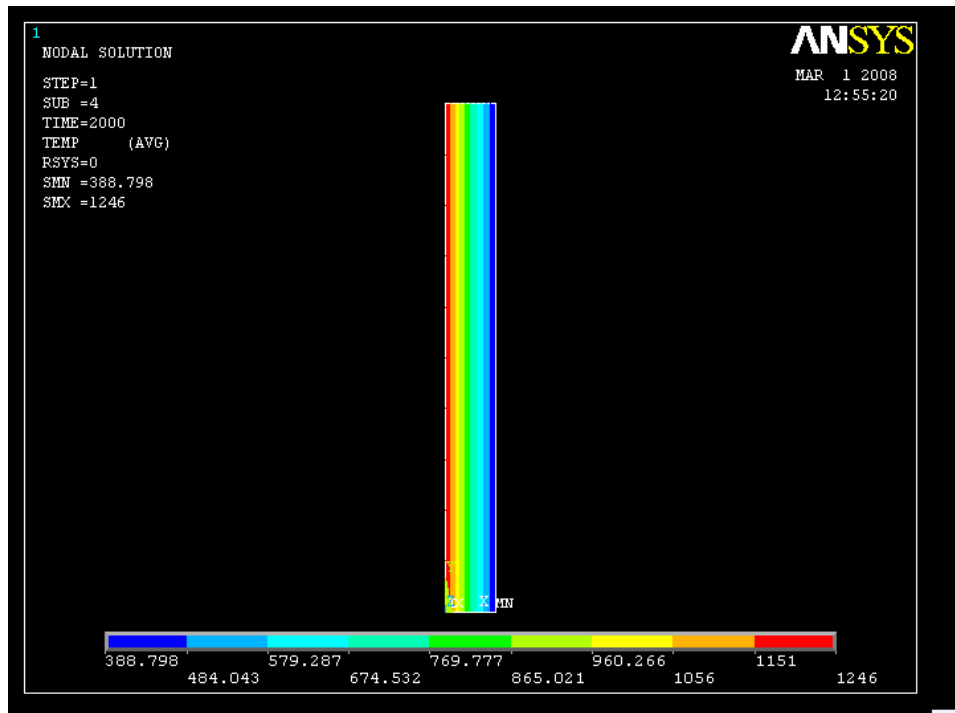
- Andamento della temperatura dopo 300 s:



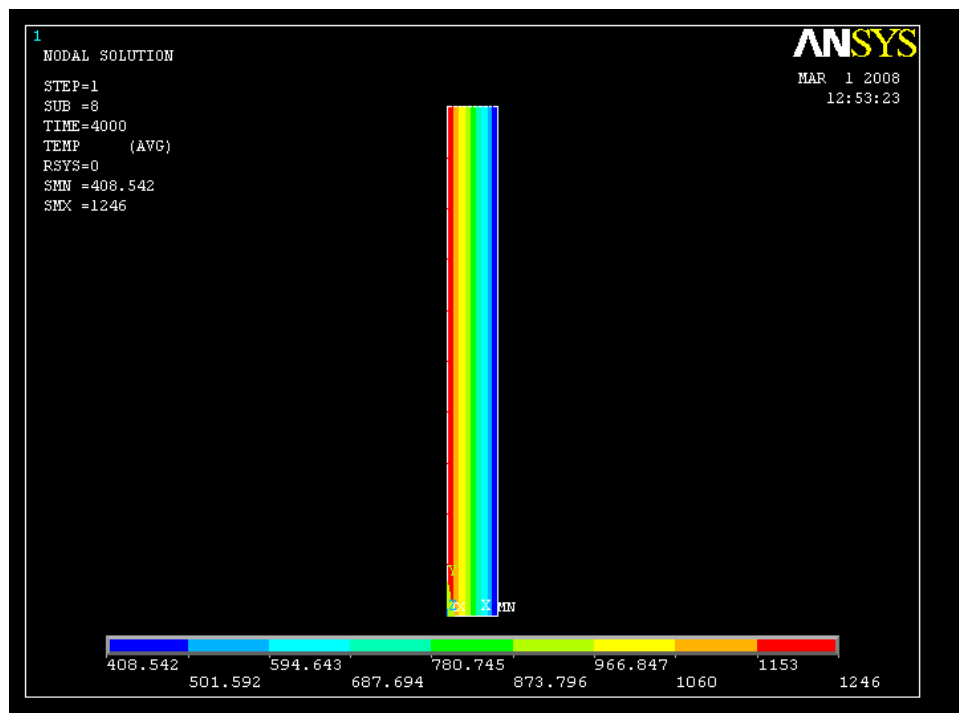
- Andamento della temperatura dopo 1000 s:



- Andamento della temperatura dopo 2000 s:



- Andamento della temperatura dopo 4000 s:



