



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

**Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**

Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

**BRUCIATORI PREMISCELATI: INDAGINE SPERIMENTALE SUI VARI  
TIPI DI BRUCIATORE PER PICCOLE-MEDIE POTENZE CON  
PARTICOLARE ATTENZIONE AI BRUCIATORI POROSI**

Relatore: Anna Stoppato

Chiara Bressan

Matricola: 1105256

Anno Accademico 2015/2016



# INDICE

<b>1. INTRODUZIONE .....</b>	<b>3</b>
<b>2. COMBUSTIONE E SUE APPLICAZIONI .....</b>	<b>7</b>
2.1. La combustione .....	7
2.2. Le fiamme.....	15
2.3. Le caldaie odierne .....	18
<b>3. BRUCIATORI PREMISCELATI .....</b>	<b>29</b>
3.1. Bruciatori standard: acciaio tranciato.....	30
3.2. Bruciatori porosi: fibra metallica .....	32
3.3. Bruciatori porosi: materiali ceramici.....	36
3.4. Applicazioni particolari.....	40
<b>4. POLIDORO.....</b>	<b>45</b>
4.1. La ditta .....	45
4.2. I prodotti .....	45
4.3. La fibra Polidoro .....	51
4.4. La collaborazione .....	52
<b>5. COMBUSTIONE IN MEZZO POROSO, CONCETTI BASE.....</b>	<b>55</b>
<b>6. FASE SPERIMENTALE .....</b>	<b>61</b>
6.1. Gli strumenti di misura.....	61
6.2. Il sistema caldaia .....	63
6.3. I bruciatori impiegati.....	65
6.4. Stabilità a caldo .....	70
6.5. Stabilità a freddo.....	75
6.6. Emissioni .....	77
6.7. Prove in aria libera .....	82
6.8. Perdite di carico .....	87
6.9. Valutazioni di porosità .....	90
6.10. Studio del comportamento al minimo carico termico.....	93
6.11. Il bruciatore a schiuma ceramica .....	98
<b>7. CONCLUSIONI.....</b>	<b>107</b>
<b>8. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>117</b>



# 1. INTRODUZIONE

In questa tesi si sono voluti caratterizzare diversi bruciatori premiscelati presenti nel mercato delle caldaie ad uso domestico. Sono stati confrontati secondo vari aspetti diversi bruciatori, sia di tipo classico che più innovativi per valutare in che direzione sia più opportuno volgere lo sviluppo di questi componenti.

Si è data una particolare importanza ai bruciatori a matrice porosa, poiché essa promette numerosi vantaggi, come un'alta efficienza radiante, una buona modulabilità della potenza prodotta, un buon mescolamento della miscela aria-combustibile che, assieme ad un preriscaldamento della stessa, può estendere i limiti inferiori di infiammabilità e portare a una buona efficienza di combustione e a basse emissioni inquinanti.

Per tutti questi motivi l'utilizzo dei mezzi porosi potrebbe aumentare le prestazioni dell'intero sistema caldaia.

Nell'elaborato che segue si farà prima una breve introduzione sulle caratteristiche principali della combustione e delle leggi che la governano, quindi si parlerà dei vari tipi di fiamme e delle loro caratteristiche. Si farà poi anche una breve descrizione delle caldaie odierne, dei loro componenti e dei principali metodi di funzionamento e modulazione. Si vedranno inoltre nello specifico le varie tipologie esistenti di bruciatori premiscelati, le loro tecniche costruttive e i loro impieghi, oltre che nel settore domestico anche nell'industria e nei nuovi settori di ricerca.

Di seguito si darà prima una trattazione teorica dei bruciatori a matrice porosa, basata per lo più su articoli di letteratura scientifica, in cui si cercherà di mettere in luce quali siano gli aspetti positivi e negativi di questa tecnologia. Seguirà poi una trattazione sperimentale in cui si riporteranno i risultati di test eseguiti in laboratorio su diversi tipi di bruciatori premiscelati, porosi e non, per verificare se le caratteristiche e i miglioramenti promessi sono effettivamente mantenuti.

La tesi è stata scritta in collaborazione con la ditta *POLIDORO S.p.A.* di Schio, specializzata nella produzione di bruciatori. Al suo interno si sono svolti i test sopra citati su bruciatori porosi a fibra metallica e ceramica e si è fatto un confronto dei risultati ottenuti con i risultati di test identici su bruciatori più tradizionali.

Da tali risultati si è dedotto che l'adozione di un bruciatore poroso non comporta dei miglioramenti assoluti sotto tutti i punti di vista indagati e tantomeno esiste una versione di bruciatore poroso nettamente migliore di tutte le altre. Si è visto piuttosto che la semplice operazione di ricoprire un bruciatore "classico" con un mezzo poroso può velocemente abbattere le emissioni di NOx ed estendere i limiti di buona combustione anche a miscele molto magre. Non comporta invece vantaggi per quanto riguarda le emissioni di CO o per quanto riguarda la capacità del bruciatore di accendersi da freddo a bassi carichi termici.

Sotto questi aspetti sono invece risultati vincenti altri tipi di bruciatore; ad esempio un bruciatore interamente costruito in fibra ceramica sinterizzata è la soluzione migliore per quanto riguarda le accensioni da freddo, mentre i bruciatori tradizionali in lamiera tranciata sono i migliori in fatto di emissioni di monossido di carbonio.

Oltre ai bruciatori in materiale poroso si è indagato anche su un nuovo tipo di bruciatore in lamiera tranciata, un bruciatore in 3D, in grado di

stabilizzare la fiamma grazie alla combinazione di diversi ugelli. Anche per questo bruciatore sono stati svolti gli stessi test e si è riscontrato che esso è sì in grado di sviluppare una combustione molto stabile, ma non è altrettanto performante per quanto riguarda le emissioni o per le accensioni da freddo, in più presenta grosse perdite di carico.





## 2. COMBUSTIONE E SUE APPLICAZIONI

Per combustione si intende una qualsiasi reazione chimica che prevede l'ossidazione di un combustibile da parte di un comburente e che comporta lo sviluppo di calore e spesso di luce.

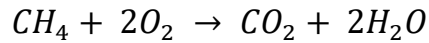
L'uomo è in grado di padroneggiare la combustione, e il fuoco che ne deriva, fin dalla preistoria e lo sviluppo della nostra società si è sempre basato sulla combustione e sull'utilizzo che se ne può ricavare. Oggi essa viene usata non solo per la cottura dei cibi e per il riscaldamento degli ambienti ma anche per la locomozione dei veicoli, per la produzione di energia elettrica da fonti fossili e in numerosi processi industriali.

In questo capitolo si darà una breve spiegazione dei fenomeni che regolano una reazione di combustione e degli inquinanti che si possono sviluppare. Si tratteranno le varie tipologie di fiamma che si possono incontrare ed infine l'utilizzo in caldaia.

### 2.1. LA COMBUSTIONE

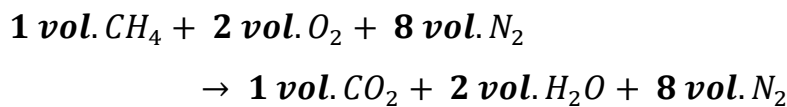
La reazione di COMBUSTIONE è la reazione di ossidazione di un COMBUSTIBILE da parte di un COMBURENTE, avviene in modo rapido e comporta lo sviluppo di calore (esotermica) e a volte anche di luce. La maggior parte delle combustioni utilizzate ai nostri giorni usano come combustibile un idrocarburo che brucia in aria.

L'esempio più classico di combustione è quello che avviene tra il metano (combustibile) e l'ossigeno (comburente); la reazione chimica globale in questione può essere scritta come:



Anche se in modo molto semplice, già da questa prima espressione si vede come, durante la reazione, il carbonio e le restanti molecole che componevano il combustibile (in questo caso l'idrogeno) vengano ossidate producendo anidride carbonica ed acqua. Questi ultimi sono i più comuni prodotti di combustione.

La relazione comincia a complicarsi se consideriamo il fatto che la reazione avviene in aria. Se per semplicità consideriamo l'aria composta solamente da una parte di ossigeno e quattro parti di azoto, possiamo riscrivere il tutto come:



La reazione di per sé non è cambiata, si è solamente aggiunto a destra e a sinistra l'azoto (nella rispettiva quantità volumetrica) e lo si è considerato inerte, cioè non interessato alla reazione che lo circonda.

In realtà, il processo di combustione non vede una sola reazione e, nello specifico, non vede la reazione globale scritta sopra, ma piuttosto una lunga serie di reazioni che avvengono in cascata. Gli intermedi fondamentali nelle reazioni di combustione sono i RADICALI, specie in grado di innescare meccanismi di "erosione" di altre specie stabili. La reazione arriva quindi a compimento quando tutte le specie attive sono reagite tra di loro portando alla formazione di specie stabili (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, ...). Possiamo quindi distinguere una reazione di combustione in quattro fasi:

- INIZIAZIONE: in cui un innesco (fonte di energia generalmente sotto forma di calore) sottrae un elettrone di valenza alle molecole iniziali formando i radicali.
- PROPAGAZIONE: in cui i radicali attaccano specie stabili per formare nuovi radicali.
- RAMIFICAZIONE: in cui i radicali iniziali si diramano formando radicali secondari o specie stabili.
- TERMINAZIONE: quando l'interazione di più radicali genera soltanto specie stabili.

Se le specie attive formatesi nelle prime fasi della combustione sono pari a quelle disattivate nella fase di terminazione la combustione risulterà lenta e controllata; altrimenti si può ottenere una reazione incontrollata o un'esplosione.

L'equazione globale vista sopra è comunque quella che si prende a riferimento quando si parla di una reazione di combustione. Così scritta essa rappresenta una reazione STECHIOMETRICA, cioè avvenente in un miscuglio perfetto di combustibile ed aria, a temperatura e pressione controllate e che porta alla completa ossidazione di tutti i componenti iniziali. In realtà, se inseriamo solamente il quantitativo stechiometrico d'aria, la reazione difficilmente arriverà alla totale ossidazione del combustibile a causa di

- Un non omogeneo mescolamento aria- combustibile
- Fluttuazioni nella pressione di ingresso dell'aria
- Fluttuazioni nell'umidità relativa contenuta nell'aria
- Fluttuazioni nell'ingresso del combustibile
- Fluttuazioni nella qualità del combustibile
- Influenza del vento al camino
- ...

Per tutti questi motivi, generalmente, la combustione viene fatta avvenire in presenza di ECCESSO D'ARIA; si introduce quindi più aria di quanta teoricamente necessaria per avere la certezza di arrivare ad una completa combustione.

Il grado di eccesso d'aria può essere espresso con vari valori:

- ECCESSO D'ARIA  $\lambda$  (lambda): indica la percentuale di aria in più rispetto alla teorica. Ad esempio  $\lambda = 1.2$  significa che c'è il 20% di aria extra.
- RAPPORTO DI EQUIVALENZA  $\phi$  (fi): indica il rapporto tra l'aria teorica e quella effettiva. In questo caso un eccesso d'aria è indicato da  $\phi$  minore di 1. Ad esempio, l'eccesso d'aria del 20% diventa  $\phi = 100/120 = 0.83$ .
- CONTENUTO DI ANIDRIDE CARBONICA NEI GAS DI SCARICO: a volte può essere più semplice andare a misurare il quantitativo di un componente nei gas di scarico piuttosto che l'eccesso d'aria iniziale, in questo caso ci si può ugualmente ricondurre al valore di eccesso d'aria attraverso un semplice rapporto.

Nel caso di combustione stechiometrica di metano in aria la percentuale di  $CO_2$  nei gas di scarico secchi è pari a 11.73%<sup>1</sup>, se però la combustione avviene in eccesso d'aria questo valore cala per semplice diluizione del gas; il valore di eccesso d'aria si può quindi ricavare come rapporto:

$$\lambda = \frac{\% CO_2 \text{ stechiometrica}}{\% CO_2 \text{ misurata}}$$

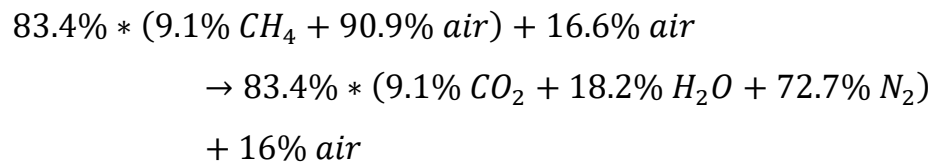
- CONTENUTO DI OSSIGENO NEI GAS DI SCARICO: in questo caso si indica la percentuale di ossigeno che non reagisce in una combustione ideale; il suo valore dipende sia dall'eccesso d'aria, sia

---

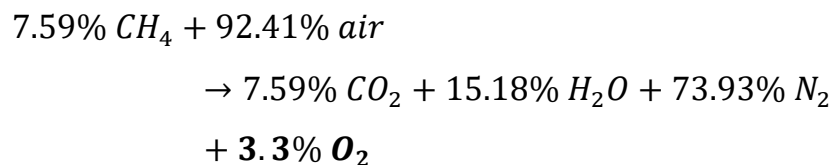
<sup>1</sup> =  $1 \text{ vol. } CO_2 / 1 \text{ vol. } CO_2 + 8 \text{ vol. } N_2$

dal tipo di combustibile con il quale si ha a che fare. Per il gas metano, un eccesso d'aria del 20% corrisponde ad un 3.3% di ossigeno nei gas di scarico.

