

MATERIALI REFRAATTARI

DEFINIZIONI E CLASSIFICAZIONE

Definizione generale dei materiali refrattari

I refrattari sono, in genere, dei materiali costituiti da una miscela di corpi a carattere cristallino e di corpi a carattere vetroso aventi una fusione pastosa ; pertanto, al crescere della temperatura essi subiscono un rammollimento a causa della fusione progressiva della fase vetrosa seguita dalla fusione dei componenti cristallini.

Il criterio utilizzato internazionalmente per la definizione dei materiali refrattari si basa sulla resistenza pirosopica che permette di ordinarli in riferimento alla temperatura di rammollimento e non di fusione, dato che questi prodotti non hanno un vero punto di fusione, non essendo corpi cristallini puri.

Per quanto riguarda la normativa, si trovano le seguenti definizioni :

- UNI 4450 - 60 riporta:
“per materiali refrattari si intendono quelle sostanze non metalliche le quali, indipendentemente dalla composizione chimica, hanno una refrattarietà, determinata secondo UNI 4453, non minore di quella di un piroscopto equivalente a 1500 °C”.
- ISO / R 836 - 68 identifica i materiali refrattari come:
“materiali e prodotti non metallici (senza escludere però quelli contenenti un costituente metallico) aventi una resistenza pirosopica almeno uguale a 1500°C” .
- DIN S1060 - 59 (vecchia norma) indica come refrattario :
un materiale avente una resistenza pirosopica > CS 26 (1580 °C).
- DIN S1060 (1975) definisce un materiale:
 - ◆ “refrattario” quando il suo indice di refrattarietà risulta > CS17 (1500°C);
 - ◆ “ad alta refrattarietà” quando il suo indice di refrattarietà risulta > CS36 (1800°C).
- ASTM C 71-84 definisce i refrattari come :
“materiali non metallici aventi quelle proprietà chimico-fisiche che li rendono adatti a strutture o a componenti di sistemi che sono esposti a condizioni di esercizio al di sopra di 538°C”.

Queste definizioni tuttavia non sono sufficienti, poiché trascurano il fatto che i prodotti refrattari formati e non formati devono resistere durante l'utilizzo, oltre che alla temperatura, anche a:

- sollecitazioni meccaniche a caldo;
- sbalzi di temperatura;
- attacchi chimici a temperature varie.

Definizione particolareggiata e classificazione

Una prima classificazione dei materiali refrattari in base alla **densità** è la seguente :

a - Refrattari densi formati

sono prodotti ceramici per lo più cotti che si differenziano fra loro per la costituzione chimico-mineralogica e per le proprietà tecnologiche.

Si tratta di prodotti realizzati in molteplici forme ed in genere utilizzati per le varie parti dei rivestimenti dei forni industriali e comprendono refrattari “tradizionali” e “non tradizionali”; questi ultimi rappresentano una serie di nuovi materiali sintetici fabbricati con tecnologie d'avanguardia.

b - Materiali isolanti termici formati

Sono materiali da costruzione i quali, oltre alla resistenza termica, devono possedere:

- bassa densità
- alto potere isolante.

Hanno delle limitazioni d'impiego a causa della loro particolare struttura; ad esempio in presenza di sostanze corrosive e di notevoli sollecitazioni meccaniche.

Possono essere ulteriormente distinti in

b.1. - Refrattari isolanti

Secondo la normativa ISO 2245 i refrattari isolanti formati sono definiti come: materiali aventi porosità totale maggiore o uguale al 45%.

A partire da tale caratteristica, è facile prevedere che essi avranno una bassa conduttività termica ed una bassa capacità termica. Per quanto riguarda i criteri di classificazione tecnologica ci si riferisce alla densità apparente ($PV =$ peso volumetrico) in quanto espressione della porosità, ma di più facile determinazione, in quanto è sufficiente rapportare la massa al volume apparente.

In merito alla resistenza pirosopica, la normativa ISO 2245 - 72 indica che i refrattari isolanti, pur non rispondendo alla definizione generale dei prodotti refrattari (i refrattari isolanti non hanno una resistenza pirosopica >1500 °C, come è invece richiesto dalla definizione), corrispondono ai criteri di questa classificazione (riguardante PV e $VL =$ variazione lineare permanente) e possono quindi essere classificati in base ad essa.

A tale proposito, la Raccomandazione PRE / R39 - 78 indica due famiglie di materiali isolanti:

- materiali refrattari con resistenza pirosopica > 1500 °C;
- materiali semi-refrattari con resistenza pirosopica < 1500 °C, la cui VL deve risultare $< 2\%$ alla temperatura di ogni singolo gruppo di appartenenza.

Tuttavia, la normativa ISO 2245 pubblicata nel 1990 semplifica le precedenti definizioni di refrattarietà e propone una classificazione dei prodotti refrattari isolanti formati basata sulla VL , senza riferimento alcuno alla refrattarietà.

b.2. - Materiali isolanti

Questi prodotti sono indicati anche con il nome di “coibenti termici” e devono avere una porosità totale > 45%.

Il loro maggiore impiego è in qualità di rivestimento di 2° strato dei forni industriali, dal momento che sono in grado di resistere fino alla temperatura massima di 900°C circa.

c - Refrattari non formati preparati

Sono costituiti da una parte granulare (aggregato) e da uno o più leganti. A seconda dei tipi, possono essere usati direttamente (cioè nello stato in cui sono forniti), oppure bisogna prima aggiungere uno o più liquidi adatti.

