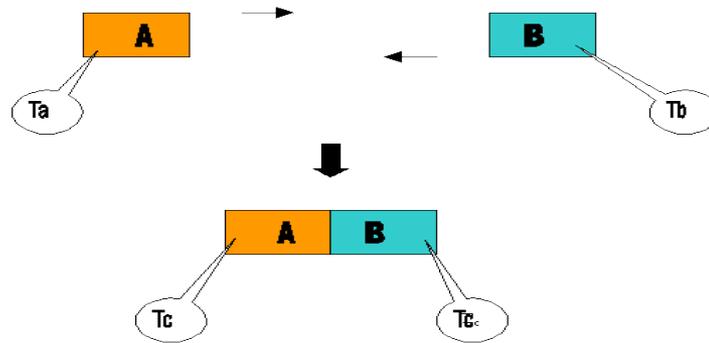


# Calcolo della temperatura dei materiali adiacenti

UNI EN 15287-1

**Relatore:** geom. Sandro Bani  
Vice presidente fumisti ANFUS  
Responsabile Anfus Lombardia  
Consulente Impianti Fumari

# Scambio termico

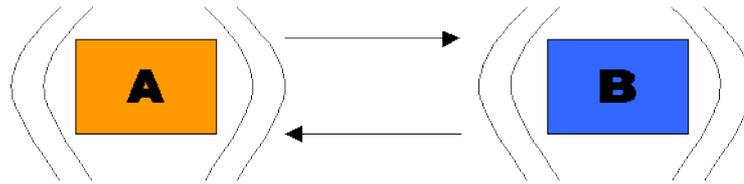


- Ponendo 2 corpi a contatto di temperatura diversa si verifica una trasformazione di energia finché raggiungeranno una temperatura intermedia .
- Dal punto di vista della **termodinamica** il tempo impiegato da questo fenomeno è irrilevante, in quanto la termodinamica studia gli stati e non i processi; quindi il fatto che il processo abbia impiegato diversi tempi non cambia il risultato termodinamico.
- Invece la **Termocinetica** si occupa dello scambio di energia tra i sistemi ma **con grande interesse per il tempo**, lo scopo è quantificare i tempi necessari ai trasferimenti di energia. Non parleremo quindi più di **quantità di calore**, ma di **potenze**, cioè di **calore trasferito nell'unità di tempo**. La velocità di scambio di calore diventa quindi il parametro su cui puntare la nostra attenzione.
- In certe situazioni vogliamo massimizzare lo scambio termico, mentre in altre situazioni non vogliamo che i corpi scambino calore e quindi dobbiamo trovare soluzioni che minimizzino questa potenza termica scambiata

