



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE



Combustione

Corso di MACCHINE [065IN]

Corso di MACCHINE MARINE [100IN]

Prof. Rodolfo Taccani

Prof. Lucia Parussini

Prof. Ronelly De Souza

Combustione

La combustione è una **reazione chimica di ossidazione** rapida ed esotermica che produce calore e luce.

Per ottenere una combustione sono necessarie almeno due sostanze: un **combustibile** e un **comburente**. L'ossigeno, o più comunemente l'aria, funge da comburente.



Combustione

Campo di Infiammabilità

- Una **miscela gassosa di combustibile e comburente** brucerà solo se la **concentrazione del combustibile** si trova all'interno di un campo definito da un limite inferiore e uno superiore di infiammabilità.

Temperature di Accensione (TA)

- La TA o di autoignizione è quella alla quale una **miscela gassosa inizia a bruciare senza innesco** esterno.

Temperatura di infiammabilità (TI)

- La TI è quella alla quale il combustibile produce **vapori sufficienti** per raggiungere il **limite inferiore di infiammabilità**.

Combustione

- La combustione **può innescarsi** anche quando la miscela, pur non raggiungendo la temperatura di auto ignizione **si trova all'interno del campo di infiammabilità** e viene fornita una **certa quantità di energia**.
 - Un esempio di tale innesco è rappresentato dai **motori ad accensione comandata** (motori a benzina), dove l'energia necessaria all'innesco della combustione è fornita dallo scoccare della **scintilla nelle candele**.
- **L'energia minima di innesco** dipende sia dalla **miscela**, sia dalle **condizioni termodinamiche** del sistema (pressione e temperatura).

Combustione

Fiamme Premiscelate e Non Premiscelate

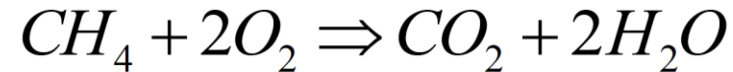
- Le **fiamme premiscelate** si formano quando combustibile e comburente sono **mescolati prima della combustione**, mentre le **fiamme non premiscelate** si formano quando i due componenti **si mescolano durante il processo** di combustione.

Classificazione in Funzione del Moto

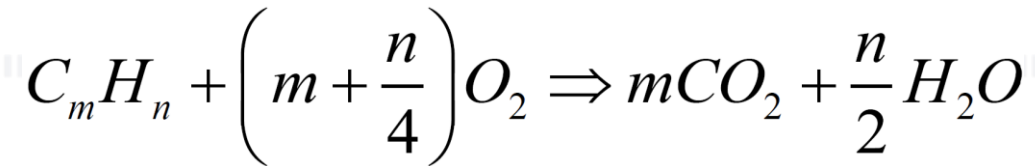
- Fiamme premiscelate turbolente: camere di combustione dei motori a combustione interna.
- Fiamme non premiscelate laminari: combustione del legno o fiamma di una candela.

Chimica della Combustione

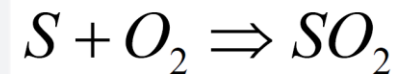
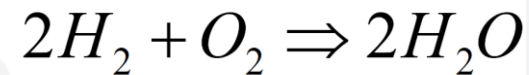
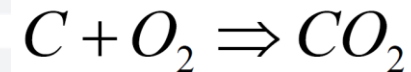
Combustione del metano:



Formula generale per la reazione di un idrocarburo:

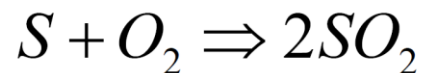
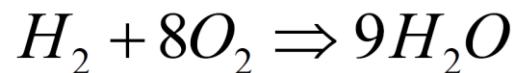
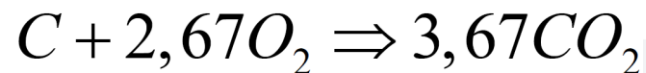
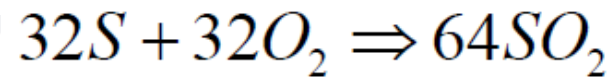
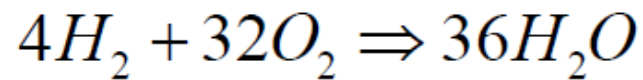
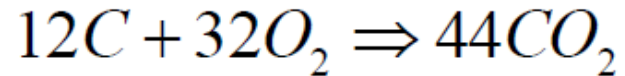