Il suo valore è ricavabile dalla reazione chimica di ossidazione:  $\lambda=1.2$  significa che c'è  $0.2/1.2= 16.6\%$  di aria extra, quindi solo  $100-16.6=83.4\%$  di aria reagirà con il metano, la reazione quindi diventa



Dividendo poi l'aria extra rimasta i 20% ossigeno e 80% azoto l'equazione finale è:



Nella realtà, a valle di una combustione non si trovano solamente carbonio e ossigeno ossidati, ma anche altre molecole che non esistevano prima della reazione e che si sono formate a partire dagli atomi presenti in prossimità di essa e grazie all'energia che è liberata. Essi sono i cosiddetti INQUINANTI, tra i più comuni possiamo trovare:

- MONOSSIDO DI CARBONIO CO: deriva della non completa combustione del combustibile, la sua presenza in percentuale è generalmente presa come indicatore della bontà del processo di combustione. La sua formazione avviene come tappa intermedia nel processo di ossidazione del carbonio: la reazione  $2C + 4O_2 \rightarrow 2CO_2$  infatti avviene in 2 momenti distinti secondo le due reazioni
 
$$2C + O_2 \rightarrow 2CO$$

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$$

Dove la prima è circa 10 volte più veloce della seconda; quindi, se per qualche motivo, durante la combustione non fosse presente sufficiente ossigeno o tempo, la reazione di combustione potrebbe interrompersi prima che la seconda tappa arrivi a concludersi e quindi si può ritrovare la presenza del monossido di carbonio nei fumi di scarico.

Un'altra causa di formazione del CO è la dissociazione dell'anidride carbonica che può avvenire ad alte temperature, in questo caso la reazione è la seguente  $2CO_2 \leftrightarrow 2CO + O_2$ . L'equilibrio di tale reazione si sposta verso destra all'aumentare della temperatura. Per esempio a 1745 °C l'1% della CO<sub>2</sub> prodotta si dissocia in CO e O, mentre a 1940 °C se ne dissocia il 5%. Se i fumi vengono raffreddati molto rapidamente l'equilibrio non riesce a spostarsi verso sinistra con la stessa velocità e il monossido di carbonio resta congelato nei fumi.

Infine, ad alte temperature, l'anidride carbonica può reagire anche con altri composti contenenti carbonio:  $CO_2 + C \rightarrow 2CO$ .

Il CO, oltre al fatto che indica una combustione non completa, è da evitare il più possibile anche per la sua elevata tossicità. Il CO infatti è in grado di legarsi allo ione del ferro nell'emoglobina, formando un complesso più stabile di quello formato con l'ossigeno e ostacolando il rilascio di ossigeno ai tessuti. L'inalazione di monossido di carbonio, anche in piccole quantità, porta ad uno stato di incoscienza e alla morte per asfissia.

Per evitare la sua comparsa in genere si agisce sull'eccesso d'aria per fare in modo che vi sia sufficiente ossigeno per portare a completamento l'ossidazione del combustibile. Inoltre, sempre per lo stesso motivo, si ricorre ad un buon premiscelamento della miscela aria-combustibile. Poiché un repentino raffreddamento

della fiamma può interrompere la catena di reazioni che porta alla formazione del  $\text{CO}_2$ , in genere la fiamma è anche tenuta ad una certa distanza da tutte le pareti della camera di combustione.

- IDROCARBURI INCOMBUSTI UHC: in questo caso il combustibile di partenza non è nemmeno stato scomposto nelle sue molecole costitutive. La maggior parte di questi prodotti non si forma per combustione ma per pirolisi, ovvero per decomposizione dei composti organici ad opera della temperatura raggiunta attorno alla fiamma, sufficiente a decomporli ma non per portare alla completa rottura di tutti i legami chimici all'interno della molecola. La loro formazione può essere dovuta anche ad una permanenza troppo breve in camera di combustione, non sufficiente a permettere che la combustione vada a termine.

In genere gli idrocarburi incombusti si combattono facendo in modo di ottenere una combustione più completa possibile.

- OSSIDI DI AZOTO  $\text{NO}_x$ : si formano quando parte dell'ossigeno non va ad ossidare il carbonio ma l'azoto contenuto nell'aria o nel combustibile di partenza. I due principali esponenti di questa categoria sono l'ossido di azoto  $\text{NO}$  e il biossido di azoto  $\text{NO}_2$ .

La loro formazione non dipende dalla non completa reazione di combustione, ma è da tenere ugualmente sotto controllo perché può andare a sottrarre ossigeno alla miscela, che quindi non può più legarsi con gli atomi di carbonio ancora non totalmente ossidati. I meccanismi di formazione sono principalmente i seguenti tre:

- PROMPT: avviene nelle fasi iniziali della combustione, nelle quali sono presenti composti intermedi molto aggressivi che possono aggredire l'azoto.
- THERMAL: gli  $\text{NO}_x$  vengono a formarsi a partire dall'azoto presente nell'aria, in presenza di alte temperature (oltre i

1200 °C) e di una grossa quantità di ossigeno. In questo caso l'azoto e l'ossigeno reagiscono secondo le seguenti reazioni:  $N_2 + O_2 \leftrightarrow 2NO$  e  $2NO + O_2 \leftrightarrow 2NO_2$ . Se a valle della combustione, i fumi vengono raffreddati velocemente, gli ossidi di azoto si trovano congelati nei fumi senza che i due elementi abbiano la possibilità di ricombinarsi nelle loro forme atomiche.

- FUEL: sono gli NOx prodotti a partire dall'azoto presente nel combustibile. In questo caso è fondamentale utilizzare un combustibile con più basso contenuto di azoto possibile.

Generalmente, il metodo principale per evitare la formazione di questi inquinanti è quello di contenere la temperatura di combustione entro i limiti di formazione degli NOx per via termica, poiché questi sono la maggior parte tra quelli prodotti. Occorre però prestare attenzione a non abbassare troppo la temperatura poiché questo porterebbe all'aumento delle emissioni di monossido di carbonio. Bisogna quindi cercare il giusto compromesso tra queste due esigenze.

- OSSIDI DI ZOLFO SOx: anche in questo caso avviene che l'ossigeno impiegato per ossidare lo zolfo contenuto nel combustibile non può più essere impiegato per ossidare il carbonio, il che quindi può comportare una perdita di efficienza nel processo di combustione, oltre che generare sostanze nocive. I due principali esponenti di SOx sono l'anidride solforica SO<sub>2</sub> e l'anidride solforosa SO<sub>3</sub>.

I meccanismi di produzione degli SOx seguono le seguenti reazioni:  $S + O_2 \leftrightarrow SO_2$  e  $2SO_2 + O_2 \leftrightarrow 2SO_3$ . La quantità di SO<sub>3</sub> prodotta è generalmente modesta a causa del fatto che la seconda reazione è molto lenta a compiersi. Inoltre, se in atmosfera è



presente una sufficiente quantità di vapore acqueo, l'SO<sub>3</sub> può combinarsi con esso portando alla formazione di acido solforico secondo la seguente reazione:  $SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$ ; per questo motivo in atmosfera è più facile trovare H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> che SO<sub>3</sub>.

Il modo migliore per evitare la formazione degli SO<sub>x</sub> è quello di partire da un combustibile il più puro possibile. Inoltre si può ricorrere ad adeguati filtri posti a valle della camera di combustione, in grado di far reagire gli ossidi di zolfo e sottrarli così ai fumi da scaricare in ambiente.

## **2.2. LE FIAMME**

La FIAMMA è la parte visibile di una reazione di combustione ed è la prova più tangibile che la combustione effettivamente è in atto. Per fiamma si intende anche la reazione localizzata che si autosostiene.

Il suo colore può fornire varie informazioni sulla reazione che è in atto come il tipo di combustibile che si sta ossidando, la temperatura che si raggiunge al suo interno (una fiamma rossa indica temperature sui 400 – 900 °C, mentre una fiamma blu indica circa 1400 °C) ed il fatto che la reazione sia completa o meno (riguardo a quest'ultimo fatto anche la presenza di fumo è un importante indicatore del fatto che restano particelle non completamente combuste).

Le fiamme possono essere distinte in base a come il combustibile ed il comburente entrano in contatto in

**PREMISCELATE:** è tipica dei soli combustibili gassosi, perché aria e combustibile devono miscelarsi in modo omogeneo prima della zona di reazione.

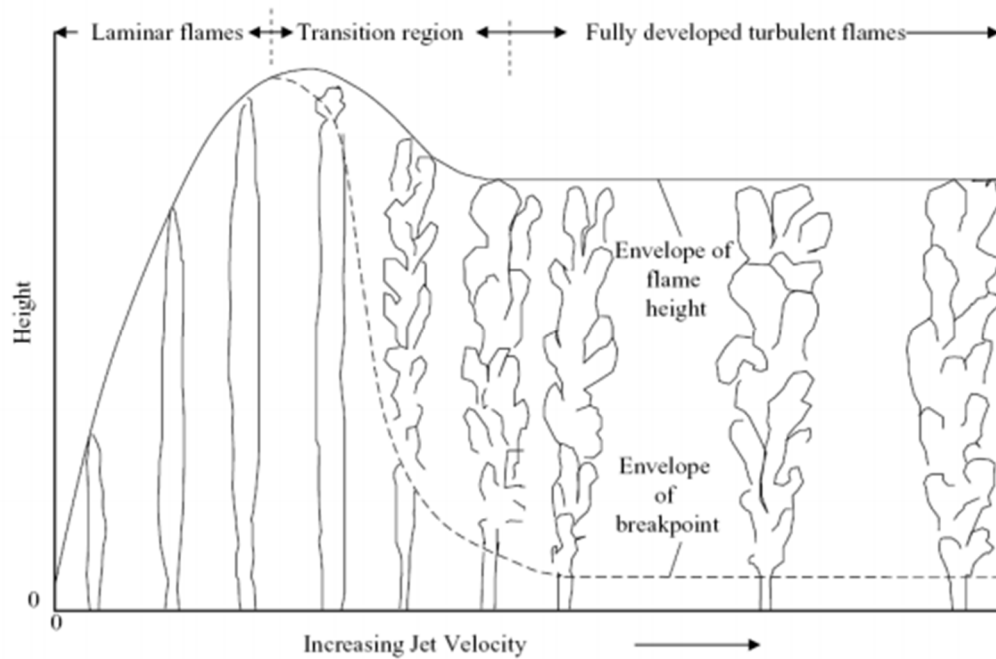
NON PREMISCELATE: in questo caso combustibile e comburente entrano in contatto, o finiscono di entrare in contatto, direttamente in prossimità della fiamma. Sono di questo tipo tutte le fiamme che prevedono combustibile solido o liquido, in quanto la reazione esotermica di combustione porta il combustibile ad essere gassoso e quindi miscelabile con il comburente; può però avvenire anche con combustibili già allo stato gassoso.

PARZIALMENTE PREMISCELATE: in questo caso il combustibile gassoso è precedentemente miscelato con una quantità d'aria inferiore a quella stechiometrica, il quantitativo rimanente per la completa combustione viene poi richiamato direttamente dalle alte temperature che si sviluppano nelle vicinanze della fiamma.

Un'altra distinzione generalmente usata riguarda la forma della fiamma: essa può essere

TURBOLENTA quando il flusso d'aria che la circonda è di tipo turbolento (con numeri di Reynolds  $> 1050$ ), in questo caso i vortici casuali che si formano all'interno del flusso si ripercuotono anche sulla fiamma stessa che quindi ha forma continuamente mutevole. In genere ha un colore giallastro ed è più luminosa.

LAMINARE quando il flusso d'aria è più lento. In questo caso la fiamma ha forma più stabile ed un colore più bluastrò.



*gr 1 – Passaggio da fiamme laminari a turbolente all'aumentare della velocità del getto. Il passaggio non è netto ma attraversa una regione di transizione, in cui la fiamma diventa sempre più turbolenta a partire dal punto più lontano all'ugello.*

Nella figura precedente (Figura 1) si può notare come le fiamme laminari aumentino la loro lunghezza con l'aumentare della velocità del flusso in ingresso, invece per le fiamme turbolente la lunghezza di fiamma non è influenzata dalla velocità di ingresso, ma resta sempre circa costante fino alla VELOCITÀ DI BLOW OFF, velocità alla quale la fiamma si stacca dall'ugello e viene spinta via fino a perdersi.

Per quanto riguarda i fini di questa tesi si farà riferimento solamente alle fiamme laminari premiscelate, in modo da ottenere una fiamma più stabile possibile e con completa ossidazione del combustibile, che sarà sempre metano.

## 2.3. LE CALDAIE ODIERNE

Una caldaia, in un impianto di riscaldamento, è l'apparecchiatura che realizza il passaggio di calore dalla combustione del combustibile (in Italia tipicamente gas metano) ad un liquido (tipicamente acqua) senza che avvenga la sua ebollizione, per poi distribuirlo opportunamente ad un ambiente tramite l'impianto stesso. Alla caldaia può essere associato anche l'impianto di acqua calda sanitaria.

Quello che segue è un semplice schema di una caldaia premiscelata, nel quale si possono riscontrare diversi elementi poi approfonditi.

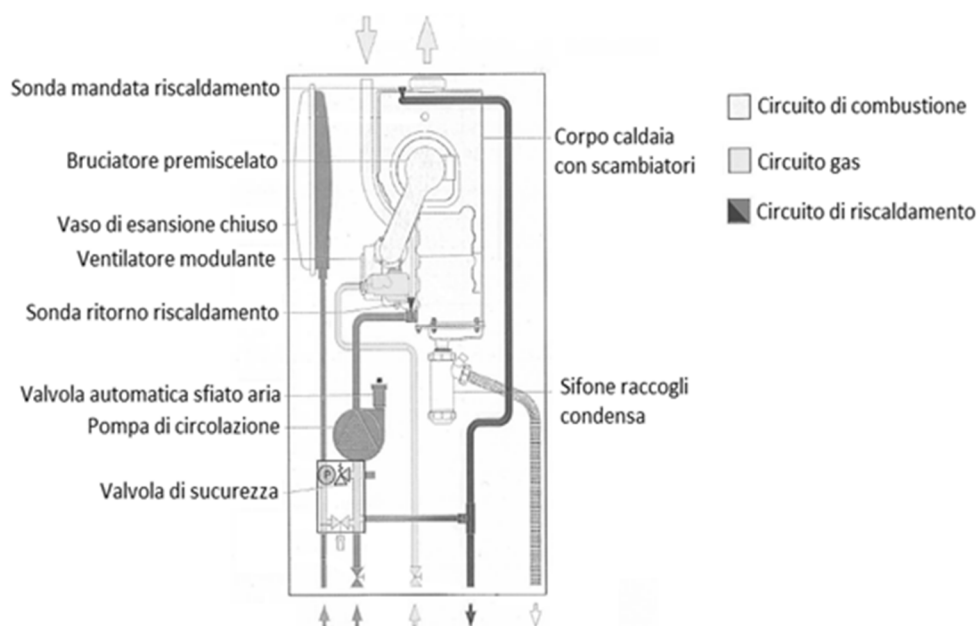


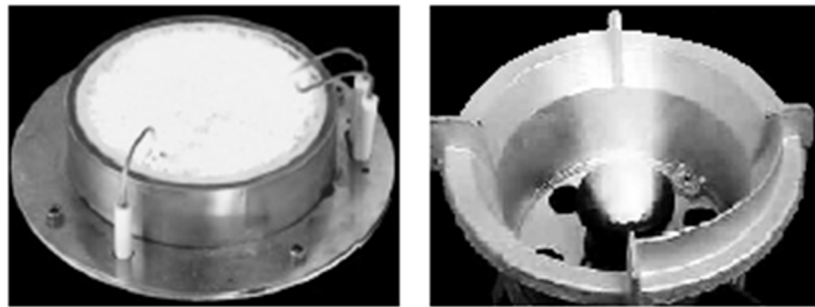
Figura 2 – Schema impiantistico caldaia premiscelata.