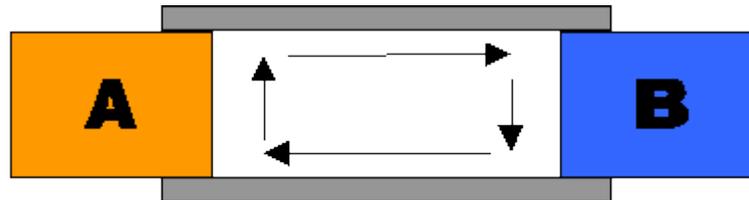
# Modalità di scambio termico

- In generale lo scambio termico può avvenire secondo 3 modalità:
- Conduzione
- Convezione
- Irraggiamento
- Sono schematizzazioni concettuali, per cui talvolta se ne verificano due o tutte contemporaneamente.
- Nel caso in cui i due corpi siano a diretto contatto, **conduzione**, l'uno con l'altro abbiamo un trasferimento diretto che coinvolge il regime vibrazionale delle molecole dei solidi o liquidi, nel senso che le molecole del corpo più caldo vibrano di più e trasferiscono questa loro energia vibrante per contatto diretto alle molecole del corpo più freddo, che stavano inizialmente vibrando di meno.
- Il fenomeno della **convezione** invece si ha quando i 2 corpi non sono a contatto diretto fra loro, ma per esempio può esservi l'aria fra di loro. Se l'aria sta ferma, possiamo avere uno scambio per conduzione (vedi punto 1). Se l'aria è in movimento abbiamo uno scambio convettivo, poiché il trasporto è aumentato dal fatto che le particelle calde dell'aria portano energia al corpo freddo e in seguito tornano indietro a prelevare altra energia dal corpo caldo: si crea quindi un fenomeno di circolazione convettiva.
- 
- Abbiamo infine lo scambio termico per **irraggiamento**, fenomeno che non richiede la presenza di un mezzo perché vi sia scambio di energia.
- Ogni corpo con temperatura superiore allo 0 assoluto cioè  $-273^{\circ}\text{C}$  rilascia radiazioni in modo proporzionale rispetto alla temperatura elevata alla quarta potenza.
- Questa emissione può essere costituita da onde radio, luce, infrarosso, ultravioletto, raggi X, raggi g , raggi cosmici.





- I 3 fenomeni di scambio termico che sono sostanzialmente indipendenti, ma che possono anche essere sovrapposti. Se i due corpi si "vedono" attraverso un mezzo trasparente avremo uno scambio termico per irraggiamento e simultaneamente per convezione (attraverso l'aria); se poi le pareti solide che chiudono la cavità posta tra i due corpi sono costituite da due pareti metalliche posso avere anche scambio termico per conduzione



# La conduzione e la legge di Fourier

La legge si enuncia così e definiremo ogni termine della relazione, evidenziandone la sua intuibilità.



$$\dot{Q} = \frac{\lambda \cdot S}{s} (T_{\text{int}} - T_{\text{est}})$$

- Relazione che vale per parete piana indefinita di superficie  $S$  e spessore  $s$ .
- Intuitiva perché?
- Perché da che cosa potrà dipendere  $Q$ , ovvero la quantità di calore che fluisce attraverso la parete in un secondo ( quel punto sopra il  $Q$  sta proprio ad indicare il calore fluente in un secondo)
- Dipenderà da:
  - sarà tanto più grande quanto più grande il salto di temperatura tra l'esterno e l'interno
  - ancora tanto più grande quanto più grande la superficie a disposizione dello scambio
  - tanto più piccola quanto più grande lo spessore della parete ( va infatti il termine  $s$  a dividere nella formula )
- ed infine dipenderà dalla natura del materiale, un materiale può essere più o meno predisposto a condurre il calore sintetizzato dal coefficiente  $\lambda$  che si chiama coefficiente di trasmissione.

Dalla relazione di Fourier si possono ricavare le unità di misura del coefficiente di conduzione

$$\lambda = \frac{\dot{Q} \cdot s}{S \cdot \Delta T} \qquad \lambda = \frac{KW \cdot m}{m^2 \cdot ^\circ C} = \frac{KW}{m \cdot ^\circ C}$$

$\dot{Q}$

Quantità di calore che passa al secondo Kw, W, Kcal/h

$\lambda$

Coefficiente di conduzione del materiale ( proprietà tipica dei materiali)

$S$

Superficie in metri quadri

$s$

Spessore in metri

$T_{int}$

Temperatura interna in gradi centigradi

$T_{est}$

Temperatura esterna in gradi centigradi

$\Delta T$

Differenza tra la temperatura interna e quella esterna in gradi centigradi

Legge di Fourier

$$\dot{Q} = \lambda \frac{S}{s} (T_{int} - T_{est})$$

Tutti termini radunati nell'unica costante C assumono il nome di : **Conduttanza termica**

$$\lambda \frac{S}{s} = C$$

$$\dot{Q} = C (T_{int} - T_{est})$$

Se mettiamo in risalto il salto di temperatura anziché la potenza termica passante  
La relazione diventa:

$$(T_{int} - T_{est}) = \Delta T = \frac{1}{C} \dot{Q}$$

Dove il fattore 1/C rappresenta un **evidente ostacolo** al passaggio di calore poichè fissato  
determina il salto di temperatura esistente.  
In qualità di ostacolo tale fattore viene chiamato **resistenza**:

$$R = \frac{s}{\lambda \cdot S}$$

LA RESISTENZA =  $R = \frac{1}{C}$

$$\dot{Q} = C \Delta T$$

$$\Delta T = R \dot{Q}$$

$\dot{Q}$

# La formula della UNI EN 15287

- Nelle realtà pratiche quasi sempre gli ostacoli al passaggio del calore si trovano uno dopo l'altro (ad esempio camino, isolante, aria, cavedio e mondo esterno) o come si dice tecnicamente si trovano in serie.
- Lasciando perdere la dimostrazione, rimane intuitivo che in questo caso l'ostacolo complessivo è fornito dalla somma di tutti gli ostacoli parziali, ovvero:
- $R_{tot} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$
- Nelle resistenze in serie come ci ricorda l'analogia elettrica ogni resistenza è attraversata dalla stessa corrente, nel nostro caso la stessa quantità di calore al secondo attraversa ogni ostacolo.
- Pertanto la legge che useremo sarà:

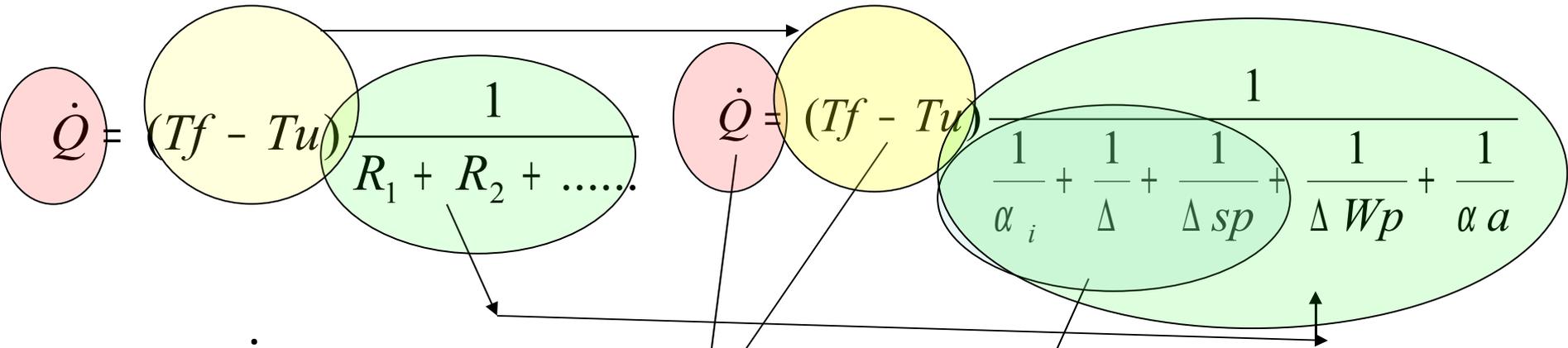
•  $\Delta T = R \dot{Q}$  (Legge di Ohm)

- La legge vale (poiché l'attraversante è sempre lo stesso) sia per ogni singola resistenza, sia per la resistenza complessiva sia per un sottogruppo qualsiasi di resistenze.
- Conoscendo la temperatura interna ed esterna e tutte le resistenze in serie possiamo determinare  $\Rightarrow$

$$\dot{Q} = (T_{int} - T_{ext}) \frac{1}{R_1 + R_2 + \dots}$$

la conoscenza di  $\dot{Q}$

permette di determinare la temperatura in qualsiasi punto richiesto, alla normativa UNI EN 15287-1 interessa in particolare la parete interna del cavedio.