In merito alla resistenza piroscopica, la norma ISO 1927 - 84 riporta le stesse considerazioni indicate dalla già citata ISO 2245 - 72 per i refrattari isolanti formati

I refrattari non formati preparati possono essere densi ed isolanti e dopo cottura devono avere valori della porosità totale corrispondenti a quelli dei prodotti formati, cioè:

- porosità totale < 45% per i prodotti densi
- porosità totale > 45% per quelli isolanti.

Nella categoria dei refrattari non formati preparati rientrano i seguenti prodotti:

- Pigliate: materiali refrattari senza coesione prima dell'uso. Sono costituiti da aggregati refrattari e legante ceramico, chimico od organico.
- Plastici: materiali refrattari allo stato plastico, pronti per l'uso. Sono costituiti da aggregati refrattari e legante ceramico, chimico od organico.
- Calcestruzzi: miscela di inerti refrattari granulati (aggregati) e legante idraulico oppure legante chimico; prima dell'uso sono incoerenti ed allo stato secco.
- Materiali da spruzzo: miscele di aggregati refrattari e leganti. Si applicano a spruzzo e possono appartenere ad uno dei prodotti sopra menzionati.
- Cementi e intonaci refrattari
 - Sono costituiti da miscele di aggregato refrattario fine e di un legante di diversa natura. Vengono impiegati per legare le murature dei mattoni e per riempire i giunti.

d - Refrattari fibrosi

Sono dei refrattari isolanti non tradizionali caratterizzati da una struttura fibrosa per lo più omogenea.

Hanno un elevato potere isolante ed alta resistenza termica. Possono essere:

- materiali esclusivamente fibrosi (fiocco, materassini, feltri, ecc.);
- materiali in cui la fibra fa parte di un composto unitamente ad altri componenti solidi (ad esempio miscele per calcestruzzi, intonaci, pezzi formati sottovuoto, lastre rigide, ecc.).

Un'altra classificazione molto usata è quella basata sulla **natura chimica** del refrattario :

a - Refrattari acidi

Sono materiali refrattari in cui è contenuta silice in quantità rilevante; essa ad alta temperatura può dare reazioni chimiche con refrattari basici, con fondenti basici o con scorie basiche.

b - Refrattari basici

In questi materiali refrattari i costituenti principali sono la calce o la magnesia od una combinazione di entrambi; ad alta temperatura possono reagire chimicamente con refrattari acidi, fondenti acidi o scorie acide.

c - Refrattari neutri

Sono materiali refrattari resistenti all'attacco chimico ad alta temperatura da parte di refrattari o di fondenti o di scorie acide e basiche

PROPRIETÀ

Per la scelta dei refrattari più opportuni da utilizzare nelle diverse zone del forno, è bene conoscere le loro proprietà e la dipendenza di queste ultime dalle variabili del processo .

Generalmente è il produttore di refrattari che fornisce le specifiche del materiale, compilando schede in cui, dopo la classificazione secondo la ISO 2245, sono riportati i valori di :

- Temperatura di classificazione (ASTM C134-84)
- Peso volumetrico o densità apparente (ASTM C134-84)
- Resistenza a compressione e flessione a freddo (ASTM C93-84)
- Resistenza alla compressione a caldo (ASTM C16-81)
- Conducibilità termica (ASTM C182-83) a diverse temperature medie
- Calore specifico (DIN 51046)
- Dilatazione termica reversibile (DIN 51045)

Infine è fornita una breve analisi chimica che riporta la percentuale di peso degli ossidi componenti il refrattario. In genere per refrattari silico-alluminosi si valuta la presenza di Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O .

Composizione chimica

Spesso usata come criterio per valutare la bontà di un refrattario in base al contenuto percentuale di $Al_2O_3+TiO_2$, la composizione chimica influenza fortemente le caratteristiche dei materiali refrattari. Avere un'elevata percentuale di allumina, ad esempio, comporta un aumento nella resistenza pirosopica e nella resistenza meccanica a caldo; la presenza di fondenti come Na_2O o K_2O invece favoriscono la formazione di una fase vetrosa nel refrattario già a temperature inferiori ai $1000^\circ C$, con la conseguente caduta nelle proprietà meccaniche, soprattutto a caldo. Impurezze come CaO o Fe_2O_3 possono reagire con SiO_2 o addirittura favorire reazioni con il materiale con cui il refrattario entra in contatto.

Massa volumetrica

Risente del tipo di materie prime utilizzate per il refrattario, del sistema di formatura scelto, della cottura e della porosità. Per i refrattari di silice è anche indicativa del grado di trasformazione del quarzo.

Prodotti pressati presentano un valore di peso volumetrico più elevato di quelli ottenuti per colata, comunque entrambi di un ordine di grandezza più grande dei refrattari isolanti ottenuti da fibre ceramiche.

Bassi valori di peso volumetrico, e quindi elevata porosità, hanno ripercussioni positive sul potere isolante e sulla resistenza agli sbalzi termici, mentre generalmente comportano un decadimento della resistenza meccanica e della resistenza all'attacco chimico

Resistenza a flessione e compressione

I refrattari, come la maggior parte dei materiali ceramici, resistono meglio a sforzi compressivi di quanto non resistano a sforzi trattivi (ad esempio dovuti a flessione).

La resistenza a flessione, oltre che della composizione chimica, risente grandemente della temperatura del materiale.