I componenti principali di una caldaia quindi sono:

- Il **BRUCIATORE**, dove avviene la combustione. Esso può essere principalmente di due tipi: **SUPERFICIALE**, in cui si distribuisce la fiamma lungo tutta una superficie (che a sua volta può essere piana o cilindrica), in questo caso la fiamma ha tipicamente una lunghezza non molto sviluppata ed è di tipo laminare; oppure il

bruciatore può essere A *GETTO*; in quest'altro caso la fiamma si sviluppa a partire da un unico ugello ed ha una lunghezza più importante. Le fiamme sviluppate invece sono quasi solamente di tipo premiscelato in quanto la dose aria-combustibile viene regolata accuratamente per far sì che la combustione possa essere il più completa possibile e con le minori emissioni inquinanti.

La figura che segue mostra i due diversi bruciatori.



*Figura 3 – Confronto tra un bruciatore superficiale, a sinistra, e uno a getto, a destra. Da notare soprattutto la lunghezza e il colore di fiamma. Nel caso del bruciatore superficiale la fiamma può essere così aderente alla superficie che questa diventa incandescente.*

Sicuramente l'aspetto più importante riguardo ai bruciatori è la loro capacità di produrre una fiamma stabile. Essa è importante sia ai fini di un buon sfruttamento del combustibile, poiché una fiamma stabile comporta una più completa combustione e minori emissioni, sia ai fini della sicurezza in quanto una fiamma non stabile può rischiare di perdersi attraverso il meccanismo del *blow off*, e quindi occorre interrompere l'afflusso di gas per evitare che la sua concentrazione in camera di combustione diventi pericolosa, oppure potrebbe retrocedere verso l'interno del bruciatore con un meccanismo di *flashback* e danneggiare alcuni componenti. Sotto questo punto di vista si va prediligendo il bruciatore superficiale poiché una fiamma laminare è più facile da controllare e stabilizzare.

Un altro aspetto importante per il bruciatore è la sua capacità di modulare la potenza termica sviluppata. Se si considera che la potenza termica media richiesta per il riscaldamento invernale di un'abitazione tipica italiana (in classe energetica D) è di circa 1 – 2 kW, ma che per la produzione istantanea di acqua calda sanitaria può essere necessaria anche una potenza di 15 – 20 kW, si capisce come sia importante per una caldaia poter modulare la potenza prodotta. Il bruciatore deve quindi essere in grado di produrre una fiamma stabile in un determinato range di portate termiche e cioè di portate di miscela aria-combustibile. La parte più critica per la modulazione è quella a basse potenze, in quanto può essere difficile distribuire bene la fiamma anche con basse portate, specialmente se il bruciatore è freddo. Certo però poter modulare la potenza termica prodotta comporta una maggiore efficienza rispetto ad un funzionamento di tipo on-off, motivo per cui tutte le caldaie odierne prevedono un meccanismo di modulazione.

- Il *SISTEMA DI REGOLAZIONE DELLA POTENZA*. Un primo e rudimentale sistema di modulazione della potenza può essere un semplice comando on-off, che però comporta alte perdite di potenza, alte emissioni, un basso livello del comfort percepito ed una aspettativa di vita della caldaia ridotta. La maggior parte delle caldaie moderne può quindi modulare tra il 100% della potenza nominale e il 30%, al di sotto di tale livello interviene nuovamente il comando di on-off. Si stanno comunque diffondendo caldaie in grado di fare regolazione fino al 10% della potenza nominale (regolazione 1:10).

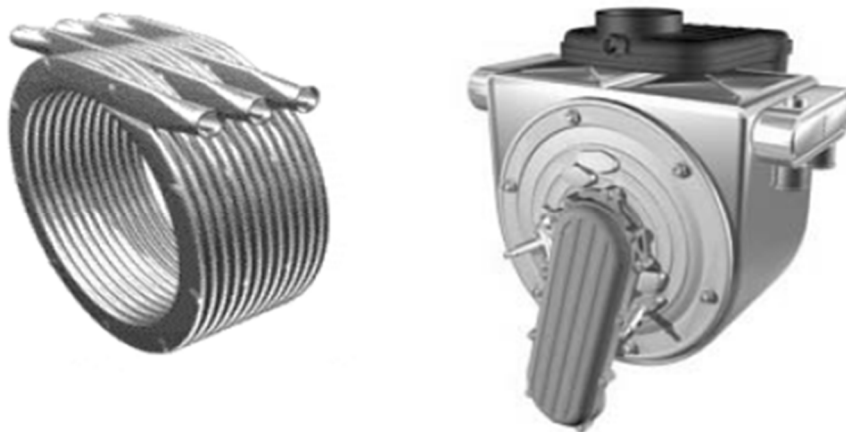
Il più diffuso metodo di regolazione è un controllo di tipo pneumatico: in questo caso si imposta la velocità di rotazione della ventola in base al calore richiesto. La variazione risultante nel

flusso d'aria comporta una variazione della pressione specifica dell'aria, che a sua volta comporta una variazione del flusso di combustibile. La variazione complessiva delle portate di aria e combustibile comporta una variazione della potenza termica prodotta.

- Il *MISCELATORE ARIA-COMBUSTIBILE*. È una camera posta prima della camera di combustione in cui combustibile e comburente possono entrare in contatto e miscelarsi in modo il più omogeneo possibile. Per effettuare la regolazione si utilizza una serie di valvole che sentono la pressione dell'aria e, rispetto a questa, regolano il flusso del combustibile. Generalmente il rapporto di equivalenza non cambia durante i vari stadi di regolazione, ma è possibile modificarlo variando il settaggio delle suddette valvole.
- Lo *SCAMBIATORE DI CALORE*, tipicamente una serpentina in acciaio che è affacciata alla fiamma e al cui interno scorre l'acqua da riscaldare. Negli ultimi decenni, quando si è cercato di migliorare le prestazioni delle caldaie, si è ricorso principalmente a migliorare le prestazioni dello scambiatore, utilizzando ghise più leggere, performanti e con una vita utile più elevata; oppure si è cercato un migliore accoppiamento tra la serpentina dedicata al riscaldamento degli ambienti e quella dedicata alla produzione istantanea di acqua calda sanitaria; oppure ancora si è ricorso a scambiatori in grado di sfruttare anche il calore di condensazione contenuto nei fumi (*CALDAIE A CONDENSAZIONE*). In genere quest'ultima opzione prevede due scambiatori: il *PRIMARIO* è il classico scambiatore gas caldi-acqua fredda, mentre il *SECONDARIO* va a pre-riscaldare l'acqua di alimento in caldaia sfruttando il calore latente presente nei fumi non ancora condensati.

Gli scambiatori usati possono essere di tipo *DIRETTO*, se vi è un contatto diretto tra i gas caldi e l'acqua fredda, *RIGENERATIVI*, se il calore è trasportato attraverso un fluido intermedio che prima riceve il calore dai gas e poi lo cede all'acqua, *A RECUPERO*, se vi è una parete che separa i due flussi e attraverso cui passa il calore. Questi ultimi sono la soluzione più comune.

Anche la forma dello scambiatore può cambiare molto da modello a modello di caldaia e ovviamente influisce sullo scambio termico. La soluzione più tipica vede un unico tubo avvolto a spirale attorno alla fiamma; nella figura seguente si vede prima il solo scambiatore e poi l'accoppiamento con il bruciatore.



*Figura 4 – Scambiatori di calore a spirale. Il bruciatore viene inserito nella portella che chiude lo scambiatore di destra e si sviluppa, in genere, assialmente allo scambiatore stesso. La spirale può prevedere un solo rango di tubazione o più ranghi in parallelo.*

Molto comune è anche la soluzione con scambiatore a tubi alettati, meno comuni invece sono gli scambiatori a piastre.



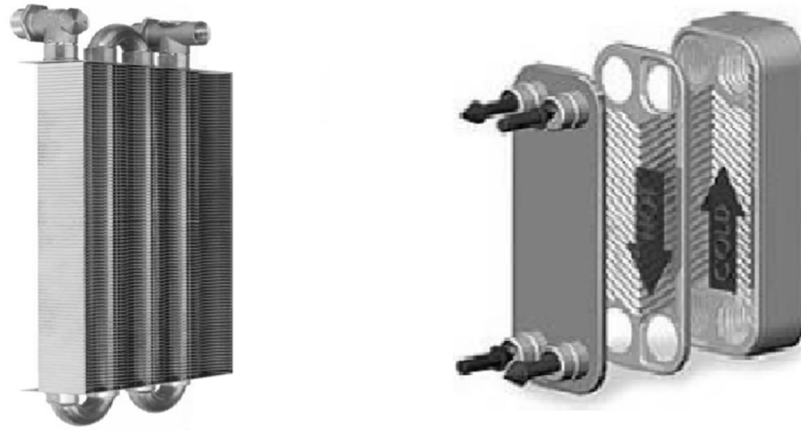


Figura 5 – Scambiatore alettato sulla sinistra. Scambiatore a piastre sulla destra.

- Il *VASO DI ESPANSIONE*, in caso l'acqua arrivi ad ebollizione il vaso di espansione serve come sicurezza per non mandare tutto il circuito ad una pressione troppo alta.
- Il *VENTILATORE* regola il flusso di aria in ingresso e/o in uscita dalla caldaia.
- La *POMPA* per la circolazione dell'acqua, se la caldaia è a circolazione forzata.
- Il *CAMINO*, verso cui convogliare i fumi della combustione.
- I numerosi *SENSORI* e *VALVOLE*, per tenere sotto controllo la richiesta termica, la temperatura di combustione, le emissioni prodotte, il flusso d'acqua, ...
- Il *QUADRO DI COMANDO* esterno per poter controllare il funzionamento di tutto l'apparecchio.

In generale possiamo dire che una caldaia deve essere efficiente, nel senso che deve ricavare il più possibile dall'energia che le viene immessa, e "dimenticabile" da parte dell'utente. Forse quest'ultimo punto è il più importante per il consumatore finale; sotto questa

caratteristica ricadono l'affidabilità della caldaia, che nell'immaginario del compratore deve essere eterna, la sua capacità e velocità nell'adattarsi alle richieste di carico, e quindi la sua modulabilità, e la possibilità di sistemarla un po' ovunque. In quest'ottica le caldaie odierne sono di limitate dimensioni, anche sistemabili dentro un armadio per non avere alcun impatto visivo, ma soprattutto devono essere più silenziose possibili, cioè devono poter essere poste anche in prossimità di camere da letto senza che l'occupante venga disturbato. Quello dell'acustica però non è un problema da nulla. Si è infatti riscontrato che, in particolari condizioni geometriche ed ambientali, le onde generate dalla fiamma nella camera di combustione possono portare a vibrare anche lo scambiatore di calore o altri pezzi della caldaia e, se questa vibrazione entra nel campo delle frequenze udibili, possono anche portare a fastidiose rumorosità come fischi, pulsazioni o vibrazioni.

Per quanto riguarda l'efficienza della caldaia, come già citato sopra, le caldaie odierne sono praticamente tutte *a condensazione*, cioè sfruttano anche il calore latente liberato dalla condensazione dei fumi. In questo modo si può ottenere un rendimento di caldaia superiore al 90% (anche superiore al 100% se lo si va a calcolare a partire dal potere calorifero inferiore) ed abbassare l'emissione di sostanze inquinanti. Si presenta però il problema che la condensa dei fumi può essere corrosiva, quindi i materiali con cui sono realizzati lo scambiatore e la vasca di raccolta della condensa devono essere resistenti a tali sostanze. Di seguito possiamo vedere un semplice schema che confronta una caldaia tradizionale con una a condensazione.