È possibile scomporre le equazioni in una serie di reazioni elementari, tenendo conto che un carburante è spesso costituito anche da zolfo:



Chimica della Combustione

Ragionando in termini massici:



Rapporto stechiometrico ossigeno combustibile:

$$m_{O_2,s}^* = 2,67[C] + 8[H] + [S]$$

oppure

$$m_{O_2,s}^* = 2,67[C] + 8[H] + [S] - [O]$$

$$\left[\frac{kg_{oss}}{kg_{comb}} \right]$$

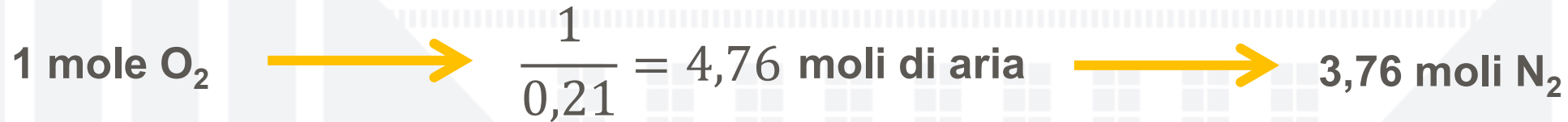
1 kmole	kg
C	12
O ₂	32
S	32
H ₂	2

Chimica della Combustione

Tuttavia, solitamente si utilizza l'aria come comburente.

In volume: 21% di ossigeno più 79% di azoto

In massa: 23% di ossigeno più 77% di azoto

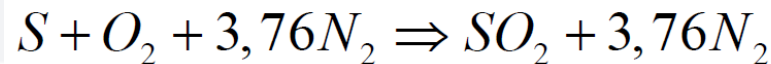
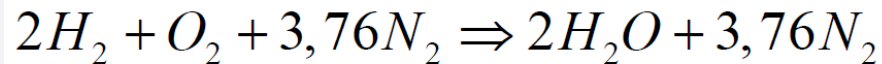
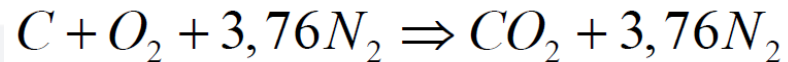
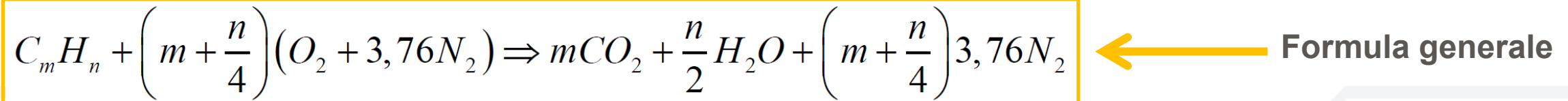


Approssimazione:

Azoto non reagisci con $O_2 \rightarrow$ nel calcolo ritroveremo 3,76 moli di N_2 nei prodotti.

Chimica della Combustione

Poi, le reazioni si trasformano nelle:



La massa relativa di aria stechiometrica è uguale a:

$$m_{a,s}^* = \frac{1}{0,23} m_{O_2,s}^* = 11,5[C] + 34,5[H] + 4,32[S] - 4,32[O] \quad \left[\frac{kg_a}{kg_{comb}} \right]$$

Chimica della Combustione

Calcolo della massa specifica dei fumi:

$$m_{f,s}^* = m_{a,s}^* + 1 - [ceneri] \left[\frac{kg_f}{kg_{comb}} \right]$$

In teoria, l'ossidazione completa dovrebbe essere assicurata utilizzando la quantità stechiometrica di ossigeno o di aria. Tuttavia, nella pratica, **i tempi di reazione sono finiti e la reazione non viene completata.**

Soluzione: **Eccesso d'aria** $\longrightarrow$ $\varepsilon = \frac{m_a^* - m_{a,s}^*}{m_{a,s}^*}$