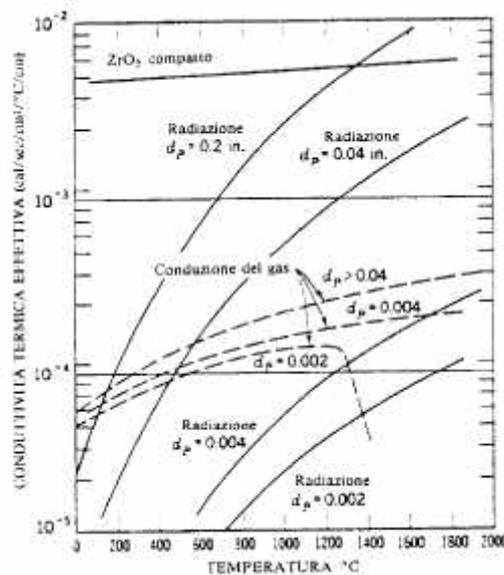
Conducibilità termica

Rappresenta il flusso di calore che attraversa un materiale creando un gradiente termico ed è un dato fondamentale per eseguire i calcoli termotecnici necessari alla progettazione delle murature dei forni.

Essa è fortemente dipendente dalla temperatura, dal tipo di materiale, dal tipo di porosità e dal rapporto fasi cristalline/fasi vetrose. La presenza di fase amorfa infatti implica un andamento crescente della conducibilità in funzione della temperatura, mentre le fasi cristalline inducono un andamento decrescente.

Una formula empirica proposta da Kingery, che tenga conto delle caratteristiche del materiale (indice di rifrazione n ed emissività ϵ) e della sua struttura (diametro dei pori d , supposti sferici), oltre che delle condizioni di impiego (Temperatura T), è la seguente, in cui σ è la costante di Stefan-Boltzmann:

$$K_{\text{effettiva}} = 4dn^2\sigma\epsilon T^3$$



Dipendenza della conducibilità termica effettiva da T e d

La conducibilità termica risulta minima per prodotti poco densi quali i materiali ceramici fibrosi, fatto che, da un punto di vista puramente termotecnico, li candida come componenti ottimali per l'isolamento.

Dilatazione termica reversibile

Questo dato è di importanza fondamentale per la progettazione dell'isolamento di un forno, dal momento che consente di calcolare i giunti di dilatazione necessari affinché la muratura non presenti discontinuità (aperture) né sia eccessivamente in compressione a causa delle tensioni che potrebbero insorgere qualora le dilatazioni termiche non fossero libere di manifestarsi.

Questa grandezza risente della composizione chimica e mineralogica del materiale; dipende inoltre dal ciclo di cottura cui è stato sottoposto e dalla presenza di silice libera.

La dilatazione termica influenza anche la resistenza allo shock termico, nel senso che se le dilatazioni termiche sono minime, la variazione dimensionale tra due facce di un solido poste a due temperature diverse sarà tale da non indurre nel materiale sforzi di trazione superiori alla sua tensione di rottura.

Altre proprietà

Sebbene non siano spesso indicate dai produttori, i quali si riservano di fornire personalmente notizie ai possibili acquirenti, altre proprietà rivestono un ruolo importante nella scelta del materiale per l'isolamento. Ad esempio, come detto in precedenza, gli isolanti fibrosi permetterebbero di progettare pareti di ingombro minimo in grado di resistere a temperature superiori ai 1500°. Tuttavia proprio la caratteristica delle fibre di avere un'elevata area superficiale ed un'altissima permeabilità ai gas conferisce loro una scarsa *resistenza alla corrosione* (anche le scarse proprietà meccaniche ne limitano l'uso in prossimità di bruciatori veloci, che creano un flusso turbolento di gas caldi). Un altro aspetto talvolta trascurato è la *resistenza al creep* dei materiali refrattari: la presenza di fasi vetrose e di porosità provoca infatti uno scorrimento a caldo del materiale, con conseguente deformazione plastica, anche di elevata entità qualora si operi in atmosfera riducente e con refrattari silico-alluminosi.

Nel caso di forni elettrici, poi, può interessare la *resistività elettrica*, grandezza fortemente influenzata da porosità e temperatura. Aumenti di temperatura possono far passare un refrattario da uno stato non conduttivo ad uno conduttivo.

TRASFORMAZIONI DEI REFRAZZARI DURANTE L'IMPIEGO

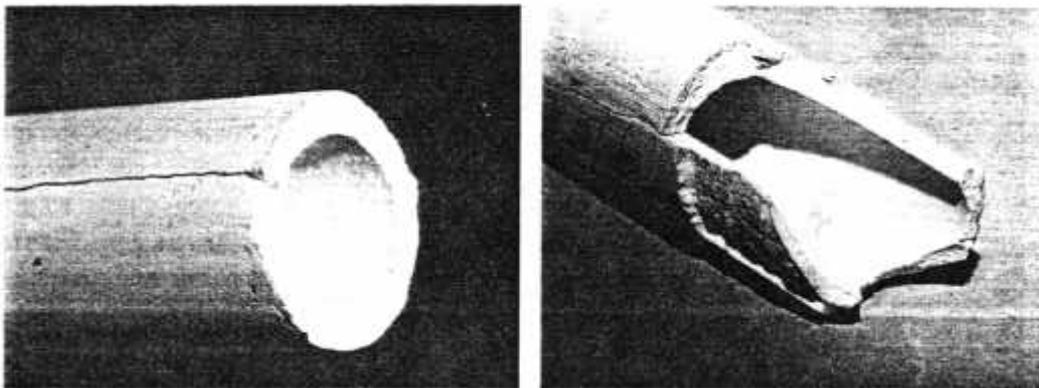
L'esposizione ad elevate temperature, ad atmosfere riducenti o ossidanti, il contatto con impurezze o fondenti sono tutti fattori che contribuiscono all'alterazione delle proprietà dei refrattari durante l'impiego. Non tutte le trasformazioni hanno però carattere distruttivo : ad esempio la formazione di un sottile strato sinterizzato sulla superficie del refrattario altera minimamente le caratteristiche del refrattario, oppure una dilatazione termica entro i limiti di reversibilità (ovvero che non comporti deformazioni permanenti dovute al rammollimento della fase vetrosa) non compromettono la funzionalità del prodotto.