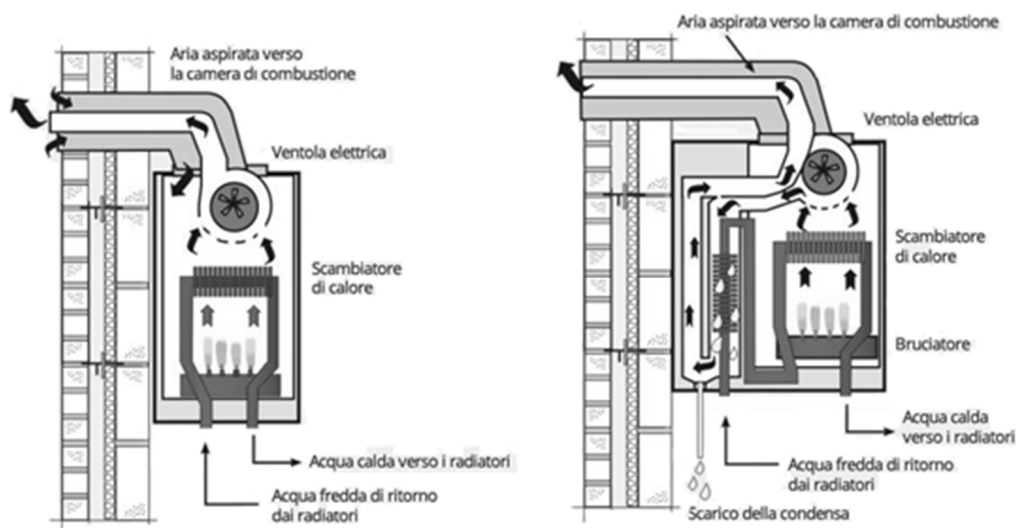


Figura 6 – Confronto tra una caldaia tradizionale, sulla sinistra, e una a condensazione, sulla destra. Da notare come nella prima soluzione i fumi passano attraverso lo scambiatore di calore e poi scaricati all’ambiente. Nella seconda soluzione invece i gas di scarico, dopo essere passati nello scambiatore primario, attraversano anche uno scambiatore secondario che preriscalda l’acqua di ritorno utilizzando il calore latente.

Infine, nella tabella qui sotto, vengono proposte le caratteristiche tipiche dello stato dell’arte di alcune caldaie odierne per uso domestico.

CALDAIA	POTENZA NOMINALE kW	RAPPORTO DI MODULAZIONE	RENDIMENTO NOMINALE %	EMISSIONI NOx mg/kWh
VAILLANT atmo TEC exclusive VMW	25	1,9 : 10	93,7	26-39
VISSMAN Vitodens 222-W	35	0,5 : 10	98	< 100
BERETTA Meteo MIX 24	26,3	1 : 10	88	23-36
LAMBORGHINI FL 24 MCA	25	3 : 10	91	< 150
<b>MEDIA</b>	<b>20 - 35</b>	<b>1 : 10</b>	<b>&gt; 90%</b>	<b>almeno &lt;150 in alcuni casi anche &lt;50</b>

Tabella 1 – Caratteristiche dello stato dell’arte delle caldaie odierne.

Queste caratteristiche rispettano ampiamente i limiti di legge che, per quanto riguarda le caldaie domestiche sono molto più restrittivi sul fattore manutenzione che sulle emissioni. Infatti, per una caldaia domestica (di potenza inferiore ai 35 kW), la norma UNI 10389 impone

un limite per le emissioni di CO pari a 1000 ppm (riferito allo 0% di ossigeno, per evitare che i fumi vengano diluiti prima della misura, falsandone i risultati) ma, data la sua tossicità, è bene rimanere entro valori molto più contenuti come gli 80 ppm e meno (basti pensare che 35 ppm è la concentrazione massima per la quale non si hanno effetti su di una persona esposta per 8 ore continue [Expoclima]).

Per quanto riguarda gli ossidi di azoto non vi è un limite massimo di emissione per queste caldaie; un valore di soglia è stato inserito dalla regione Piemonte per gli apparecchi dislocati nel suo territorio, pari a 80 mg/kWh riferiti al 5% di O<sub>2</sub>. Si fa però riferimento alla norma UNI EN 15502 per definire la classe di appartenenza dell'apparecchio in base al livello di emissioni di NO<sub>x</sub> su base NCV (Net Calorific Value) o GCV (Gross Calorific Value):

CLASSE DI NOX	NOX MAX EMESSI IN MG/KWH, BASATI SU NCV	NOX MAX EMESSI IN MG/KWH BASATI SU GCV
1	260	
2	200	
3	150	
4	100	
5	70	
6		56

*Tabella 2 – Classi di emissione NO<sub>x</sub> per le caldaie domestiche, secondo normativa UNI EN 15502*

Il valore delle emissioni da confrontare con la tabella per la determinazione della classe di appartenenza è quello che risulta dalla somma pesata delle emissioni rilevate a vari carichi termici, secondo la seguente formula:

$$NOx = 0.15 * NOx_{70\% Pmax} + 0.25 * NOx_{60\% Pmax} + \\ + 0.30 * NOx_{40\% Pmax} + 0.30 * NOx_{20\% Pmax} .$$

Inoltre, la normativa UNI 10389-1:2009 fissa anche i limiti per quanto riguarda il rendimento di combustione dei generatori di calore e per l'indice di fumosità dei soli apparecchi alimentati con combustibili liquidi. Per le caldaie di nuova costruzione i rendimenti di combustione, alla massima potenza nominale del focolare e in condizioni di normale funzionamento, devono rispettare dei limiti che dipendono dalla potenza, dal fluido vettore e dal tipo di caldaia e in ogni caso devono essere superiori al 90% per gli apparecchi standard e al 92% per quelli a condensazione. L'indice di fumosità invece si riferisce alla fuliggine (particolato) che si deposita nei condotti del camino. La misura di questo indice deve rispettare il limite di 2 della scala di Bacharach per almeno 2 delle 3 prove che si devono eseguire; in caso contrario si deve provvedere alla pulizia dei condotti.

Infine si deve provvedere anche a verificare che il tiraggio del camino non sia mai inferiore a 3 Pa.

Tutte queste verifiche vanno fatte obbligatoriamente al momento di installazione della caldaia e a intervalli regolari come segnato in tabella:

Tipologia di impianto	Alimentazione	Potenza termica (kW)	Cadenza controlli (anni)
Impianti con generatore di calore a fiamma	Combustibile liquido o solito	$10 < P < 100$	2
		$P \geq 100$	1
	Combustibile gassoso, metano o GPL	$10 < P < 100$	4
		$P \geq 100$	2

*Tabella 3 – Cadenza dei controlli di efficienza energetica alle caldaie, previsti dalla normativa UNI 10389-09. La cadenza dei controlli dipende dalla potenza dell'apparecchio installato e dal tipo di combustibile impiegato.*



### 3. BRUCIATORI PREMISCELATI

I classici bruciatori premiscelati sono costituiti da una lamiera di acciaio tranciata in modo da creare diversi ugelli, più o meno ravvicinati, dai quali esce la miscela aria-combustibile e oltre i quali si sviluppa la fiamma, come getti distinti nel caso di ugelli ben distanziati, o come fronte di fiamma compatto nel caso di ugelli ravvicinati.

Esistono diverse tipologie di bruciatori premiscelati. In questo elaborato si prenderanno a confronto bruciatori tradizionali tranciati in 2D, bruciatori in acciaio tranciato in 3D e bruciatori porosi.

Un bruciatore poroso presenta una matrice non compatta ENTRO o OLTRE la quale la miscela infiammabile può sviluppare la fiamma. Il risultato è un fronte di fiamma unico, molto più omogeneo di quello generato da vari ugelli ravvicinati, e con migliori caratteristiche dal punto di vista sia della stabilità sia delle emissioni. A loro volta i bruciatori porosi si possono suddividere in diverse categorie in base al tipo di materiale e alla forma della matrice. Esistono quindi bruciatori a fibra metallica, tessuta, a maglia o sinterizzata, e bruciatori a matrice ceramica, a schiuma, a nido d'ape, in elementi discreti o ancora sinterizzata.

Nel capitolo che segue verranno descritti vari tipi di bruciatore, le loro applicazioni, i loro metodi di lavorazione, e i loro costi produttivi.

### 3.1. BRUCIATORI STANDARD: ACCIAIO TRANCIATO

Come già detto, i classici bruciatori premiscelati che si trovano in commercio sono generalmente realizzati sagomando e forando una lastra d'acciaio.



*Figura 7 - Bruciatori premiscelati in acciaio tranciato*

Questa soluzione ha il vantaggio che l'acciaio è facilmente lavorabile e quindi i bruciatori possono assumere svariate forme per adattarsi a diverse soluzioni. Bruciatori di questo tipo infatti si possono trovare applicati a caldaie e scaldabagni domestici, ai fornelli di una cucina, ai generatori di aria calda e a molte applicazioni industriali di tipo leggero.

Altro vantaggio di questi bruciatori è l'elevata capacità di modulazione del carico. Specialmente nel settore del riscaldamento, oramai si richiede una modulazione sempre più spinta e questi bruciatori sono in grado di adattarsi bene a tale richiesta. In questi casi, più la potenza termica

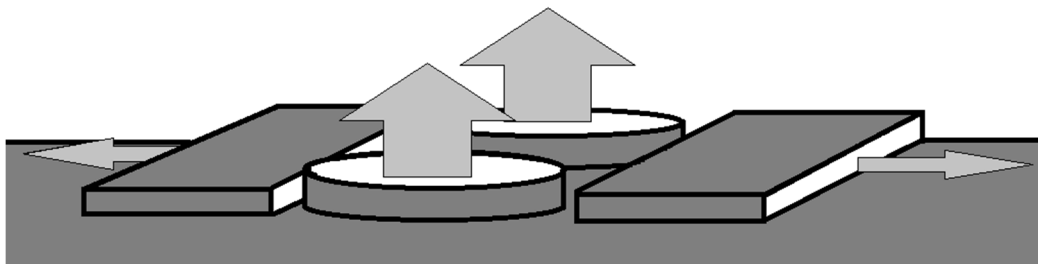


richiesta è alta, più è alta la portata di miscela che viene spinta attraverso gli ugelli e più la fiamma che si genera è lunga e distaccata dalla superficie d'acciaio; la soglia massima oltre la quale non si può andare è segnata dal fenomeno del blow-off in cui la portata di gas è talmente elevata da spegnere la fiamma stessa. Dall'altra parte, minore è la portata termica richiesta, minore è la quantità di gas che viene spinta attraverso gli ugelli del bruciatore e quindi la fiamma che si genera è corta e attaccata alla superficie. Il limite massimo in questo verso è segnato da due fenomeni: lo spegnimento della fiamma a causa delle basse portate termiche e la possibilità di flashback, in cui la fiamma procede verso il bruciatore più velocemente della fuoriuscita della miscela, si può quindi arrivare ad avere un rientro della fiamma all'interno dello stesso bruciatore con conseguenze anche molto gravi. Prima di questo fenomeno, comunque sempre da evitare, questo tipo di bruciatori trova anche un altro limite, di tipo fisico, nella resistenza dell'acciaio alle alte temperature imposte dal contatto ravvicinato con la fiamma, questo infatti può subire importanti deformazioni legate al calore. Nella progettazione di questi bruciatori si devono quindi tenere in considerazione le possibili deformazioni, anche considerevoli, che possono subire; sia in quanto allo spazio che tali deformazioni andranno ad occupare e che quindi deve essere lasciato libero, sia in quanto ai vicoli meccanici presenti che possono venire sollecitati (questi specialmente nel caso di bruciatori piani che possono "spanciare").

Si può dire quindi che la difficoltà maggiore che possono trovare i bruciatori premiscelati ad acciaio tranciato sta appunto nel seguire i diversi carichi richiesti; infatti non è detto che un bruciatore ottimizzato per le basse portate (condizione in cui può verificarsi il fenomeno più critico di flashback) sia in grado di garantire una combustione stabile anche per le alte portate e viceversa.

Un ultimo vantaggio per questi bruciatori è sicuramente il prezzo. L'acciaio è facile da reperire e da lavorare, inoltre le tecnologie in questo senso sono mature.

Fa sempre parte dei bruciatori in lamiera tranciata un nuovo tipo di bruciatori premiscelati. In questo caso la lamina d'acciaio non è semplicemente forata, ma viene anche ripiegata su sé stessa per formare un ugello per l'uscita del gas tridimensionale. Questi bruciatori 3D fanno in modo di creare, oltre ad un normale ugello, anche un ugello più piccolo ad esso affiancato da cui esce un quantitativo di miscela molto minore e da cui quindi si sviluppa una fiamma più piccola che ancora e stabilizza quella di dimensioni più importanti che esce dall'ugello principale.



*Figura 8 – Schema semplificato del bruciatore in lamiera 3D*

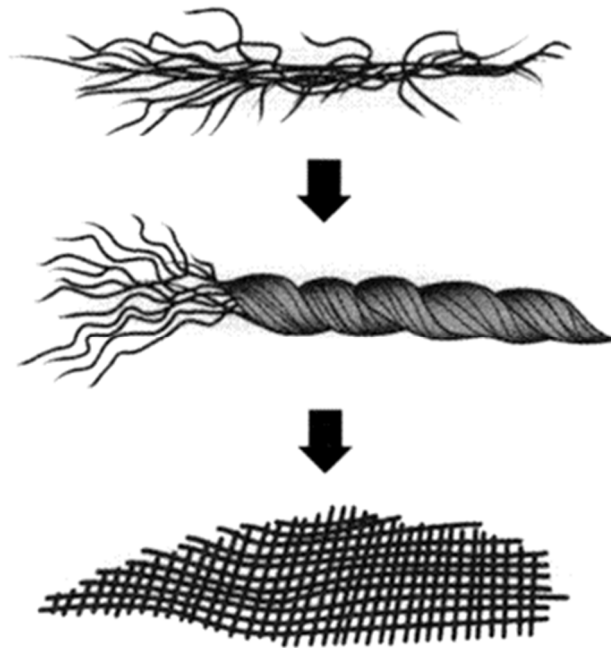
Il risultato di questa configurazione è quindi quello di modulare in modo più spinto le varie portate termiche e di ridurre le emissioni inquinanti.

### **3.2. BRUCIATORI POROSI: FIBRA METALLICA**

Nella grande famiglia dei bruciatori porosi bisogna fare una prima importante distinzione in base al materiale della matrice, che può essere una lega metallica (solitamente FeCrAl) oppure a base ceramica (solitamente SiC).

Le matrici a lega metallica a loro volta si possono suddividere in base a come il metallo viene lavorato per creare la struttura porosa. Le soluzioni più tipiche sono:

- La lega può essere lavorata in modo da creare un FILAMENTO METALLICO tanto fine da poter essere intrecciato in fili più grossi che poi vengono tessuti con dei veri e propri telai.