Con questo  $\dot{Q}$  si può calcolare il **salto di temperatura delta T su una qualsiasi resistenza** o gruppo di resistenze, a noi interessa dall'interno del camino fino alla superficie interna del cavedio

$$\Delta T = \dot{Q} \left( \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\Delta} + \frac{1}{\Delta_{sp}} \right)$$

$$\Delta T = \dot{Q} \left( \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\Delta} + \frac{1}{\Delta_{sp}} \right)$$

La temperatura della parete interna del cavedio sarà data da:

$$T_{wp} = T_f - \Delta T$$

$$T_{wp} = \left( T_f - \dot{Q} \left( \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\Delta} + \frac{1}{\Delta_{sp}} \right) \right)$$

$$T_{wp} = T_f - \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\Delta} + \frac{1}{\Delta_{sp}} + \frac{1}{\Delta_{wp}} + \frac{1}{\alpha_a}} (T_f - T_u) \left( \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\Delta} + \frac{1}{\Delta_{sp}} \right)$$

Aggiungiamo la correzione per aumento della superficie verso l'esterno

$$\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\Delta} + \frac{1}{\Delta_{sp}} \frac{D_h}{D_{ha}}$$

$$T_{wp} = T_f - \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\Delta} + \frac{1}{\Delta_{sp}} \frac{D_h}{D_{ha}} + \frac{1}{\Delta_{wp}} \frac{D_h}{D_{ha} + 2x} + \frac{D_h}{(D_{ha} + 2x + 2d_{wp})}} (T_f - T_u)$$

**Calcolo della resistenza termica del materiale isolante disposto attorno ad un tubo**  
**EN 1859:2000**

$$\frac{1}{\lambda} = \sum \left[ \frac{D_{int}}{2\Lambda} \ln \left( \frac{D_{est}}{D_{int}} \right) \right] f$$

$\frac{1}{\lambda}$  Resistenza termica espressa in  $\frac{m^2 K}{W}$

$D_{int}$  Diametro interno del camino in m

$D_{est}$  Diametro esterno del camino (dopo il materiale isolante) in m

Ln logaritmo naturale

$\Lambda$  (Lambda grande) Conducibilità termica in  $\frac{W}{mK}$

# conducibilità termica di alcuni materiali

materassino in lana di roccia

temperatura d'esercizio 300 °c

conducibilità termica a:		W/(mxk)
50		0,036
100		0,043
150		0,05
200		0,059
300		0,079

materassino in fibra ceramica

temperatura d'esercizio 1200 °c

densità		64	96	128	160
conducibilità termica a:		W/(mxk)	W/(mxk)	W/(mxk)	W/(mxk)
°c	W/(mxk)	W/(mxk)	W/(mxk)	W/(mxk)	W/(mxk)
200	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05
400	0,1	0,09	0,08	0,08	0,07
600	0,18	0,14	0,12	0,12	0,11
800	0,27	0,22	0,18	0,18	0,17
1000	0,43	0,34	0,29	0,29	0,25

pannello in calcio silicato

temperatura d'esercizio 1000 °c

1100°c

conducibilità termica a:			
	densità	225	260
	W/(mxk)	W/(mxk)	W/(mxk)
200	0,06	0,07	
400	0,08	0,09	
600	0,1	0,1	

pannello in vermiculite pressata

temperatura d'esercizio 1100 °c

conducibilità termica a:				
	densità	700	600	375
	W/(mxk)	W/(mxk)	W/(mxk)	W/(mxk)
200	0,18	0,15	0,12	
400	0,19	0,17	0,15	
600	0,26	0,19	0,16	

# Equazione N1 (allegato N)

## UNI EN 15287-1 2007

$$t_{wp} = t_f - \frac{\frac{1}{\alpha_i} + \left(\frac{1}{\Lambda}\right) + \frac{D_h}{D_{ha}} \left(\frac{1}{\Lambda}\right)_{sp}}{\frac{1}{\alpha_i} + \left(\frac{1}{\Lambda}\right) + \frac{D_h}{D_{ha}} \left(\frac{1}{\Lambda}\right)_{sp} + \frac{D_h}{D_{ha} + 2 * x} \left(\frac{1}{\Lambda}\right)_{wp} + \frac{D_h}{(D_{ha} + 2x + 2d_{wp})\alpha_a}} (t_f - t_u)$$

$$t_{wp} = 700 - \frac{\frac{1}{15} + (0,6778) + \frac{0,3}{0,5}(0)}{\frac{1}{15} + (0,6778) + \frac{0,3}{0,5}(0) + \frac{0,3}{0,5 + 2 * 0}(0,029) + \frac{0,3}{(0,5 + 2 * 0 + 2 * 0,05)8}} (700 - 20) = 85,9181$$