Ai fini di un'accurata progettazione bisogna invece evitare, quando possibile, che i materiali impiegati subiscano trasformazioni distruttive, generalmente causate da sollecitazioni termomeccaniche (abrasione, urti, creep, shock termico) o da reazioni di corrosione. Per quanto riguarda quest'ultimo fenomeno, il contatto con fondenti e vapori corrosivi è causa dell'insorgere di nuove fasi aventi minore resistenza alle alte temperature o scarsa resistenza meccanica. Il danno , partendo dalla superficie esterna, si estende al corpo del refrattario con una velocità che segue un andamento esponenziale con la temperatura, da qui la necessità di non superare mai, neppure per tempi brevi, la temperatura di classificazione del refrattario.

Per quanto concerne fenomeni di corrosione, per refrattari silico-alluminosi bisogna prestare attenzione ad evitare contatti con ossidi alcalini (formazione di eutettici), di calcio e di piombo. Non sempre questo è possibile nei forni adibiti alla cottura di prodotti smaltati, in cui ad esempio il piombo ossido può essere anche il 70% in peso della frittta.

In tal caso, l'impiego di un refrattario poco poroso, e quindi meno permeabile e con una minore superficie disponibile per le reazioni distruttive, sebbene meno isolante, può allungare notevolmente la vita di una muratura. Come già accennato, in questo caso l'utilizzo di fibre ceramiche direttamente esposte all'ambiente corrosivo è una scelta da sconsigliare, mentre nulla impedisce di impiegarle in secondo strato, protette da un primo strato di materiale denso scarsamente permeabile.

Anche la supporteria (rulli, piastre,...) refrattaria esposta ad ambienti corrosivi è soggetta ad alterazioni; ad esempio, le sostanze alcaline fanno sì che la zona reagita abbia un coefficiente di dilatazione lineare maggiore della zona non intaccata, con conseguente minore resistenza agli shock termici, sfogliatura della superficie e rottura. In un prodotto come i rulli, poi, la formazione di nuove fasi sulla superficie, qualora si accompagnata da variazioni di volume, è causa di scabrosità che compromettono la rettilineità del rullo e quindi la sua capacità di fare avanzare il prodotto senza sobbalzi.



Fenomeni di corrosione in due rulli a base di allumina

SCelta DEL REFRAttARIO

La scelta del refrattario non può prescindere dall'esame delle condizioni di esercizio, dalla valutazione dei costi e da considerazioni relative alla sicurezza per gli operatori.

Le condizioni di esercizio sono identificate da:

- Temperatura
- Atmosfera del forno
- Tipo di combustibile
- Sollecitazioni meccaniche
- Sbalzi termici
- Necessità di isolamento termico o permeabilità ai gas
- Funzionamento continuo o intermittente

Nella tabella seguente sono riportate indicazioni di massima relative a quali caratteristiche (prima colonna) richieste ad un refrattario affinché offra adeguata resistenza alle condizioni riportate nella prima riga :

	sollecitaz. meccaniche	attacco chimico	sbalzi termici	termo pressione	alte temp.	ambiente riducente	isolam. termico
PESO VOLUM.	ALTO	ALTO	basso	ALTO			basso
RES.COMPRESS.	ALTO	ALTO	ALTO	ALTO			
POROSITA'	basso	basso	ALTO	basso			ALTO
ALLUMINA		ALTO	ALTO	ALTO	ALTO	ALTO	
OSSIDO DI Fe				basso	basso	basso	
FONDENTI	ALTO		basso	basso	basso		

-Influenza di alcune caratteristiche del refrattario sulle proprietà di resistenza -

Come si può notare, raramente un solo tipo di refrattario è in grado di soddisfare le esigenze del progettista, dal momento che il rispetto di certi requisiti va a scapito di altre proprietà, magari imprescindibili per l'applicazione.

Nasce così l'esigenza di mediare tra le differenti proprietà e di rinunciare all'utilizzo di un unico prodotto per realizzare le murature. Si parla quindi di pareti composite, nel senso che sono formate da materiali aventi proprietà differenti. Così per avere uno strato che resista alla corrosione ma che contemporaneamente abbia buone proprietà isolanti, può essere utile accoppiare un materiale denso, che resiste a corrosione ma non ha ottime caratteristiche isolanti, con un materiale fibroso che ha proprietà complementari.

Per quanto riguarda i costi, bisogna considerare che un isolamento leggero, e magari più costoso della tradizionale muratura, si traduce in una riduzione delle perdite di energia attraverso le pareti, ed in definitiva in un risparmio di combustibile. Per stimare la convenienza o meno di un isolamento, bisognerà quindi confrontare i costi del combustibile con quelli dei materiali da utilizzare, stimando una vita prevista per l'impianto o basandosi sul tempo di ammortamento.

Nella consueta pratica industriale, si ha a che fare con pareti composite, formate da tre o più strati. In questo caso i calcoli risultano relativamente complessi a causa del fatto che le variabili in gioco non sono indipendenti. Ad esempio, una variazione di spessore in uno strato si ripercuote come variazione delle temperature medie di tutti gli strati componenti la parete, con la conseguenza che anche i rispettivi valori di conducibilità termica vengono modificati, a loro volta influenzando la temperatura dei singoli strati. La risoluzione del problema dell'ottimizzazione dello spessore, dal

punto di vista dei costi, si presta quindi ad un procedimento di calcolo iterativo, una volta che si siano fissati i valori di alcune variabili.