*Figura 9 – I vari filamenti metallici vengono intrecciati assieme ad altri filamenti plastici per formare i vari fili che poi vengono tessuti a telaio. Una volta che il tessuto viene a contatto con il fuoco, i filamenti plastici si sciolgono e vengono così eliminati lasciando anche una percentuale del 70% di vuoto all'interno dei vari fili.*

Il tessuto finale può quindi ottenere la forma, lo spessore e anche lo spazio vuoto tra le varie trame che più si desidera. Si possono inoltre seguire i principali schemi di tessitura utilizzati per le stoffe a seconda della resistenza, flessibilità e spessore che si vogliono ottenere. Il risultato finale può quindi essere una *TELA*, una *SAIO* o un *SATIN*:

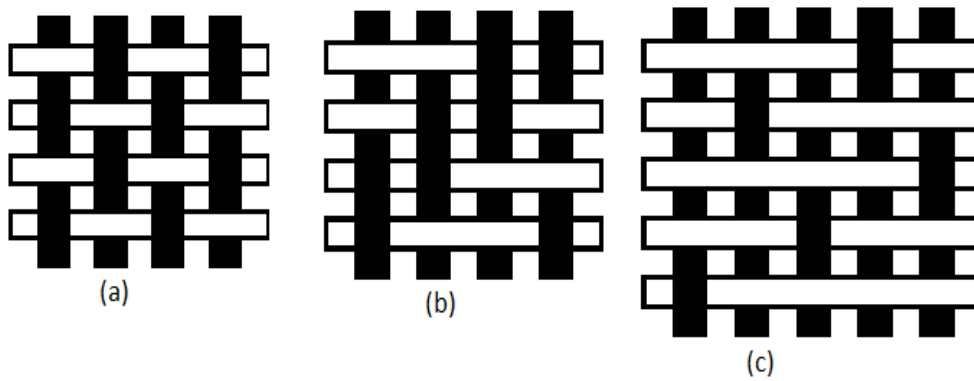


Figura 10 – Tessuto a telaio con intreccio a tela (a), a saio (b) e a satin (c).

Si possono inoltre ottenere anche “stoffe” più tridimensionali intrecciando i fili a maglia, in questo caso il risultato finale ricorda la stoffa dei maglioni, in cui si hanno delle coste più alte e delle valli tra le varie file di coste. Anche per questo tipo stoffa si hanno diverse lavorazioni possibili, derivanti dalla tradizione tessile. I punti più comuni sono il punto rasato dritto e quello rovescio:

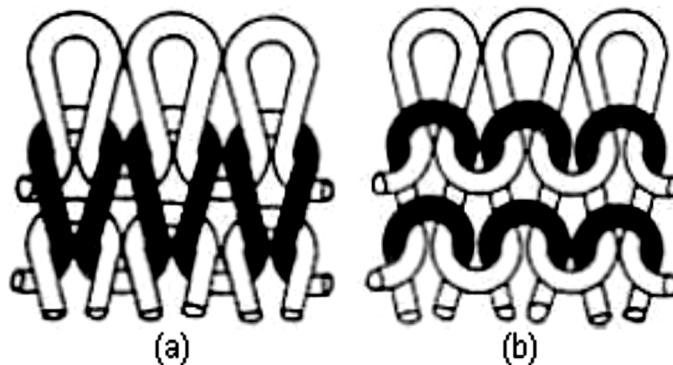
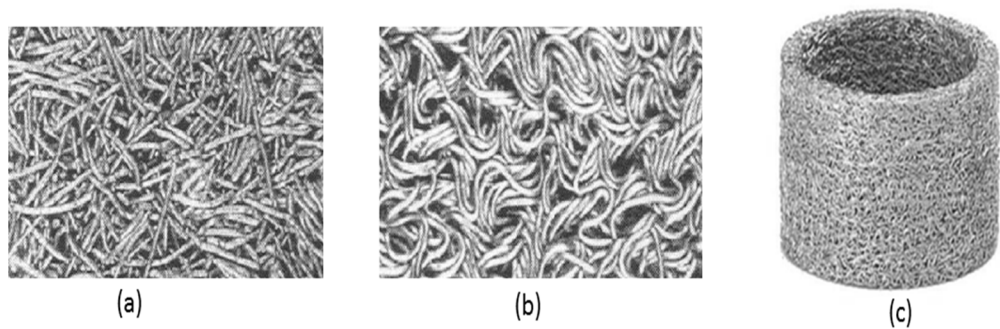


Figura 11 – Tessuto a maglia con punto rasato dritto (a) e punto rasato rovescio (b).

- La lega metallica può essere anche SINTERIZZATA in modo da creare come una spugna metallica dotata di una certa porosità. La sinterizzazione avviene a pressione ambiente o ad alta pressione, portando ad alte temperature elementi solidi (“polveri”) che non arrivano però a fondersi del tutto ma che riescono comunque a legarsi. Per la creazione degli spazi vuoti e per dare la forma all’oggetto si usano in genere leganti polimerici che vengono poi eliminati dalle alte temperature in gioco o rimossi manualmente. Il risultato finale ha già

la forma definitiva e non è più lavorabile come invece avviene per il filamento.



*Figura 12 - Metallo sinterizzato in modo poroso: (a) mostra il risultato della sinterizzazione di particelle corte, (b) di particelle lunghe e (c) mostra un pezzo finito già con la forma richiesta.*

Bruciatori porosi a fibra metallica hanno quindi il vantaggio di essere meccanicamente resistenti e adattabili a svariate soluzioni. Inoltre, grazie alle cavità d'aria al loro interno riescono a creare una barriera termica contro il calore della fiamma e a proteggere il materiale sottostante: ecco perché molte volte sono montati su di una lamiera d'acciaio tranciata in modo da permettere che la fiamma resti più attaccata alla superficie del bruciatore senza rovinarlo. Bisogna in ogni caso sempre ricordare che questi materiali hanno una temperatura limite oltre a quale non possono lavorare (1200 °C per il FeCrAl), per questo motivo non vengono generalmente usati in bruciatori porosi volumetrici.

La lega FeCrAl, tessuta o sinterizzata, trova quindi principalmente applicazione in bruciatori superficiali in cui la fiamma resta ancorata alla superficie o subito sopra di essa e raramente viene fatta rientrare all'interno delle cavità.

Bruciatori di questo tipo sono generalmente quelli adottati all'interno di caldaie e scaldabagni [Vedi test condotti nel capitolo 6]. Possono inoltre trovare applicazione in bruciatori superficiali radianti<sup>2</sup> e in bruciatori

---

<sup>2</sup> [S. A. Leonardi, R. Viskanta, J. P. Gore, "Radiation and thermal performance measurements of a metal fiber burner" (2001)]

superficiali catalitici<sup>3</sup>. Non sono adatti invece per applicazioni in cui possano entrare in contatto con dello sporco, come nei fornelli di una cucina, perché la natura porosa li rende difficili da pulire e lo sporco andrebbe ad ostruire le cavità inserendo perdite di carico aggiuntive e impedendo una completa combustione della miscela.

Oltre alla lega in FeCrAl si possono trovare anche leghe a base di Nickel, studiate per operare ad alte temperature (il punto di fusione di queste superleghe è di poco inferiore ai 1330 °C) e utilizzate principalmente in bruciatori superficiali radianti.

Più raro ma comunque possibile è l'utilizzo di acciai inossidabili, che però non mantengono buone proprietà meccaniche e anti corrosive ad alte temperature.

In ditta Polidoro (collaboratrice per questa tesi), fatto 100 il costo di un bruciatore premiscelato standard in acciaio, un bruciatore rivestito in fibra metallica (tessuta o a maglia) viene a costare circa 2-300. Poiché questa soluzione ha un costo non indifferente, è quindi da valutare attentamente se e quando può portare a risultati tali da giustificare il costo.

### **3.3. BRUCIATORI POROSI: MATERIALI CERAMICI**

Per quanto riguarda i materiali ceramici, essi vengono solitamente utilizzati per creare bruciatori porosi volumetrici (cioè di grandi spessori), nei quali la fiamma viene appositamente fatta rientrare all'interno della matrice. Una combustione all'interno del mezzo poroso porta ad un riscaldamento

---

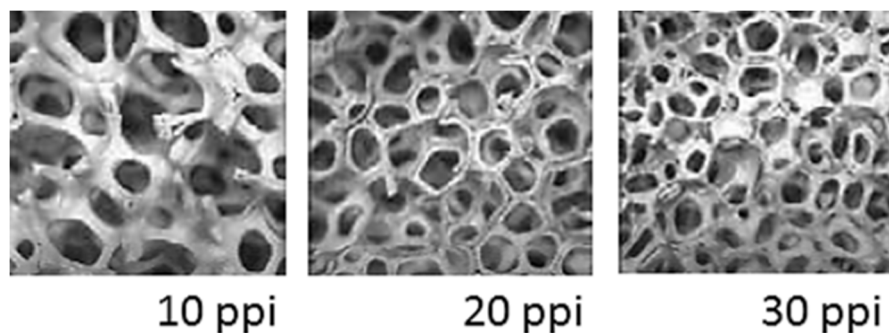
<sup>3</sup> [I. Cerri, M. Pavese, G. Saracco, V. Specchia, "Premixed metal fiber burners based on a Pd catalyst" (2003)]

del bruciatore stesso per irraggiamento e conduzione e quindi a un preriscaldamento della miscela infiammabile per mezzo degli stessi fenomeni di trasporto di calore, oltre che per convezione con i fumi caldi all'interno dei pori. Una miscela preriscaldata oltre le normali temperature di esercizio porta ad un'estensione del limite inferiore di infiammabilità, che a sua volta porta alla possibilità di impiegare un volume inferiore di combustibile e quindi alla possibilità di fare una modulazione a più basse potenze termiche, oltre che ad un risparmio di combustibile.

Un altro vantaggio della combustione interna al mezzo poroso sta nelle relativamente basse temperature di fiamma (dato che il calore prodotto è continuamente ceduto alla matrice), che permettono di mantenere bassi i livelli di NOx prodotti.

Anche per i bruciatori porosi ceramici esistono diverse configurazioni di forma e struttura da dare alla matrice. I casi più comuni sono:

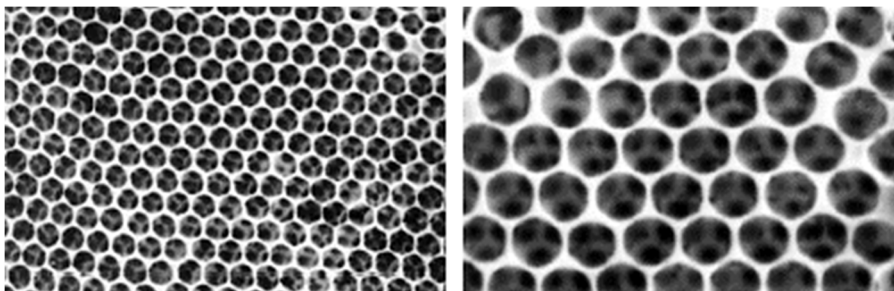
- **SCHIUMA:** la matrice viene ad assumere l'aspetto di una spugna in cui varie celle di forma e dimensione irregolari sono collegate tra loro in modo da garantire comunque un passaggio alla miscela. Queste schiume si distinguono poi in base alla grandezza dei pori e al loro numero; si indica con ppi (pores per inch) il numero di cavità presenti in un pollice lineare. Questa quantità può dare un'idea sia della grandezza media dei vari pori sia della loro densità.



*Figura 13 – Diversi campioni di schiuma ceramica con le relative misure di porosità in ppi.*

La schiuma può essere prodotta colando il carburo di silicio sopra una struttura porosa polimerica, che poi viene rimossa con il calore. Può essere ottenuta unendo alla miscela ceramica liquida dell'amido o della farina in acqua distillata e lasciando solidificare, l'amido contribuirà alla formazione delle bolle d'aria all'interno. Ancora si può rendere schiumoso direttamente il materiale ceramico liquido e poi lasciarlo solidificare. Un altro modo è quello di unire alla miscela ceramica liquida dei monomeri idrosolubili e agenti schiumosi: una volta formatasi la schiuma il tutto si solidifica velocemente grazie alla polimerizzazione dei monomeri.

- **RETICOLO A NIDO D'APE:** in questo caso i pori sono tutti della stessa dimensione e equidistanti. Anche in questo caso la porosità può essere espressa in ppi.

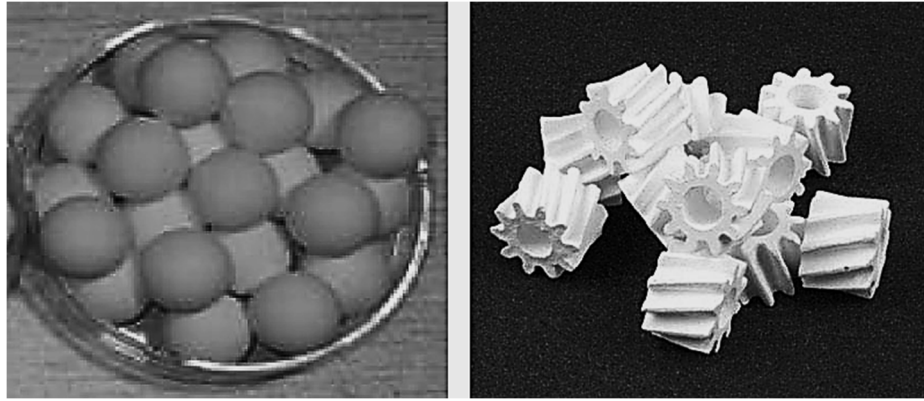


*Figura 14 – Due diversi ingrandimenti della stessa matrice ceramica a nido d'ape, la porosità è di 10 ppi.*

In genere il nido d'ape viene ricavato colando il materiale ceramico sopra in uno stampo riempito di sfere polimeriche che poi vengono distrutte con il calore.

- **ELEMENTI DISCRETI:** in questo caso la matrice porosa non è altro che un recipiente riempito con elementi ceramici di varie forme (sfere o elementi più complessi). La porosità è data dallo spazio vuoto tra elemento ed elemento.