$\varepsilon = 30\%$	Comb. solidi
$\varepsilon = 20\%$	Comb. liquidi
$\varepsilon = 10\%$	Comb. gassosi

$$m_a^*$$

massa specifica d'aria
effettivamente impiegata

Chimica della Combustione

La massa d'aria effettiva vale:

$$m_a^* = (1 + \varepsilon)(11,5[C] + 34,5[H] + 4,32[S] - 4,32[O])$$

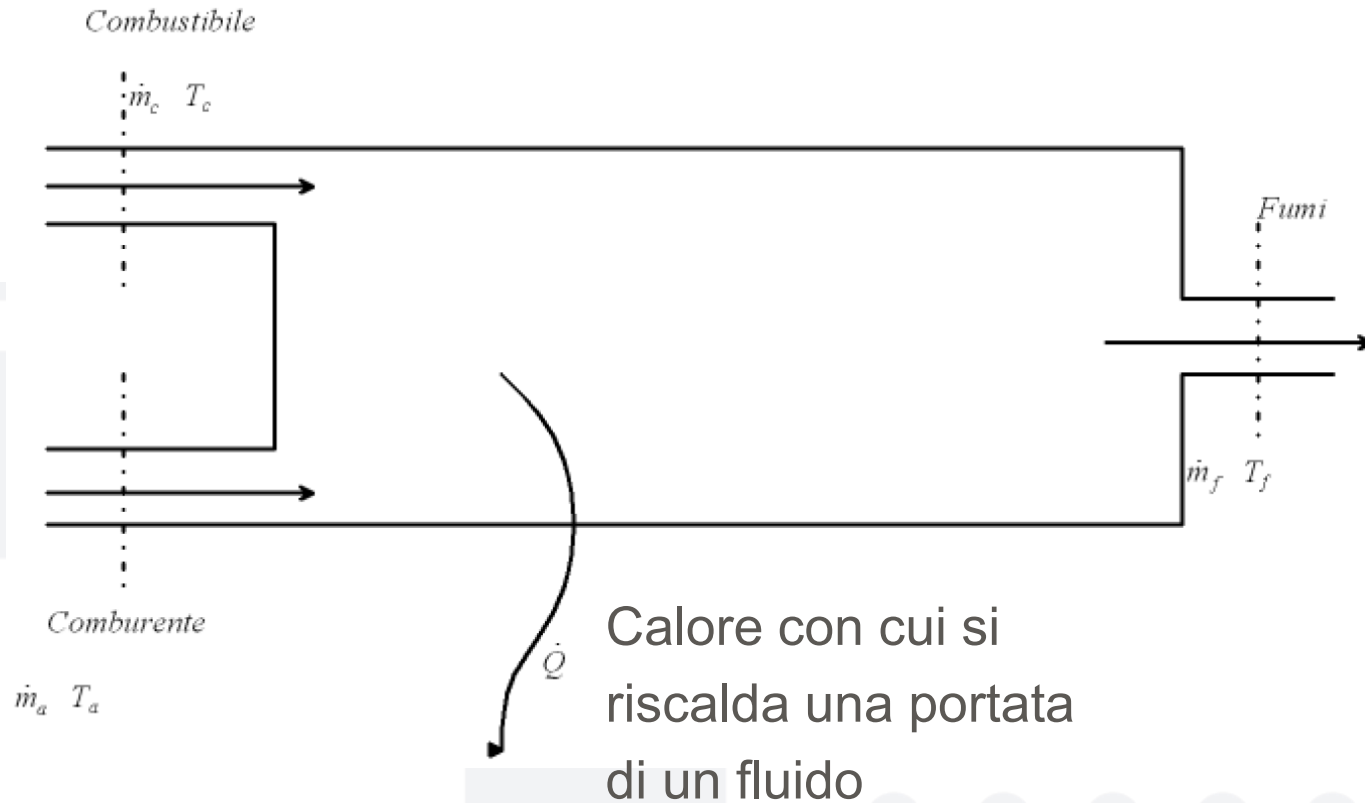
Calcolo della massa specifica dei fumi:

$$m_f^* = m_a^* + 1 - [ceneri] \left[\frac{kg_f}{kg_{comb}} \right]$$

Dal **punto di vista energetico** conviene ridurre al **minimo indispensabile** l'**eccesso d'aria** in quanto, aumentando la massa dei **fumi scaricati** in atmosfera, si aumenta anche l'**energia dispersa** nell'ambiente.