Un ulteriore vincolo da porre è lo spessore massimo ammissibile per le pareti, dal momento che un aumento della loro dimensione, a parità di ingombro totale del forno, si manifesta come diminuzione della larghezza utile della macchina, abbassandone drasticamente la produttività. D'altra parte uno spessore esiguo di isolante può essere causa di malfunzionamenti (profili trasversali di temperatura non omogenei) oltre che di pericolo per gli operatori (elevata temperatura sulla parete esterna, cedimenti qualora le resistenze meccaniche non fossero sufficienti). Alla luce di questi fattori, in prima approssimazione si può concentrare l'attenzione sulle caratteristiche tecnologiche dell'isolamento, usando i dati relativi ai costi di installazione e di esercizio come parametri per la valutazione delle soluzioni proposte piuttosto che come vincoli di progetto.

Non bisogna infine dimenticare che le fibre ceramiche sono ritenute potenziali agenti cancerogeni, quindi si deve evitare la loro presenza libera negli ambienti di lavoro. Spesso queste tipologie di prodotti sono accompagnati da una scheda che descrive le misure di sicurezza da adottare per il loro impiego e smaltimento.

CALCOLO TERMICO

La trasmissione del calore tra due corpi può avvenire con tre diverse modalità : conduzione, convezione e irraggiamento. Solo il secondo tipo è legato ad un trasferimento di materia, mentre per le rimanenti modalità ciò non è necessario.

Per quanto riguarda la *conduzione*, la quantità di calore trasferita è espressa dalla legge di Fourier, che, nell'analogia elettro-termica, si presenta nella comoda forma

$$Q = \frac{\Delta T}{\sum R_t}$$

dove T rappresenta la temperatura, R_t la resistenza termica e Q la quantità di calore trasferita per m^2 .

Q risulterà espresso in W/m^2 o $kcal/m^2h$ a seconda della unità di misura scelta per la resistenza termica. Si ricorda che nel caso di parete piana il valore di R_t è dato da d/λ in cui d è lo spessore della parete e λ la conducibilità termica (espressa in W/mK o $kcal/mhK$).

Per quanto riguarda la *convezione*, essa può essere naturale o forzata, nel caso in cui lo spostamento di materia sia indotto artificialmente. La quantità di calore trasmessa per convezione può essere espressa nella forma

$$Q = \alpha (T_p - T_f)$$

dove T_p è la temperatura della parete affacciata sul fluido a temperatura T_f e α , coefficiente di convezione, assume valori diversi a seconda delle modalità del moto convettivo. Per pareti piane orizzontali e verticali sono state proposte in letteratura varie formule di α :

$1,45 \sqrt[4]{T_p - T_f}$	nel caso di pareti verticali
$1,85 \sqrt[4]{T_p - T_f}$	nel caso di pareti orizzontali con flusso verso l'alto
$1,10 \sqrt[4]{T_p - T_f}$	nel caso di pareti orizzontali con flusso verso il basso (fondo)
$1,50 \sqrt[4]{T_p - T_f}$	nel caso di pareti verticali senza ostacoli intorno
$2,10 \sqrt[4]{T_p - T_f}$	nel caso di volta di forno

Tali formule per α (valide nelle unità di misura del sistema internazionale) danno origine a valori molto simili a quelli ottenibili dalla formula proposta dalla ASTM :

$$h_c = 0,53 C (1/T_{avg})^{0,18} \Delta T$$

dove h_c è il calore disperso per convezione in $Btu/h ft^2$, C è una costante che dipende dalla geometria del problema (1,39 per pareti verticali; 1,79 per la volta di un forno), T_{avg} è la temperatura media espressa in °R (°F+460) e ΔT è la differenza di temperatura in °F tra superficie esterna e fluido circostante. Da notare che la ASTM non dà valori di C per le pareti orizzontali di fondo.

Altre formule proposte da autori americani (Nelson e Maxwell) sono formalmente uguali alla formula precedente, ma forniscono diversi valori per la costante C :

- 1,3 ; 1 ; 0,7 sono i valori proposti da Nelson rispettivamente per parete orizzontale superiore, parete verticale e fondo.
- 2 ; 1,3 ; 1,2 sono i corrispondenti valori indicati da Maxwell.

Nel caso di convezione forzata la ASTM propone per grandi superfici piane la formula

$$h_c = (1+0,225v) \Delta T$$

in cui v è la velocità del fluido in ft/s.

Nelle unità del sistema internazionale tale formula diventa

$$Q = (4,882+3,604 v) \Delta T$$

Una formula alternativa spesso usata nella pratica per la convezione forzata è

$$Q = 6,112 v^{0,775} + 4,41 e^{-0,6v} .$$

Infine, per quanto riguarda l'*irraggiamento*, si valuta la quantità di calore irraggiato mediante la legge di Stefan Boltzmann:

$$Q = 5,67 \varepsilon \left[\left(\frac{T_p}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_e}{100} \right)^4 \right]$$

dove ε è il coefficiente di radiazione o di assorbimento rispetto al corpo nero.

In realtà la formula precedente deve essere modificata per tenere conto del fattore di vista tra gli elementi irraggianti. In pratica, per pareti piane, si moltiplica il tutto per 0,86.