# Equazione N1 (allegato N)

## UNI EN 15287-1 2007

**esempio per il calcolo della temperatura alla superficie interna del cavedio**

			in metri
tubo in acciaio inox AISI 316L		diametro	0,20
classificazione	T		600
isolamento	LANA CER	spessore cm	0,13
	ARIA	spessore cm	0,00
cavedio	cotto	spessore cm	0,05
temperatura alla parete int.cavedio			<b>86,55</b>

Equazione I2 (allegato N)  
UNI EN 15287-1 2007

$$t_{wp} = t_f - \frac{\frac{1}{\alpha_i} + \left(\frac{1}{\Lambda}\right)}{\frac{1}{\alpha_i} + \left(\frac{1}{\Lambda}\right) + \frac{D_h}{D_{ha}\alpha_a}} (t_f - t_u) - \Delta t$$

$$t_{wp} = 700 - \frac{\frac{1}{15} + 0,385}{\frac{1}{15} + 0,385 + \frac{30}{20 * 8}} (700 - 20) - 15 = 87,64$$

# Equazione I2 (allegato N)

## UNI EN 15287-1 2007

**esempio per il calcolo della temperatura alla superficie interna del cavedio con ventilazione naturale di almeno 40 mm**

		in metri	
tubo in acciaio inox AISI 316L		diametro	0,20
classificazione	T		600
isolamento	Lana ceramica	spessore cm	0,10
cavedio	ventilato sp 40 mm		
temperatura alla parete int.cavedio			<b>87,64</b>



Si è pensato di verificare i dati teorici con una prova sperimentale

-alla fine della sperimentazione ci si è resi conto di alcuni errori nella realizzazione e si è deciso di ripetere l'esperimento con alcuni accorgimenti.

- la prova è stata per molti versi interessante perchè ha potuto mostrare l'entità del problema trattato.

-si sono uniti 2 tubi in acciaio AISI 316 L in orizzontale più una curva a 90 gradi e un tubo di un metro verticale

- si è isolato il tubo orizzontale con vari materiali per verificare la temperatura esterna la normativa ci chiede di avere a contatto del materiale infiammabile non + di 85 °C quando dentro ne abbiamo 700.



abbiamo portato la temperatura interna a 700 °C , temperatura d'esercizio per classificare l'impianto fumario T600 e poi a 1000°C per simulare l'incendio da fuliggine.

- i dati ottenuti con gli isolanti usati sono stati di 10-15% inferiori al calcolo teorico dimostrando la veridicità della formula riportata nella normativa UNI EN 15287-1.