*Figura 15 – Esempi di elementi discreti ceramici che vanno a comporre la matrice porosa. Le sfere sulla sinistra hanno un diametro di 13 mm e gli elementi sulla destra hanno una dimensione massima di 15 mm.*

Generalmente questi pezzi sono prodotti per colata in stampo o per sinterizzazione.

- Infine il mezzo ceramico può anche essere SINTERIZZATO in filamenti disorganizzati ma che però creano una forma definita, così come accade con la fibra metallica.

Oltre che in carburo di silice (SiC) le matrici ceramiche possono essere composte da allumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) o da zirconia ( $\text{ZrO}_2$ ). La prima in genere è preferita nelle applicazioni con i bruciatori poiché ha migliori proprietà di trasporto termico ed è più resistente agli shock termici.

Rispetto ai bruciatori porosi a fibra metallica, i ceramici hanno il vantaggio che possono arrivare a temperature molto alte (tranquillamente sopra i  $1500\text{ }^\circ\text{C}$ ), quindi sono adatti ad ospitare la fiamma al loro interno. Sono però più fragili e quindi non sono adatti ad applicazioni in cui siano presenti vibrazioni o stress termici importanti. Ad esempio una caldaia domestica che lavora a carichi sempre variabili potrebbe portare a microfratture nella matrice dovute alle continue deformazioni che il materiale subisce scaldandosi e raffreddandosi. Per questi motivi bruciatori a matrice ceramica sono generalmente impiegati come bruciatori radianti (la matrice

può anche tranquillamente diventare incandescente) operanti a carichi stazionari. Le applicazioni più classiche sono nell'industria alimentare o della carta come essiccatori, grazie alla loro capacità di emettere nello spettro dell'infrarosso, e come mezzo di illuminazione.

Per quanto riguarda i costi di produzione essi sono specifici al tipo di lavorazione che si desidera compiere. Possiamo però dare una valutazione approssimativa del costo delle materie prime<sup>4</sup>, da cui si può ricavare una prima stima:

- SiC sinterizzato 15 €/kg
- SiC infiltrato 7 €/kg
- Allumina 5 €/kg
- Zirconia 75 €/kg

Già da questi primi valori si può comprendere come il prezzo di una mattonella porosa ceramica possa non essere indifferente. Ovviamente tali valori variano con il mercato e quindi la loro stima è solo qualitativa piuttosto che quantitativa.

### **3.4. APPLICAZIONI PARTICOLARI**

Un'applicazione domestica è stata studiata da *Delalic et al.*<sup>5</sup>; essi hanno condotto esperimenti e analisi con bruciatori a mezzo poroso ceramico

---

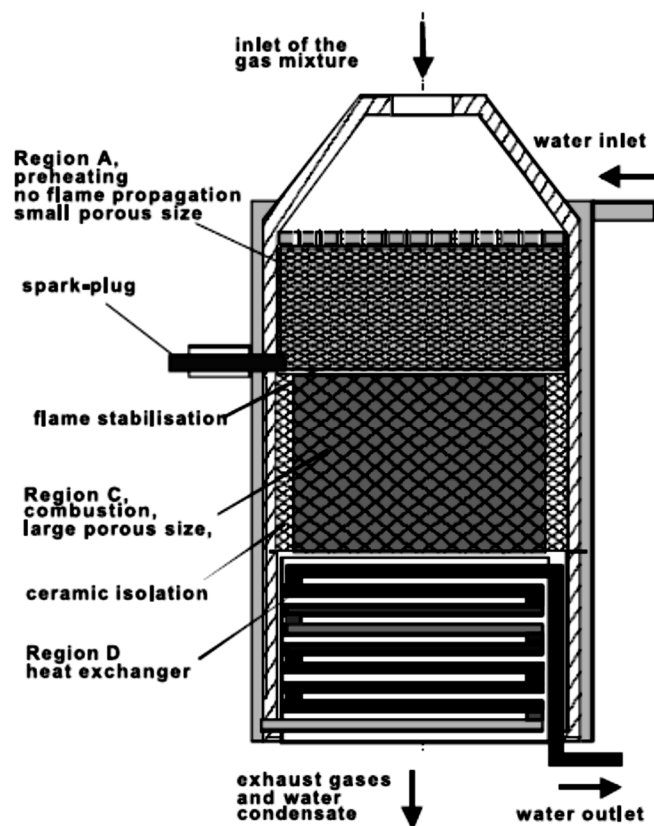
<sup>4</sup> Valori presi da "Extrusion in Ceramic" di Frank Handle.

<sup>5</sup> Porous media compact heat exchanger unit – experiment and analysis (2004)

incorporati in scambiatori di calore per essere impiegati in caldaie a maggiore efficienza energetica (con diminuzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>).

Per far ciò Delalic riformula l'intero sistema caldaia, che non ha più nulla in comune con quelle in circolazione sul mercato. Il bruciatore in questione è composto da più regioni porose in cascata, la prima ha fori così piccoli da non permettere lo sviluppo della fiamma e quindi funge solamente da mixer tra l'aria e il combustibile; nella seconda regione la fiamma può avere luogo e il mezzo ceramico che la ospita diventa incandescente tanto da irraggiare verso lo scambiatore di calore posto subito sotto di esso. Quest'ultimo inoltre riceve calore anche dai fumi caldi che lo attraversano e dall'acqua che condensa lungo le due pareti.

Uno schema del complesso bruciatore-scambiatore è dato nell'immagine sottostante, estrapolata dall'articolo di Delalic.



*Figura 16 – Schema del complesso bruciatore-scambiatore progettato da Delalic per ottenere un sistema di riscaldamento domestico più efficiente*

Altre soluzioni ancora a livello di studio sono quelle relative ai motori a combustione interna: *Weclas*<sup>6</sup> ha studiato come un sottile mezzo poroso inserito in un cilindro dotato di pistone possa permettere il recupero di calore e entalpia dalla reazione di combustione, favorendo un aumento di entalpia della miscela di partenza e un superamento della temperatura adiabatica di combustione (combustione super-adiabatica).

La figura seguente indica la configurazione proposta.

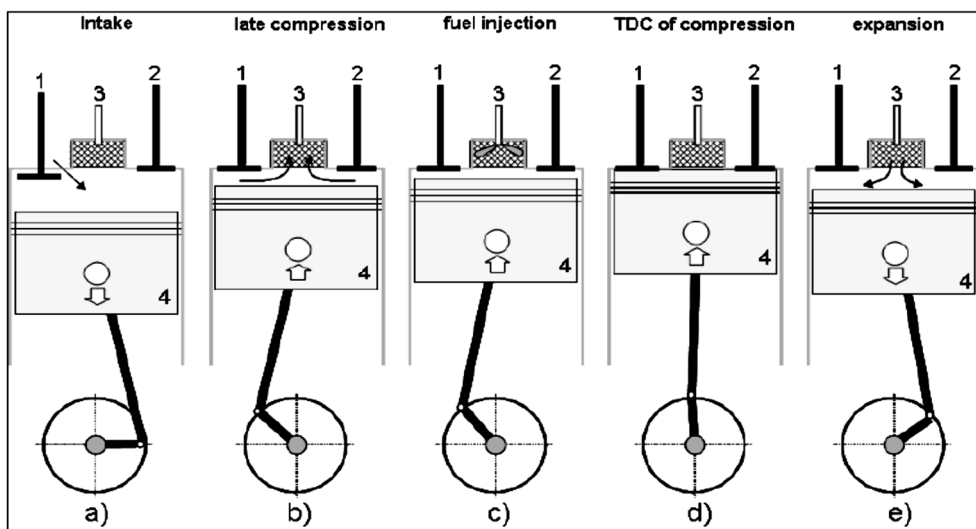


Figura 17 – Possibile configurazione del motore a combustione interna con mezzo poroso proposta da Weclas

Per la loro capacità di bruciare miscele magre (con una scarsa percentuale di combustibile), per le alte temperature raggiungibili e per le basse emissioni inquinanti, bruciatori ceramici porosi sono stati studiati anche per applicazioni a turbine a gas, sia stazionarie [Ellzey e William (2003)] che di propulsione [Noordally et al. (2004)]. In questi casi il materiale ceramico viene ricercato soprattutto perché non necessita di asportazione di calore (che invece accade con le turbine tradizionali); ma vede il suo limite nella sua fragilità, infatti queste macchine subiscono continue sollecitazioni che

<sup>6</sup> [“Potential of porous medium combustion technology as applied to internal combustion engines” ]

non sarebbero sopportabili dal materiale ceramico. Alcune soluzioni si sono trovate nel rivestire la macchina di vere e proprie mattonelle ceramiche porose poiché le piccole dimensioni superficiali permettono al materiale di non subire stress meccanici troppo elevati.

Un'altra applicazione che si vuole citare è quella legata a generatori termofotovoltaici [K. Qiu et al.<sup>7</sup>]. In questo caso il bruciatore in matrice porosa viene utilizzato per ottenere radiazione luminosa per azionare particolari celle fotovoltaiche sensibili allo spettro prodotto. Qiu propone due tipologie di impianto con due diversi tipi di bruciatore poroso, le immagini che seguono riportano i due schemi impiantistici.

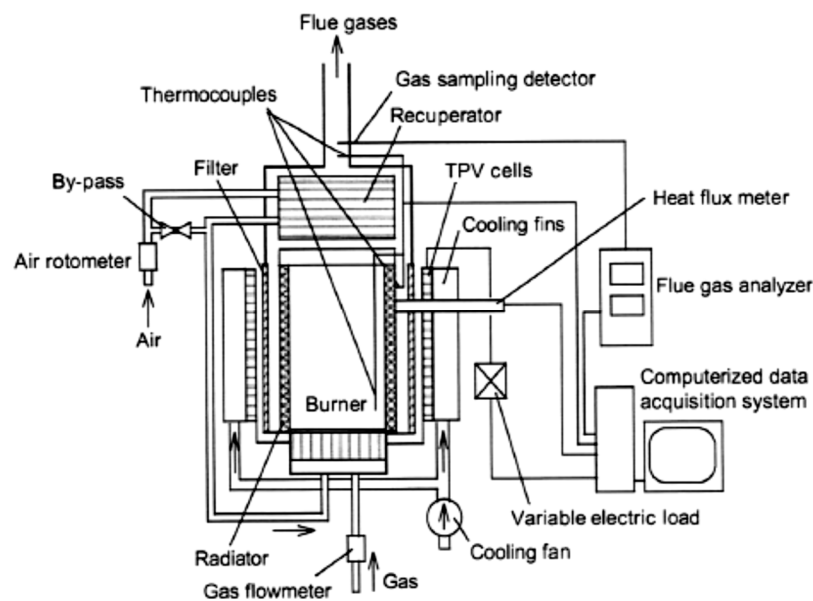


Figura 18 – TPV cogeneration setup using non-surface combustion radiant burner and GaSb TPV cells<sup>5</sup>

<sup>7</sup> [“Termophotovoltaic power generation system using natural gas-fired radiant burners” (2006)]

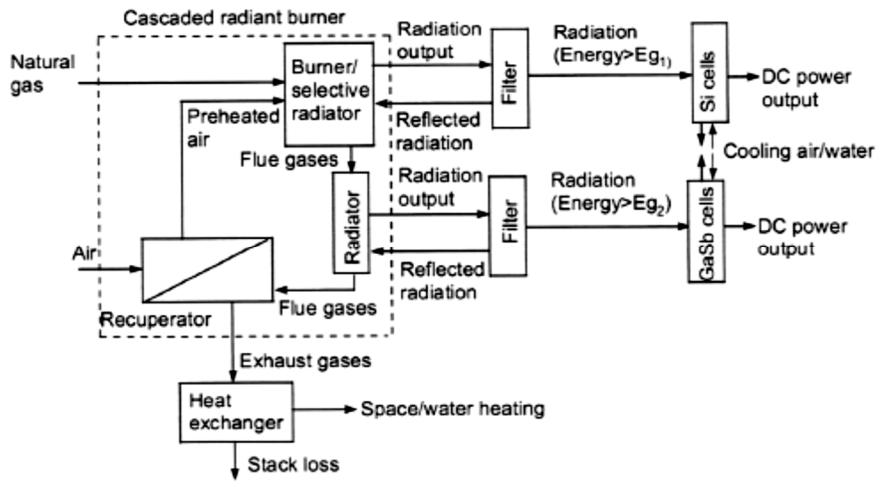


Figura 19 – Flow diagram of integrated TPV system based on cascaded radiant burner <sup>5</sup>

## 4. POLIDORO

Questa tesi è stata scritta in collaborazione con la ditta POLIDORO spa di Schio presso la quale è stato svolto un tirocinio. La ditta è esperta nelle tecnologie connesse al gas e produce sistemi e componenti per applicazioni domestiche ed industriali.

### 4.1. LA DITTA

La ditta POLIDORO è stata fondata a Schio nel 1945 dai fratelli Aldo e Silvio Polidoro e oggi annovera anche una divisione produttiva negli Stati Uniti e una in Turchia, oltre a una rete di distribuzione che copre molti paesi europei, la Russia e l'Australia.

POLIDORO progetta e realizza bruciatori a gas a copertura di tutte le necessità del mercato. Il dipartimento "*Ricerca e Sviluppo*" è uno dei pilastri su cui si fonda tutta l'azienda per garantire soluzioni sempre più efficienti e in linea con le direttive internazionali in tema di sicurezza e rispetto per l'ambiente.