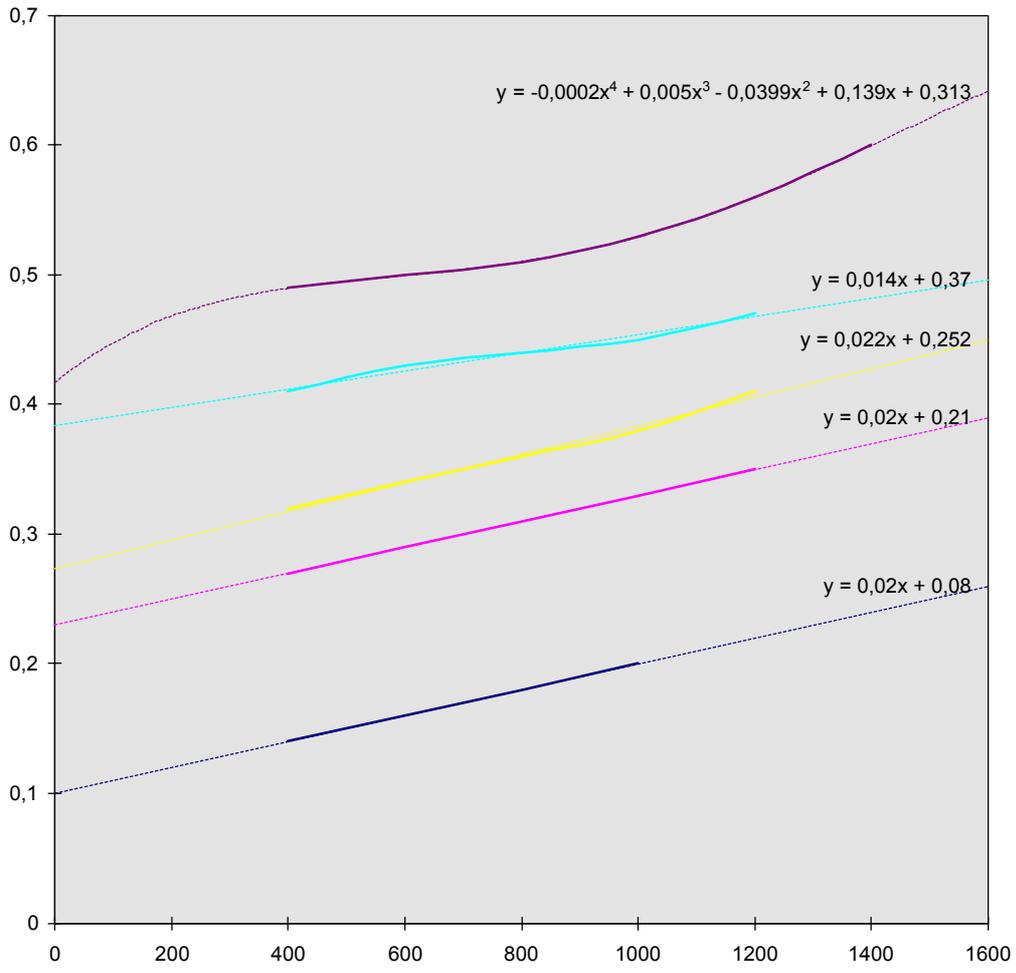
L'errore legato a questa approssimazione è ammissibile poiché si deve considerare che l'impiego di bruciatori veloci di fatto massimizza il contributo convettivo, rendendo meno rilevanti i contributi conduttivi e di irraggiamento.

La quantità di calore trasmessa con questi tre modi e calcolata con le formule precedenti ha un valore corretto solo nel caso di sistema in equilibrio; prima del raggiungimento della condizione di regime, si avranno delle quantità di calore disperso inferiori a causa dell'assorbimento termico, che è definito in modo pratico come il prodotto tra massa, calore specifico medio e temperatura media del corpo, da parte degli elementi costituenti le murature.

In regime stazionario il calcolo delle perdite di calore attraverso le pareti dei forni non presenta grandi difficoltà e può essere svolto in breve tempo con l'ausilio di semplici algoritmi. Alcuni problemi sorgono solamente nella determinazione della conducibilità di ogni parete, dal momento che essa varia al variare della temperatura, e la temperatura media della parete è una delle incognite del problema. Conviene quindi ipotizzare certe temperature di parete, individuare in base ad esse le conducibilità, svolgere il calcolo e confrontare le temperature ottenute con quelle ipotizzate, e ,in caso di sensibile discrepanza, ripetere il calcolo servendosi delle conducibilità termiche corrispondenti alle temperature calcolate nel passaggio precedente. In genere dopo 3 o 4 iterazioni non si hanno più discrepanze e il calcolo può ritenersi concluso.

I dati relativi alla conducibilità dei vari materiali sono in genere tabulati dai produttori di refrattari solo per alcune temperature, quindi a volte può succedere di dovere interpolare o estrapolare i valori di interesse; a tale scopo risulta utile disporre di grafici con l'andamento della conducibilità in funzione della temperatura come il seguenti :

Conducibilità (W/mK)



ESERCITAZIONE

Calcolo termico di pareti isolanti e utilizzo dei cataloghi

Si consideri un forno a rulli adibito alla cottura di gres porcellanato. Esso può idealmente essere diviso in tre zone:

- *Preriscaldamento* : grazie al calore fornito dai gas caldi provenienti dalla zona di cottura, avvengono reazioni di ossidazione, si elimina H₂O, iniziano reazioni di decomposizione dei carbonati; la temperatura nella parete interna del forno arriva fino a 800°C
- *Cottura* : grazie alla presenza di bruciatori sopra e sotto il piano dei rulli, si completano le reazioni iniziate nella zona precedente e hanno luogo ulteriori reazioni che portano ad un'elevata densificazione del pezzo. La temperatura raggiunge i 1350°C sulla parete interna del forno
- *Raffreddamento*: per effetto di aria fredda soffiata sul pezzo, si procede ad un raffreddamento prima rapido e poi graduale del pezzo; la temperatura nella zona di raffreddamento "lento" si stima essere di 400°C