-





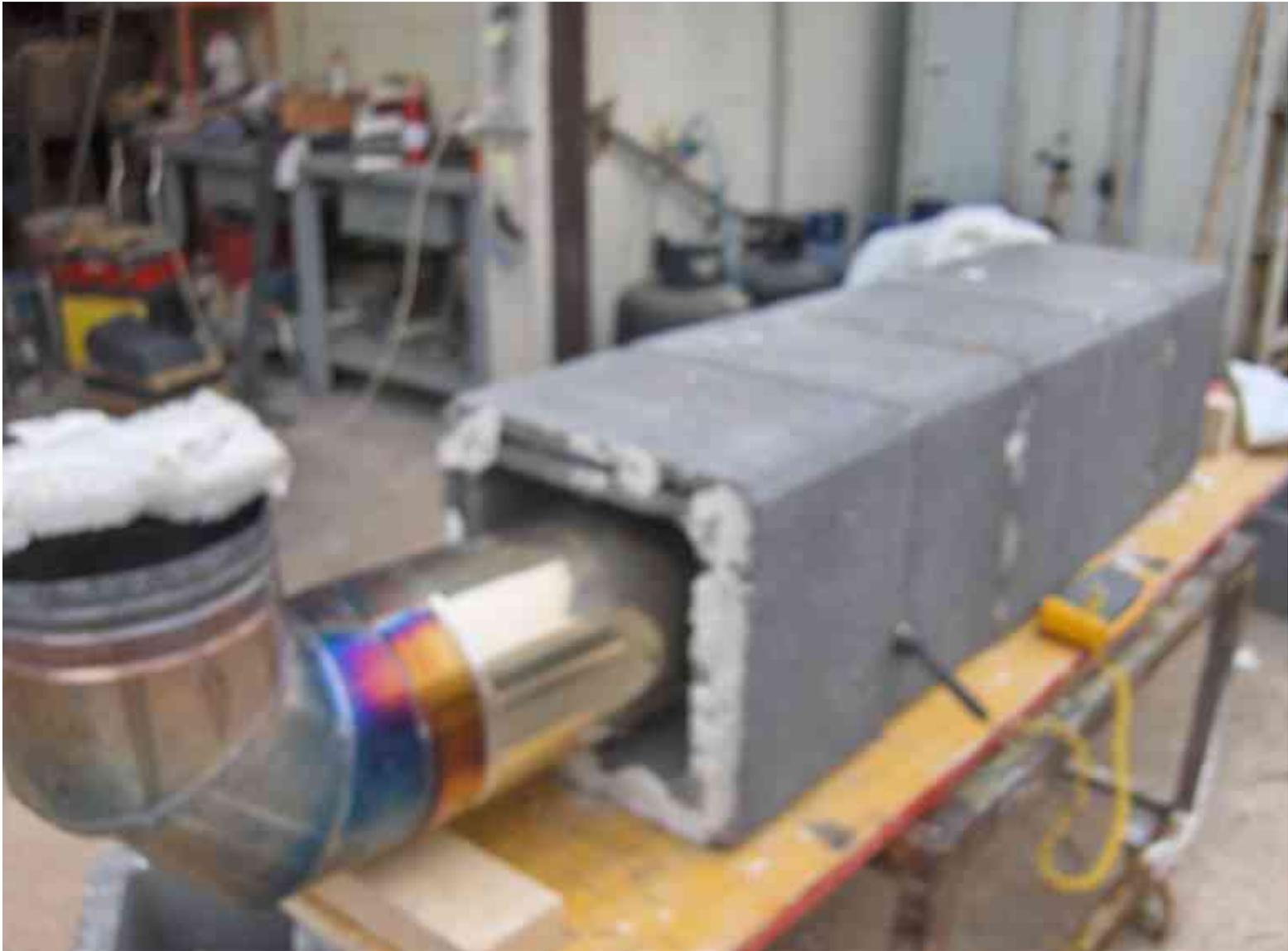
si è anche appoggiato un legno  
all'esterno della canna fumaria  
per verificare il tempo necessario  
all'autocombustione-

il legno si è incendiato dopo pochi  
minuti

# Inserimento in un cavedio di un tubo in acciaio senza isolamento

esempio per il calcolo della temperatura alla superficie interna del cavedio

			in metri
tubo in acciaio inox AISI 316L		diametro	0,20
classificazione	T		600
isolamento	aria	spessore cm	0,00
	cemento	spessore cm	0,05
cavedio		spessore cm	0,00
temperatura alla parete int.cavedio			<b>341,32</b>







Il cavedio in cemento si è fessurato quando la temperatura all'interno del tubo era intorno ai 400 gradi

Sarebbe stato interessante sapere in quel momento che temperatura avevamo sulla parete interna del cavedio.

All'esterno, il cavedio si poteva toccare con le mani .



Arrivati a 1000 gradi abbiamo misurato la temperatura esterna del cavedio, avevamo impedito al possibilità di ventilazione



minuti	rilievo	°C
0	14,24	102,5
7	14,31	160,9
11	14,34	201,5
19	14,42	301,5