Combustione – bilancio energetico

schematizzazione di un generatore di calore



Supposizioni:

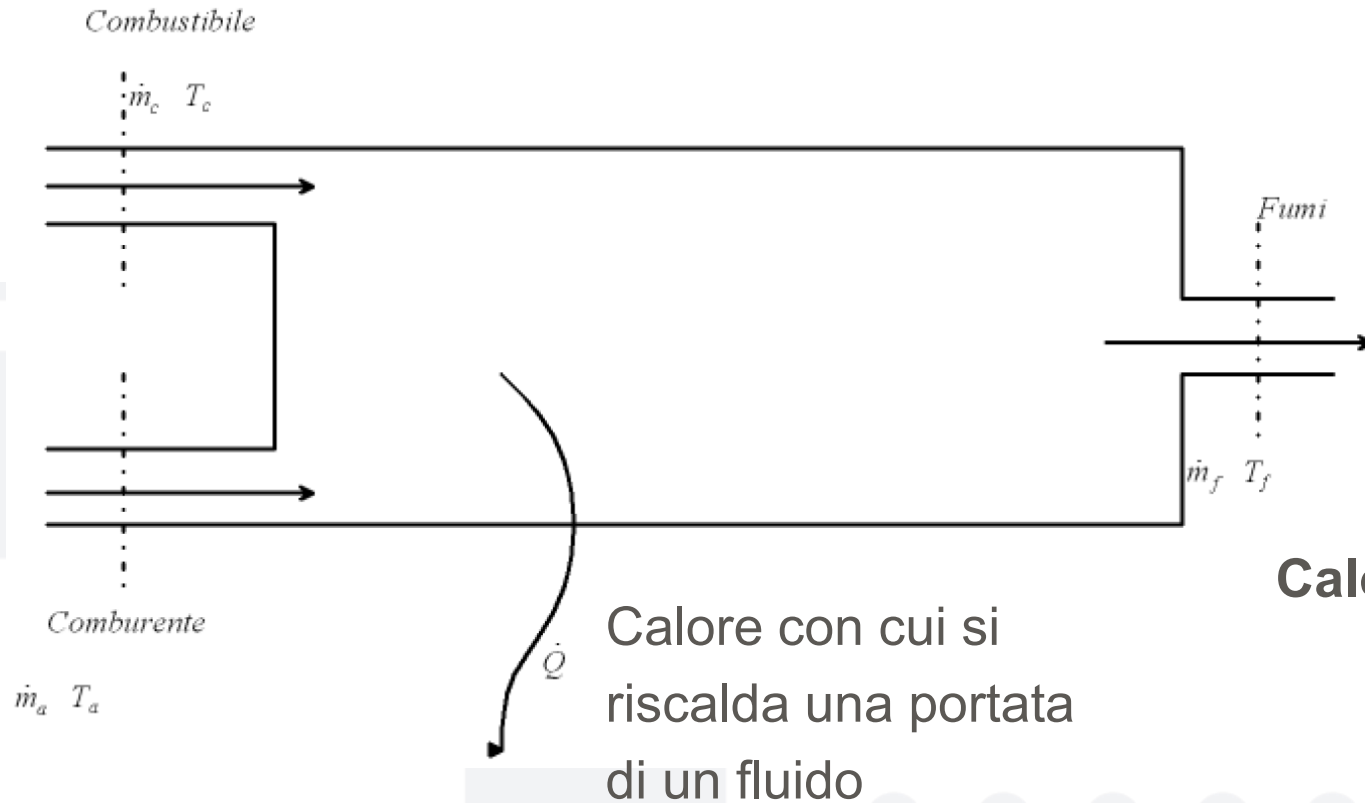
- combustibile, comburente e fumi in fase gassosa.
- comportamento di gas ideale e, quindi, dipendenza dell'entalpia dalla sola temperatura.
- ossidazione completa.
- mancanza di ceneri.
- variazione nulla di energia cinetica e potenziale tra ingresso e uscita.