A causa delle diverse temperature e funzioni delle tre zone del forno, l'isolamento delle pareti dovrà per ognuna presentare caratteristiche differenti. Compatibilmente con i costi del materiale da impiegare, si desidera che l'ingombro dell'isolamento sia minimo. Lo spessore dell'isolamento infatti condiziona grandemente la capacità produttiva del forno, dal momento che lo spazio occupato da refrattari ed isolanti va a scapito dello spazio utilizzabile per la cottura dei pezzi.

Generalmente le pareti laterali dei forni sono costituite da più strati di refrattari ed isolanti, scelti in base alle temperature medie cui sono sottoposti. Per semplicità, in questo esercizio si considerano pareti costituite al massimo da tre materiali differenti.

Per quanto riguarda la scelta dei materiali, a prescindere dal costo, essa è da effettuare in base a considerazioni su:

1. temperatura di utilizzo
2. resistenza all'atmosfera presente nel forno
3. conducibilità termica
4. densità
5. coefficiente di dilatazione lineare

Tuttavia, in prima approssimazione, può essere sufficiente considerare i soli aspetti termici, ovvero servirsi della conducibilità come criterio per la scelta del materiale più idoneo all'applicazione. A tale proposito si ricorda che per calcolare le temperature di parete bisogna considerare fenomeni di conduzione, convezione e irraggiamento.

Per semplicità verranno trascurati gli effetti di convezione e irraggiamento

Per quanto riguarda la conduzione, la quantità di calore trasferita è espressa dalla legge di Fourier, che, nell'analogia elettrotermica, si presenta nella comoda forma

$$Q = \frac{\Delta T}{\sum R_i}$$

Si ricorda inoltre che Q , trascurando le perdite, è lo stesso per ogni strato costituente la parete; questo permette, calcolato Q , di ricavare le temperature di ogni strato.

Si vuole realizzare un isolamento,

- 1) per la zona di massima temperatura del forno, di ingombro minore di 45 cm.*
- 2) per la zona di preriscaldamento, di ingombro minore di 30 cm*
- 3) per la zona di raffreddamento rapido, di ingombro minore di 35 cm*

Considerando una temperatura di

- 1) 1350°C*
- 2) 800°C*
- 3) 1000°C*

sulla parete interna e richiedendo che per la sicurezza del personale si abbia una temperatura inferiore ai 70°C sulla parete esterna, dimensionare la parete del forno utilizzando al massimo tre strati di materiale differente da scegliersi dai cataloghi dei fornitori.

Dove conviene usare i mattoni refrattari e dove invece si può ricorrere ai fibrosi ?

(Si ricorda che l'energia immagazzinata in un materiale, oltre che dalla temperatura, dipende dal calore specifico e dalla massa)

**Dati di esercizio e
composizione parete**

T_i (°C) 1350,00 T_e (°C) 20,00 α_i 100,0000 α_e 10,0000 ϵ 0,6000

	PARETE 1	PARETE 2	PARETE 3	PARETE 4	PARETE 5
tipo	Jm26	WDS HT	Swool blkt LT		
spessore (m)	0,2300	0,0200	0,0500	0,0000	0,0000
temp. di riferim. (°C)	1100,0000	700,0000	300,0000	0,0000	0,0000
conducibilità (W/m°K)	0,3400	0,0390	0,0700	0,0000	0,0000
densità (kg/m3)	780,0000	300,0000	128,0000	0,0000	0,0000
cal specifico (kJ/kg°K)	1,1000	1,0000	1,0500	0,0000	0,0000
S/λ. (m ² °K/W)	0,6765	0,5128	0,7143	0,0000	0,0000

K_{tot} **0,4966 (W/m²°K)** $1/K_{tot}$ (m²°K/λ) 2,0136
Q/S (perdite) 660,5161 (W/m²)

Temp. di parete	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
	1343,39	896,58	557,85	86,05	86,05	86,05
Temp. medie	T _{m1}	T _{m2}	T _{m3}	T _{m4}	T _{m5}	
(per determinare λ)	1119,98	727,21	321,95	86,05	86,05	
Errore assoluto	-19,9850	-27,2120	-21,9502	-86,0516	-86,0516	