Appendice

• **Tab. 1: Caratteristiche fisiche dei principali materiali refrattari.**

Materiale	Composizione	Temperatura di fusione	Peso specifico	Calore specifico	Coeff. di dilatazione termica	Conducibilit termica	Resistività
	%	°C	Kg/dm ³	Wh/KgC	10 ⁻⁶ /°C	W/m°C	Ω cm 10 ³
Schamotte	15-45 Al ₂ O ₃ 55-85 SiO ₂	1630-1750	1.7-2.1	0.25-0.29	4.6-7.6	1.24-1.38	
Sillimanite Mullite	60-72 Al ₂ O ₃ 28-40 SiO ₂	1790-1880	2.2-2.4	0.28	4.6	1.24-1.38	2.
Silica	93-96 SiO ₂	1700-1750	1.7-1.9	0.31		1.86-2.08	7.
Corindone	80-99 Al ₂ O ₃	1850-2000	2.5-3.2	0.31	9.4	2.20	1.
Allumina	Al ₂ O ₃	2050					
Magnesia	MgO	2800					
Magnesite	80-95 MgO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ resto	2000	2.6-3.1	0.34	14.0	3.06-4.44	2.
Cromo- Magnesite	60 MgO, Fe ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ resto	1920-2000	2.8-3.2	0.31	8.0	2.08	1.
Chromerz	15-33 Al ₂ O ₃ 14-19 MgO 10-17 Fe ₂ O ₃ 30-45 Cr ₂ O ₃	1800-1900	3.0-3.8	0.26	7.1	2.08	
Caolino	CaO	2200-2570					
Dolomite	CO ₃ Ca CO ₃ Mg	2300					
Carburo di Silicio	90-95 SiC Al ₂ O ₃ resto	1920	2.2-2.7	0.29	4.5-5.5	9.28	5.
Carbone Grafite	90-98 C	2300-3000	1.3-1.8	0.44	5.0	1.05-36.0	
Zirconio	93 Zr ₂ O ₃ ; 5 CaO	2677	5.9	1.57	9.4	2.3	0.03

• **Scheda isolanti termici in fibra ceramiche**

SIR S.p.A. - Via Brescia 41 25014 CASTENEDOLO (Bs) Tel. 030 2130290 (6 linee r.a.) - Fax 030 2733266 - www.sirspa.it - info@sirspa.it

45

FIBRE CERAMICHE

Le fibre ceramiche rappresentano una delle espressioni tecnologicamente più avanzate nel settore dei materiali isolanti e refrattari.

Si distinguono dai refrattari tradizionali per alcune caratteristiche principali, quali: l'estrema leggerezza, il bassissimo coefficiente di conducibilità termica, il limitato assorbimento di calore e l'assoluta insensibilità allo sbalzo termico.

Tra i molteplici campi di applicazione ricordiamo: il riempimento di giunti nelle murature refrattarie, il riempimento ed imbottitura ad alta temperatura, guarnizioni di isolamento degli assi dei rulli nei forni ceramici, volumi contorti, camere di combustione calda e pezzi speciali di rivestimenti di forni, coni e pezzi diversi per alluminio, isolamento termico per coperchi di siviera, rivestimento di forni industriali (volte e pareti), isolamento acustico ad alta temperatura, raffreddamento controllato dei pezzi di fonderia, protezione contro l'incendio (porte, serrande, giunti tagliafuoco), ecc.

Le **Fibre Ceramiche** sono disponibili in:

- FIOCCO T.E. 1260 °C
- MATERASSINI F.C. T.E. 1260-1450 °C spessore 6-9-13-19-25-33-50 CM
- CARTA T.E. 1260 °C spessore mm 0,5-1-2-3
- PANNELLI SOTTOVUOTO RIGIDI T.E. 950-1150-1260-1430 °C spessore mm 3-6-9-12-18-25-50
- ELEMENTO MODULARE T.E. 1260-1430 °C
- SAGOMATI FORMATI sottovuoto, su disegno del cliente

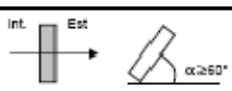
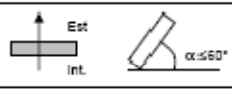
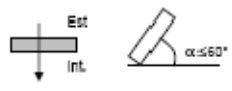
Densità: 96 kg/m³
Conducibilità termica: 0.367 W/mK
Calore specifico: 1130 Ws/kgK

• **Tab. 2: coefficienti di scambio termico convettivo.**

	Liquidi	Gas
Convezione naturale	50 - 2000	2 - 25
Convezione forzata	100 - 20000	25 - 250
Convezione con cambio di fase (ebollizione, condensazione)	2500 - 100000	2500 - 100000

Valori indicativi di h [W/m²K] per i casi più comuni.