$$\dot{m}_f = \dot{m}_a + \dot{m}_c$$

$$\dot{m}_a h_a(t_a) + \dot{m}_c h_c(t_c) = \dot{Q} + \dot{m}_f h_f(t_f)$$

Combustione – bilancio energetico

schematizzazione di un generatore di calore



$$\dot{m}_f = \dot{m}_a + \dot{m}_c$$

$$\dot{m}_a h_a(t_a) + \dot{m}_c h_c(t_c) = \dot{Q} + \dot{m}_f h_f(t_f)$$

Calore per unità di massa del combustibile:

$$q = h_c(t_c) + (1 + \varepsilon) \dot{m}_{a,s}^* h_a(t_a) - \dot{m}_f^* h_f(t_f)$$

Combustione – bilancio energetico

Se supponiamo:

$$t_a = t_c = t_f = t_0$$

Il calore scambiato dal sistema sarà:

$$q^0 = h_c(t_0) + (1 + \varepsilon)m_{a,s}^* h_a(t_0) - m_f^* h_f(t_0)$$

L'entalpia totale dei fumi è uguale alla somma **dell'entalpia totale dei fumi in condizioni stechiometriche** più **l'entalpia totale dell'aria che non ha reagito con il combustibile**.

$$m_f^* h_f(t_0) = m_{f,s}^* [h_f(t_0)]_s + \varepsilon m_{a,s}^* h_a(t_0)$$

Potere calorifico del combustibile:

$$q^0 = h_c(t_0) + m_{a,s}^* h_a(t_0) - m_{f,s}^* [h_f(t_0)]_s$$

- si vede che il **calore** prodotto è **indipendente dall'eccesso d'aria**
- **non dipende neppure dal comburente** nel senso che **posso utilizzare ossigeno puro o aria** ed ottengo lo stesso risultato

Combustione – bilancio energetico

Potere calorifico del combustibile:

$$q^0 = h_c(t_0) + m_{a,s}^* h_a(t_0) - m_{f,s}^* \left[h_f(t_0) \right]_s$$

Quantità di **calore estraibile dalla combustione** completa di 1 kg di combustibile all'interno di un sistema aperto qualora i **fumi siano raffreddati fino alla temperatura iniziale** dei reagenti.

Per avere una definizione univoca del potere calorifico bisogna:

- definire la temperatura di riferimento; di solito si considerano 0 15 o 25 °C
- definire lo stato iniziale del combustibile
- dichiarare lo stato dell'acqua che si ottiene nella reazione

Combustione – bilancio energetico

Potere calorifico superiore (H_s)

L'acqua prodotta nella reazione si trova alla fine del processo allo stato liquido, una volta che ha ceduto ai fumi il suo calore latente di condensazione.

Potere calorifico inferiore (H_i)

L'acqua prodotta nella reazione è rimasta allo stato di vapore in miscela con i fumi.