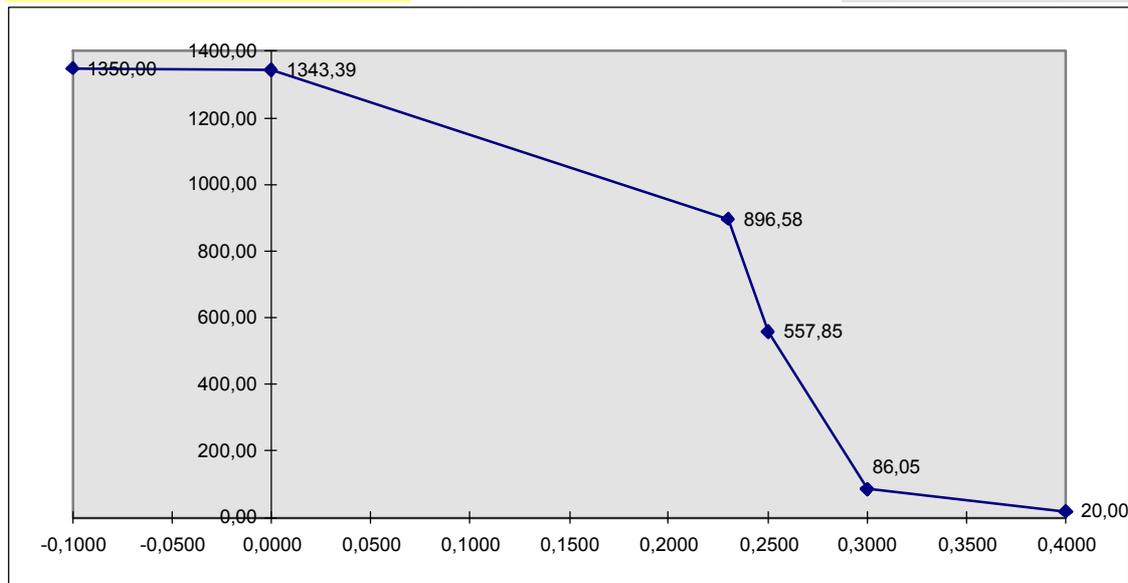
Energia accumulata a regime (KWh/m ²) (kcal/m ²)	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E _{tot}
	60,2975	1,1787	0,5636	0,0000	0,0000	62,0398
	51855,86	1013,67	484,73	0,00	0,00	53354,26

**Verifica dispersioni
parete-esterno (Q/S)**

T parete	T esterno	Vel aria (m/s)	Lungh. (m)	Temp (°C)
86,05	20,00	2,0000	-0,1000	1350,00
			0,0000	1343,39
			0,2300	896,58
			0,2500	557,85
			0,3000	86,05
			0,3000	86,05
			0,3000	86,05
			0,4000	20,00

α_e calcolato in :

	Aria ferma	Err. % su α _e
fondo	8,4143	-18,8460
parete	9,7402	-2,6671
volta	11,7292	14,7425
	<u>Aria mossa</u>	
	18,4737	45,8691



ESERCITAZIONE

Per aumentare la produttività di un forno a rulli, oltre a ridurre l'ingombro dello strato isol-refrattario, si rende necessario allargare la sezione utile del forno stesso. I rulli, tuttavia, sono schematizzabili in prima approssimazione come travi su due appoggi, per cui bisogna prestare molta attenzione nel dimensionamento, soprattutto considerando il rapido decadimento delle resistenze meccaniche a caldo dei materiali impiegati.

Consultando i cataloghi di produttori di rulli, si chiede di individuare una larghezza ottimale per il forno, a seconda che esso sia da dedicare prevalentemente alla cottura di grandi formati o di piccoli formati. Tale larghezza è definita ottimale quando lo spazio occupato dal materiale in cottura è pressochè pari a quello disponibile del tappeto dei rulli.

Prestare attenzione ad alcuni importanti fattori:

- *ritiro in cottura*
- *profili trasversali di temperatura nel forno*
- *geometria dei rulli*
- *resistenza allo shock termico dei rulli*
- *costi di installazione e di manutenzione*

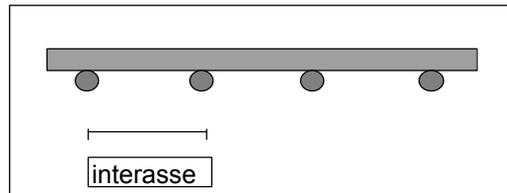
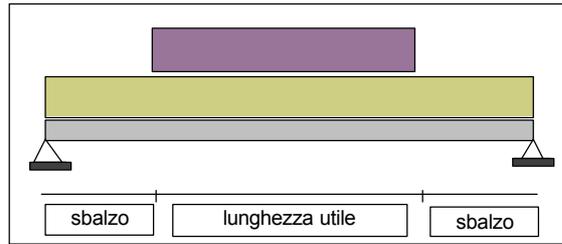
Commentare.

Rulli per forni di trattamento termico di materiali ceramici :
sollecitazioni e deformazioni flessionali

RULLO	Kormullit
Raggio esterno (cm)	4
Raggio interno (cm)	3
Lunghezza (cm)	400
Densità (kg/cm ³)	0.0023
Modulo elastico (N/mm ²)	40000
Peso proprio (kg)	20.23186
Carico distribuito (Kg/cm ²)	0.05058
Momento di inerzia (cm ⁴)	137.4447
Modulo di resistenza (cm ³)	34.36117

MATERIALE	
Larghezza in secco(cm)	60
Lunghezza in secco (cm)	60
Spessore in secco (cm)	1
Volume in secco (cm ³)	3600
Densità (kg/cm ³)	0.001
Peso piastrella (kg)	3.6

GEOMETRIA DEL CARICO	
Lunghezza utile (cm)	340
Sbalzo (cm)	30
Interasse tra rulli (cm)	8
N° di rulli caricati da 1 pz	7
N° pz per ogni fila	4
Peso di una fila (kg)	14.4
Carico distribuito (kg/cm ²)	0.00605



MOMENTI IN MEZZERIA	
Dovuto al peso proprio (kg cm)	1011.593
Dovuto al carico (kg cm)	120.9176
Totale (kg cm)	1132.51

TENSIONI IN MEZZERIA	
Dovute al peso proprio (kg/cm ²)	29.44
Dovute al carico (kg/cm ²)	3.51902
Totali (kg/cm²)	32.95902

FRECCE IN MEZZERIA	
Modulo elastico (kg/cm ²)	408163.3
Dovute al peso proprio (cm)	0.300533
Dovute al carico (cm)	0.034983
Totali (cm)	0.335517