### 4.2. I PRODOTTI

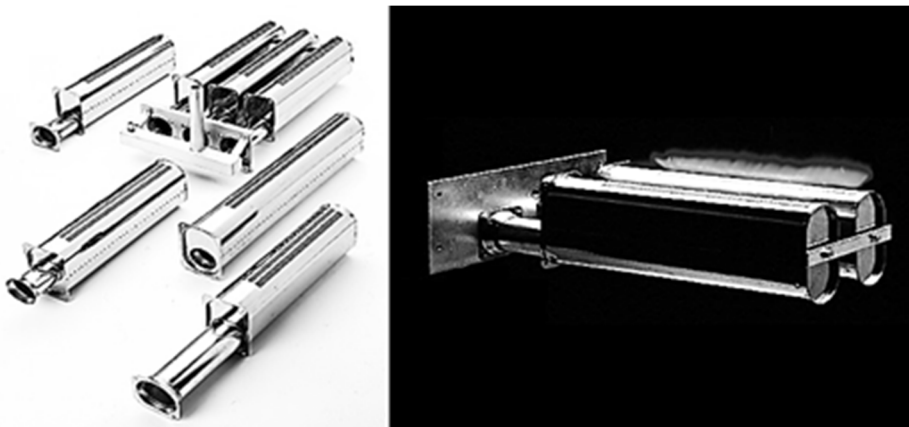
Nel suo catalogo prodotti la POLIDORO annovera:

- BRUCIATORI PREMISCELATI IN ACCIAIO, attraverso i quali viene iniettata una miscela aria-combustibile già entro i limiti di infiammabilità e la combustione prende luogo sopra la superficie del bruciatore senza l'aggiunta di ulteriore aria. Tipici valori di emissione sono NOx: 20-40 ppm; CO: 120-200 ppm; modulazione 1:10.



*Figura 20 – Bruciatori premiscelati in acciaio. Sono soluzioni tubolari adattabili a diverse soluzioni di scambiatori.*

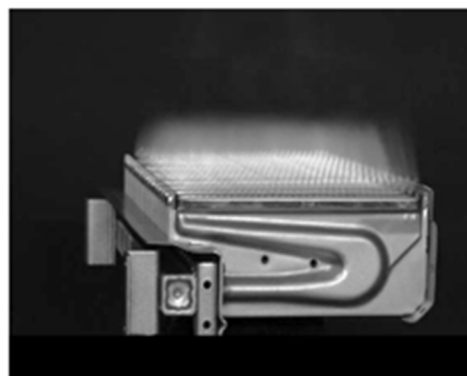
- BRUCIATORI PREMISCELATI OVO, componenti semplici e flessibili progettati appositamente per mantenere le emissioni di CO e NOx sotto i 40 mg per kWh. Tipici valori di emissione sono NOx: 20-40 ppm; CO: 3 ppm; modulazione 1:1.



*Figura 21 – Bruciatori premiscelati OVO.*



- BRUCIATORI PARZIALMENTE PREMISCELATI – MULTILAMA, prodotto leader del mercato con oltre 2.3 milioni di pezzi venduti nel 2010. Offrono un'alta efficienza e una lunga vita. Tipici valori di emissione sono NOx: 130-150 ppm; CO: 80-150 ppm; modulazione 1:3.



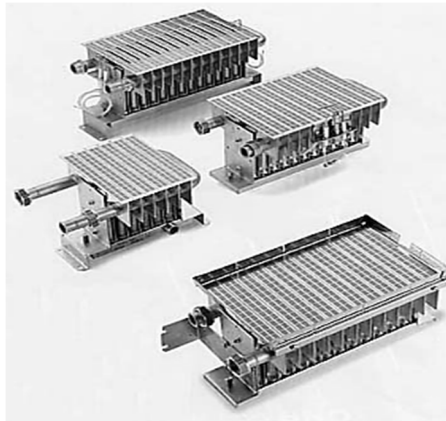
*Figura 22 – Bruciatori parzialmente premiscelati, multilama.*

- BRUCIATORI PARZIALMENTE PREMISCELATI – TUBOLARI, prodotto leader nel mercato mondiale con oltre 2.5 milioni di pezzi venduti nel 2014. Sono adatti sia a soluzioni in condizioni atmosferiche, sia accompagnati ad un ventilatore e sono in grado di adattarsi ad ogni soluzione. Tipici valori di emissione sono NOx: 130-150 ppm; CO: 80-150 ppm; modulazione 1:3.



*Figura 23 – Bruciatori parzialmente premiscelati, tubolari.*

- BRUCIATORI PARZIALMENTE PREMISCELATI – BNOx, sono bruciatori a basse emissioni di NOx per boilers fino a 46 kW. Attualmente la Polidoro è l'unico fornitore mondiale di questa tecnologia. Tipici valori di emissione sono NOx: 20-40 ppm; CO: 50-60 ppm; modulazione 1:2.5.



*Figura 24 – Bruciatori parzialmente premiscelati BNOx.*

- BRUCIATORI PARZIALMENTE PREMISCELATI – CIRCOLARI, studiati appositamente per l'applicazione a scaldabagni istantanei, apparecchi per il catering e apparecchi per il riscaldamento dell'aria. Sono caratterizzati da basse emissioni e bassi livelli di rumorosità.



*Figura 25 – Bruciatori parzialmente premiscelati, circolari.*

- MIXER ARIA-GAS AD ALTA MODULAZIONE, brevettati da Polidoro questi mixer sono in grado di operare una modulazione 1:10.



Figura 26 – Mixer aria-gas.

Il loro funzionamento deriva dal lavoro coordinato di CLAPET e FLAP: la prima, grazie al suo stesso peso, viene a chiudersi man mano che il getto d'aria diminuisce d'intensità parzializzando così il flusso. Il flap invece va semplicemente a chiudere il foro posteriore per evitare la diluizione della miscela.

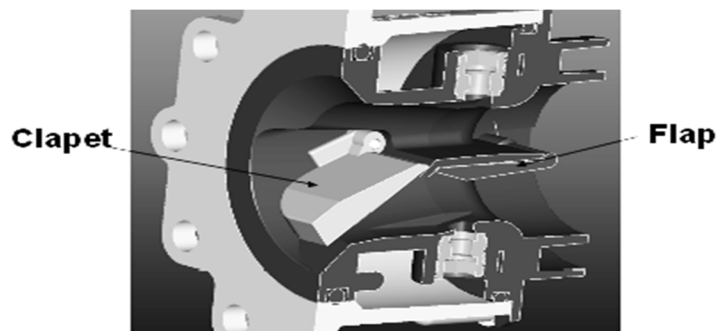
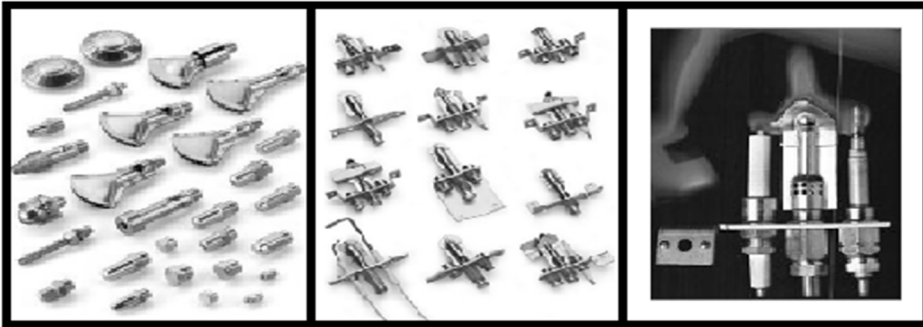


Figura 27 – Mixer aria-gas. Schema interno.

Grazie alla sua flessibilità inoltre questo mixer è in grado di regolare la miscela evitando fenomeni indesiderati come rumori termoacustici.

- ACCESSORI come iniettori, ugelli, piloti.



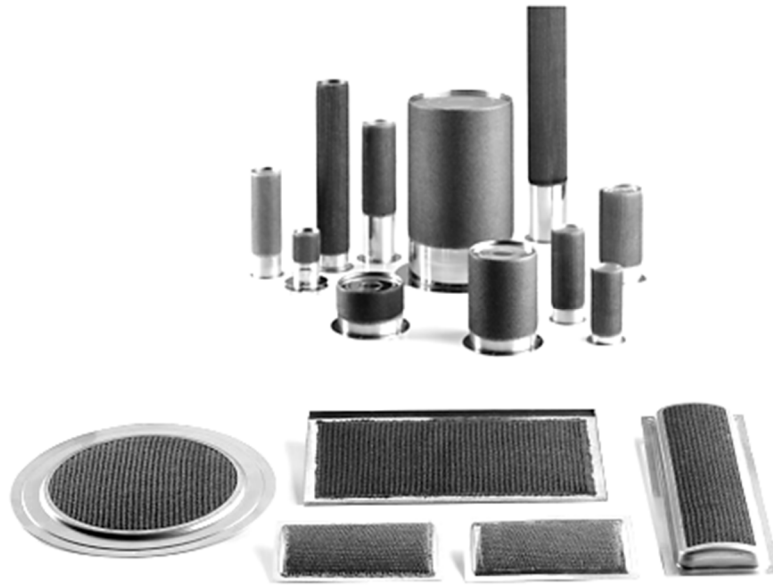
*Figura 28 – Piloti e altri accessori.*

- GRUPPI DI BRUCIATORI ASSEMBLATI.



*Figura 29 – Gruppi assemblati.*

- Negli ultimi anni, accanto alla produzione di bruciatori premiscelati in acciaio, si è cominciato ad offrire anche la soluzione RIVESTITA IN FIBRA METALLICA, sia per i bruciatori cilindrici che per quelli piani. Questa soluzione permette di schermare la superficie sottostante dalle alte temperature, limitandone così le deformazioni. Le potenze specifiche che vengono servite vanno da 100 a 4000 kW/m<sup>2</sup>, con modulazione fino a 1:10 ed emissioni di CO pari a 50 mg/kWh e di NOx inferiori a 70 mg/kWh.



*Figura 30 – Bruciatori totalmente premiscelati a fibra metallica.*

### **4.3. LA FIBRA POLIDORO**

A seconda delle esigenze del cliente, Polidoro principalmente adotta due tipologie di fibra metallica, atte ad evitare problemi strutturali, legati alle alte temperature, e problemi termoacustici che si possono verificare in accensione e modulazione di fiamma.

- La **MAGLIA – PFK** (Polidoro Fiber Knitted): è fabbricata con una struttura 3D, a coste rialzate, e ha porosità e spessore sufficienti a garantire una buona protezione dal calore. Inoltre aumenta la stabilità di fiamma e di combustione per i bruciatori completamente premiscelati di tipo standard. Questa maglia poi è stata a sua volta sviluppata in due soluzioni (riportate nella figura 31), una a maglie più fini per le normali applicazioni (1) e una a maglie più grosse per applicazioni ad alta potenza o di grandi dimensioni (2).

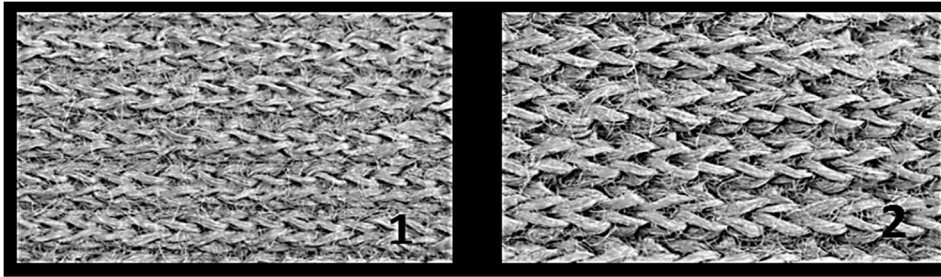


Figura 31 – Le due diverse grandezze di maglia utilizzata. In genere, se possibile, la struttura delle coste viene diretta assialmente con il bruciatore.

- Il TESSUTO – PFW (Polidoro Fiber Woven): è fabbricato con una struttura bidimensionale flessibile e adattabile a svariate configurazioni. Questa soluzione può essere adatta per risolvere problemi di tipo termoacustico poiché permette alla fiamma di modellarsi sulla sua superficie. Anche questa versione è stata studiata in tre diverse configurazioni (figura 32), una standard per tutti i prototipi (1), una leggera con più spazi aperti tra trama e ordito (2) e una soluzione con un secondo strato di filo in superficie, in modo da modificare la forma della fiamma e incidere maggiormente sui problemi termoacustici (3).

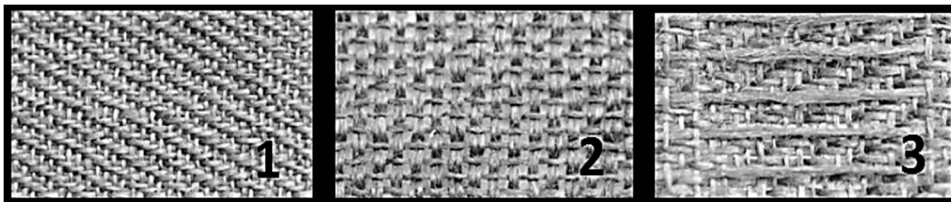


Figura 32 – le diverse tipologie di tessuto utilizzate da Polidoro. Anche in questo caso, se possibile, la direzione dei punti è coassiale al bruciatore.

#### 4.4. LA COLLABORAZIONE

In questa tesi si è studiato come la fibra metallica possa essere applicata ai bruciatori per caldaie domestiche di media potenza (25 kW), non solo

come protezione dalle alte temperature, ma anche per migliorare l'intero processo di combustione e diminuire le emissioni inquinanti.

Da questa collaborazione POLIDORO vuole inoltre ricavare una caratterizzazione dei diversi bruciatori esistenti sul mercato in cui sono comprese anche soluzioni a fibra metallica porosa e una soluzione in lamiera tranciata in 3D. Da tale studio vuole inoltre ricavare una classifica secondo vari punti di vista per poter così orientare il proprio sviluppo nei prossimi anni. I punti di vista che verranno toccati sono:

- La STABILITÀ A CALDO, cioè si valuterà come opera il bruciatore in normali condizioni di funzionamento valutando come variano le sue emissioni di monossido di carbonio; minori sono queste emissioni e più stabile si considera l'operato del bruciatore.
- La STABILITÀ A FREDDO, cioè si valuterà come e se i bruciatori sono in grado di lavorare in modo stabile quando vengono accesi da freddi e subito si esegue una modulazione verso il minimo carico termico possibile. Tale verifica è molto importante poiché questa è una situazione che può verificarsi molte volte nella vita di una caldaia e il minimo carico termico e una superficie fredda sono entrambi cause di spegnimento di fiamma. È quindi importante vedere come rispondono i vari bruciatori in questa fase delicata.
- Le EMISSIONI di NOx e CO.
- Le PERDITE DI CARICO.