I due poteri calorifici sono legati dalla relazione

$$H_s = H_i + m_{H_2O}^* r_0$$

calore latente di evaporazione

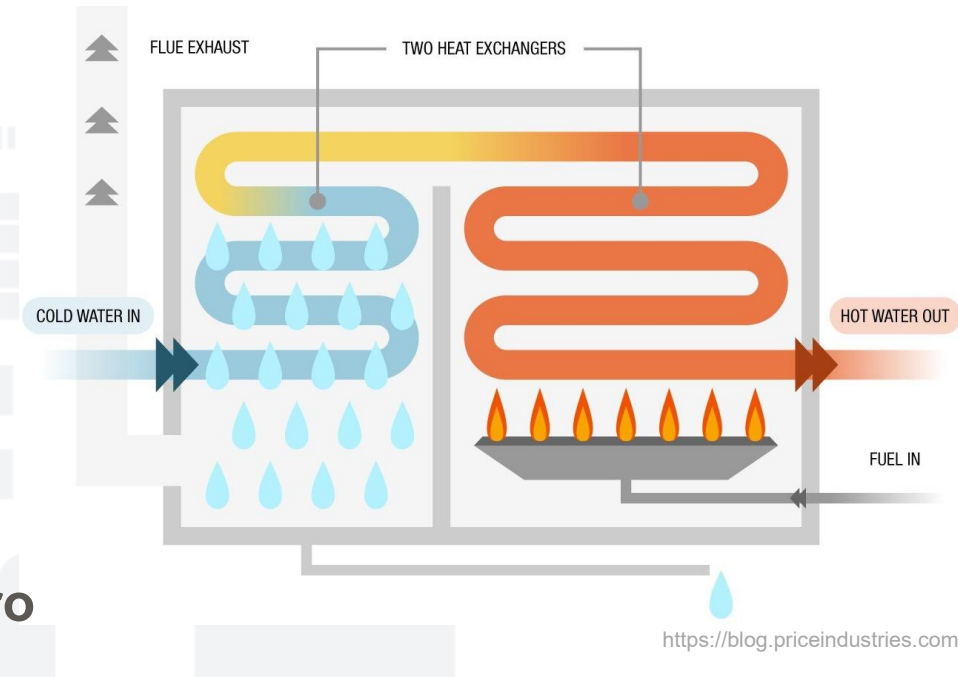
Combustione – bilancio energetico

Potere calorifico inferiore (PCI):

- Riferimento comune per **evitare la condensazione dell'acqua** nei condotti di scarico.
- La **condensazione può formare acido solforico** se è presente zolfo nel combustibile, causando corrosione dei materiali metallici.

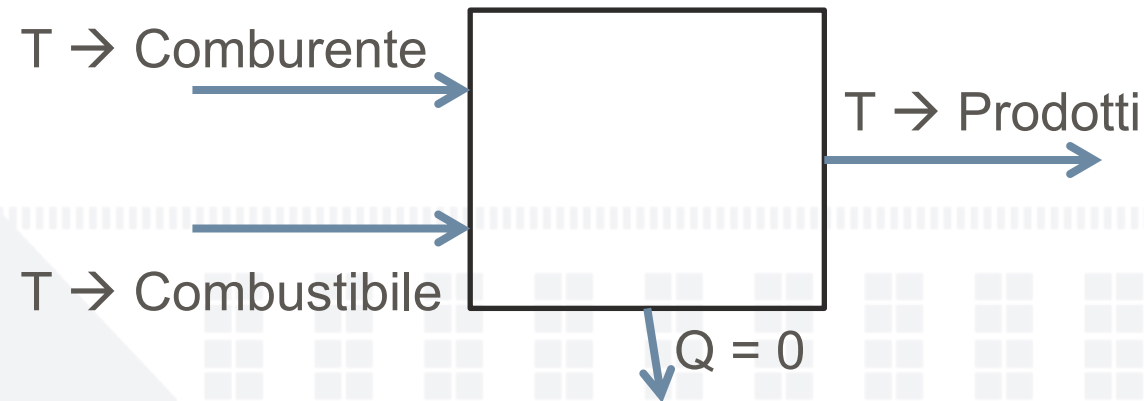
Eccezione: Caldaie a condensazione:

- Obbligatorie nei nuovi impianti di riscaldamento.
- Funzionamento:
 - L'acqua di ritorno scorre in uno scambiatore di calore in controcorrente ai fumi di scarico.
 - La condensazione dell'acqua nei fumi permette il **recupero di energia**.



Temperatura teorica di fiamma

Supponiamo di avere una reazione chimica e di voler sapere qual è la temperatura massima che si può ottenere da questa reazione chimica.



La **temperatura** che i fumi raggiungerebbero in una combustione **senza scambio termico** con l'esterno e **senza dissociazione dei prodotti** della combustione.

Temperatura teorica di fiamma

calore prodotto da
una combustione
generica
(gas ideale)

$$q = H + c_{p,c} \Big|_{t_0}^{t_c} (t_c - t_0) + m_a^* c_{p,a} \Big|_{t_0}^{t_a} (t_a - t_0) - m_f^* c_{p,f} \Big|_{t_0}^{t_f} (t_f - t_0)$$

↘
↘

0 0

Con
 $q = 0$
e
 $t_c = t_0$

$$H + m_a^* c_{p,a} \Big|_{t_0}^{t_a} (t_a - t_0) = m_f^* c_{p,f} \Big|_{t_0}^{t_f} (t_{ad} - t_0)$$

$$t_{ad} = t_0 + \frac{H + m_a^* c_{p,a} \Big|_{t_0}^{t_a} (t_a - t_0)}{m_f^* c_{p,f} \Big|_{t_0}^{t_f}}$$

Si tratta di un'informazione estremamente importante, perché ci **consentirà di progettare la camera di combustione** in modo che le **proprietà del materiale** che stiamo studiando siano in **grado di sostenere questa temperatura elevata**.



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**



Ronelly De Souza

ronellyjose.desouza@dia.units.it

www.units.it