• **Tab. 3: Norme UNI 7357/76 (coefficienti di scambio termico convettivo).**

Tipologia di parete		Parete in contatto con:	Parete in contatto con:
		- Esterno - Passaggio aperto - Locale aperto	- Altro locale riscaldato - Sottotetto - Spazio sanitario
Parete verticale		$\alpha_i = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\alpha_e = 23 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\alpha_i = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\alpha_e = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$
Parete orizzontale flusso ascendente		$\alpha_i = 9,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\alpha_e = 23 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\alpha_i = 9,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\alpha_e = 8,3 \text{ W/m}^2\text{K}$
Parete orizzontale flusso discendente		$\alpha_i = 5,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\alpha_e = 18 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\alpha_i = 5,8 \text{ W/m}^2\text{K}$ $\alpha_e = 5,8 \text{ W/m}^2\text{K}$

```
%-----%
%Andamento della temperatura adimensionale al variare di s%
%-----%

clear all

close all

clc

s=[0:0.01:2];

for i=1:length(s)

    teta(i)=erfc(s(i)); %Temperatura adimensionale al varire di 's'

end

plot(s,teta,'r')

grid on

axis([0 2 0 1])

xlabel('s')

ylabel('TETA')

title('Andamento della temperatura adimensionale al variare di s.')

pause

teta_Ti=(411-293)/(1246-293);

s1=erfcinv(teta_Ti)

hold on

plot(s1,teta_Ti,'b*')
```

```
%-----%  
%Temperatura al variare del tempo sulla superficie esterna dell'isolante%  
%-----%
```

```
clear all
```

```
close all
```

```
clc
```

```
T0=1246;      %Temperatura sulla faccia interna dell'isolante [K]
```

```
Tamb=293;    %Temperatura ambiente [K]
```

```
alfa=3.38*10^(-6); %Diffusività termica dell'isolante [m^2/s]
```

```
x=0.13;     %Spessore strato isolante [m]
```

```
T=[293:5:411];
```

```
for i=1:length(T)
```

```
    teta(i)=(T(i)-Tamb)/(T0-Tamb); %Temperatura adimensionale
```

```
    s(i)=erfcinv(teta(i));        %Variabile di similitudine
```

```
    t(i)=(x^2/(4*s(i)^2*alfa))/60; %Tempo [min]
```

```
end
```

```
plot(t,T)
```

```
grid on
```

```
axis([0 20 288 420])
```

```
title('Andamento della temperatura sulla faccia esterna dell"isolante')
```

```
xlabel('t [min]')
```

```
ylabel('T [K]')
```

```

%-----%
%Andamento della temperatura nella mano a contatto con l'isolante del forno
%-----%

clear all
close all
clc

T0=320;           %Temperatura di contatto [K]
Tmano=308;        %Temperatura della mano [K]
alfa_mano=1.337*10^(-7); %Diffusività termica della mano [m^2/s]
x_mano=[0:0.0003:0.01]; %Spessore della mano [m]
t=[1:3:30];      %Tempi di osservazione [s]
for i=1:length(x_mano)
    for j=1:length(t)
        s(i,j)=x_mano(i)/(sqrt(4*alfa_mano*t(j)));
        T(i,j)=Tmano+(T0-Tmano)*(erfc(s(i,j)));
    end
end
end
plot(x_mano,T)
title('Andamento della temperatura nella mano a contatto con l"isolante del forno.')
xlabel('spessore della mano [m]')
ylabel('temperatura [K]')
axis([0 0.01 305 325])
grid on
figure
pause

Tisolante=411;    %Temperatura dell'isolante termico [K]
alfa_isolante=3.38*10^(-6); %Diffusività termica della parete del forno [m^2/s]
x_isolante=[0:0.002:0.13]; %Spessore dell'isolante termico [m]

```

```
t=[1:3:30];          %Tempi di osservazione [s]

for i=1:length(x_isolante)
    for j=1:length(t)
        s1(i,j)=x_isolante(i)/(sqrt(4*alfa_isolante*t(j)));
        T1(i,j)=Tisolante+(T0-Tisolante)*(erfc(s1(i,j)));
    end
end

plot(x_isolante,T1)
title('Andamento della temperatura nell"isolante del forno.')
xlabel('spessore dell"isolante [m]')
ylabel('temperatura [K]')
axis([0 0.13 300 415])
grid on
figure
```

Routine in Ansys

```
finish
/clear
/PREP7

sp_isolante=0.13
sp_refrattario=0.20
t_amb=293
t_int=1473
k_isolante=0.367
k_refrattario=2.08
h_aria=20

ET,1,PLANE55

MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,1,,k_isolante

MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,2,,k_refrattario

k,1,0,0,0,
K,2,sp_isolante,0,0,
K,3,sp_isolante,10*sp_isolante,0,
K,4,0,10*sp_isolante,0,
k,5,-sp_refrattario,0,0
k,6,-sp_refrattario,10*sp_isolante,0

A,1,2,3,4
A,1,5,6,4
```

asel,s,area,,1

aatt,1,

asel,all

asel,s,area,,2

aatt,2,

asel,all

ESIZE,,10,

AMESH,all

lsel,s,loc,x,-sp_refrattario

DL,all, ,ALL,t_int,0

lsel,all

lsel,s,loc,x,sp_isolante

sfl,all,conv,h_aria,,t_amb

lsel,all

FINISH

/SOL

solve

FINISH

/POST1

PLNSOL, TEMP,, 0