Le varie prove eseguite saranno spiegate nel dettaglio nel capitolo dedicato all'attività sperimentale.





## 5. COMBUSTIONE IN MEZZO POROSO, CONCETTI BASE

A questo punto dell'elaborato sembra opportuno trattare più nello specifico il fenomeno della combustione in mezzo poroso, delle sue caratteristiche e delle dinamiche che vi entrano in gioco.

Una prima distinzione importante, quando si parla di combustione in mezzo poroso, è relativa alla *POSIZIONE* della fiamma. Come già accennato nel capitolo precedente, la fiamma può instaurarsi *SULLA SUPERFICIE*, oppure *ALL'INTERNO DELLA MATRICE*:

- Nel primo caso la fiamma si posiziona sopra il mezzo poroso, e la combustione di fatto non è molto diversa da una classica combustione a valle di un bruciatore premiscelato standard. La matrice entra in gioco principalmente nel favorire un migliore miscelamento tra combustibile e combustore.
- Nel secondo caso la fiamma inizialmente si sviluppa sempre in superficie, ma poiché la matrice ha la capacità di asportare calore dalla fiamma e di accumularlo nei vari pori che la compongono, può anche andare a preriscaldare la miscela infiammabile che riesce così ad abbassare il proprio limite inferiore di infiammabilità. Infatti esso è legato alla temperatura della miscela secondo la legge modificata di *BURGESS-WHEELER*:

$$\frac{LFL(T)}{LFL(T_0)} = 1 - \frac{\bar{C}_{p, fuel-air}}{LFL(T_0)(-\Delta H_C)} * (T - T_0)$$

Dove  $C_p$  è il calore specifico a pressione costante dell'ideale miscela aria-combustibile alla temperatura di riferimento  $T_0$  e  $\Delta H_c$  è il calore di combustione molare sempre a  $T_0$ .

La legge è basata sull'ipotesi che la temperatura adiabatica di fiamma a basso LFL è indipendente dalla temperatura iniziale.

Una diminuzione del limite inferiore di infiammabilità comporta il vantaggio di poter avere combustione stabile anche con miscele molto magre e quindi di poter scendere notevolmente con la potenza termica prodotta, cioè di poter arrivare ad una modulazione molto spinta. È appunto questa caratteristica che ha spinto la Polidoro ad interessarsi a questo tipo di combustione per applicarla ai bruciatori per caldaie domestiche, nei quali la parzializzazione del carico è un tema ormai più che centrale.

Se inoltre la matrice ha buone capacità di trasporto termico, la fiamma può anche penetrare al suo interno man mano che il mezzo poroso si scalda e instaurarsi sempre più in profondità nel mezzo fino ad essere completamente dentro di esso. In questo caso, all'aumento di temperatura del combustibile si lega anche un aumento della sua entalpia; il risultato è una combustione in *ECESSO DI ENTALPIA*, che può portare anche al superamento della temperatura adiabatica di combustione, per cui viene detta anche combustione *SUPER-ADIABATICA* (mentre la combustione in superficie è *SUB-ADIABATICA*). In questo caso la combustione viene detta anche *TRANSITORIA* (al contrario della superficiale che è detta *STAZIONARIA*), perché il fronte di fiamma ha la libertà di spostarsi verso monte (all'interno della matrice) o verso valle (e tornare in superficie).

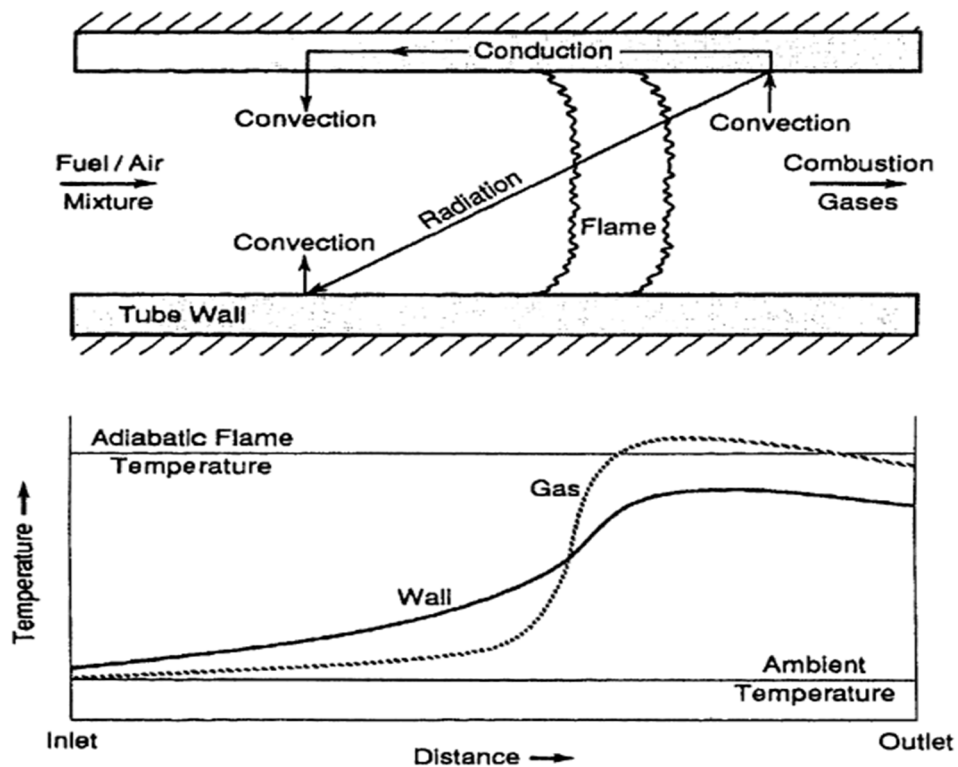


Figura 33 – L'immagine in alto spiega la ricircolazione del calore dai gas caldi alla miscela fredda attraverso la matrice porosa. Nel grafico sottostante si osserva il corrispondente andamento della temperatura.

La stabilizzazione e la propagazione della fiamma sono governate dal NUMERO DI PECLET:

$$Pe = S_L * d_m * C_p * \rho / \lambda$$

Dove  $S_L$  = velocità di fiamma laminare,  $d_m$  = diametro medio dei fori,  $C_p$  = calore specifico a pressione costante della miscela aria-gas,  $\rho$  = densità della miscela,  $\lambda$  = coefficiente di conduttività termica della miscela.

Se  $Pe < 65^8$  si verifica il fenomeno del quenching (la fiamma si spegne poiché il diametro dei fori è troppo piccolo per permettere la combustione) se invece  $Pe > 65$  si ha propagazione di fiamma nel mezzo. Quindi occorre prestare attenzione sia alla struttura della matrice, sia alle caratteristiche

<sup>8</sup> Il valore 65 deriva da prove empiriche [Trimis e Durst (1996)].

della miscela per poter avere la certezza che effettivamente la fiamma possa rientrare nel mezzo poroso.

Il numero di Peclet ha numerose altre definizioni; tra esse ricordiamo la definizione qualitativa che lo descrive come il rapporto tra il calore scambiato per convezione in un fluido e quello scambiato per conduzione tra un fluido e un solido. In questo caso possiamo dire che perché vi sia il rientro della fiamma nella matrice porosa occorre che il calore scambiato per convezione sia molto maggiore di quello scambiato per conduzione e quindi occorre ancora un'alta porosità.

Infine, per quanto riguarda il numero di Peclet, si vuole far notare come questo numero corrisponda al prodotto del numero di Reynolds per il numero di Prandtl:

$$Pe = Re * Pr = \frac{\rho * v * d}{\mu} * \frac{\mu * C_p}{\lambda}.$$

Un altro aspetto importante quando si parla di combustione è sicuramente quello delle emissioni. Per quanto riguarda la combustione in mezzo poroso si è dimostrato che la matrice, poiché permette un miglior mescolamento aria-fuel, permette anche una combustione più completa e quindi una diminuzione delle emissioni di CO. Nello specifico si è visto che queste emissioni aumentano con l'aumento del carico termico e calano con la diminuzione dell'eccesso d'aria<sup>9</sup>.

Inoltre, poiché la matrice va a sottrarre calore ai gas esausti e alla fiamma, la combustione si verifica a temperature più basse riducendo così la

---

<sup>9</sup> [C. Keramiotis, "An experimental investigation of stability and operation of a biogas fuelled porous burner" (2012)];

[B. Yu, "Combustion characteristics and thermal efficiency for premixed porous-media types of burners" (2013)].

formazione di NOx per via termica (che sono il maggior numero di NOx derivanti da combustione).

Nello specifico, le emissioni di NOx aumentano assieme all'aumento del carico termico solo per bassi eccessi d'aria, per alti eccessi d'aria invece si stabilizzano sull'ordine dei pochi ppm<sup>10</sup>.

In definitiva, almeno a livello teorico, la combustione in mezzo poroso sembra portare a importanti vantaggi come:

- Migliore modulabilità del carico;
- Minori emissioni inquinanti.

Scopo principale del lavoro di questa tesi è verificare per via sperimentale se questi vantaggi sono effettivamente ottenibili in modo sensibile rispetto a bruciatori standard e rispetto ad un bruciatore a lamiera tranciata in 3D.

---

<sup>10</sup> [C. Keramiotis (2012)].



## 6. FASE SPERIMENTALE

La parte sperimentale di questa tesi è stata svolta in un tirocinio condotto presso la sede di Schio della Polidoro SpA. Come già detto nel paragrafo 4.4, obiettivo di tale fase è quello di fare una caratterizzazione dei vari bruciatori premiscelati presenti sul mercato (rispetto a vari aspetti, come il range di stabilità di fiamma, la capacità di accendere bene da freddo a basse portate termiche, le emissioni prodotte lungo tutto il range di potenza e le perdite di carico), e nello specifico sul mercato delle caldaie ad uso domestico, per valutare se è possibile stilare una classifica e verificare dove si posizionano sia i bruciatori in acciaio, sia le varianti in fibra metallica.

### 6.1. GLI STRUMENTI DI MISURA

Gli strumenti di misura utilizzati sono i seguenti:

- Misure di CO e CO<sub>2</sub>: strumento a infrarosso *SIEMENS ULTRAMAT 6*, in grado di misurare le 2 componenti in un campo di misura minimo specifico per componente di 0-5 % e 0-15 % per la CO<sub>2</sub> e 0-100 ppm e 0-2000 ppm per la CO, con una deviazione del punto di zero di - 0.30% in volume di O<sub>2</sub> assoluto per l'anidride carbonica e di +0.07% per il monossido di carbonio.

- Misure di NOx: strumento *ECO PHYSICS - CLD 82 Sh*, in grado di rilevare concentrazioni in più range che possono essere comprese tra 0-5 ppm e 0-5000 ppm con un rumore allo zero di 0.125 ppm.
- Misure di perdite di carico: le misure sono state effettuate in assenza di fiamma, ponendo il bruciatore a valle di un tubo con un condotto convergente-divergente tale da creare un effetto venturi e di un ventilatore con velocità regolabile. Al tubo sono attaccati due misuratori di pressione, uno differenziale prima e dopo del convergente-divergente (ai punti 2 e 3 della Figura 34) per misurare la variazione di pressione, da cui, attraverso l'applicazione del teorema di Bernoulli, si possono ricavare le perdite dinamiche; l'altro invece è inserito prima del bruciatore (al punto 4) per la misura della pressione statica. La somma delle perdite dinamiche e di quelle statiche dà le totali perdite di pressione.

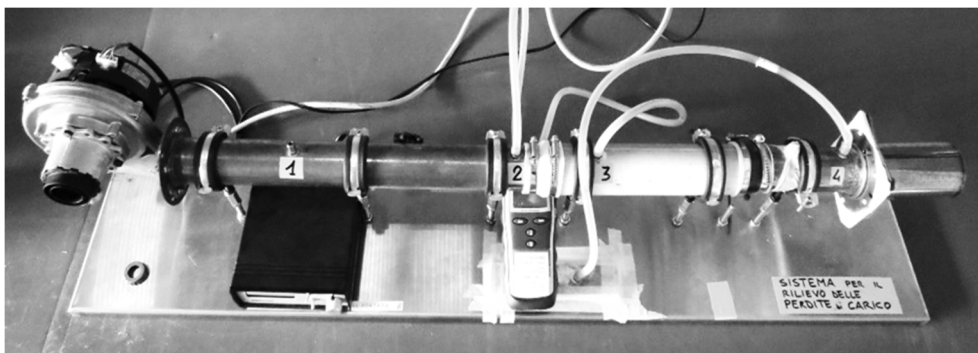


Figura 34 – strumento utilizzato per la misura delle perdite di carico



Figura 35 - Strumento per la regolazione della velocità del ventilatore



- Misure di temperatura dei fumi, dell'elettrodo di ionizzazione presente affianco al bruciatore e dentro la matrice ceramica, sono state effettuate con termocoppie di tipo K.
- Misure di portata termica: effettuate tramite flussimetri massici *BROOKS*.

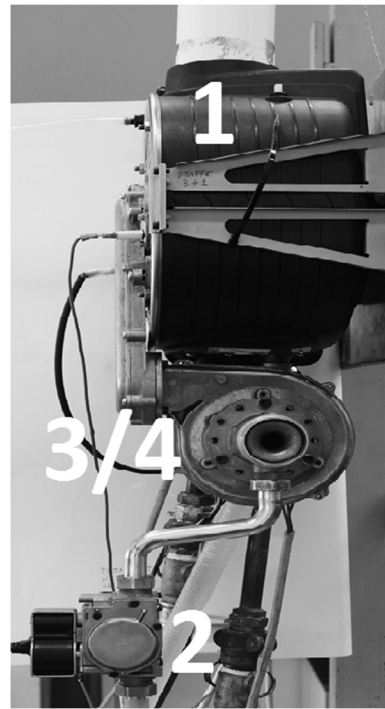
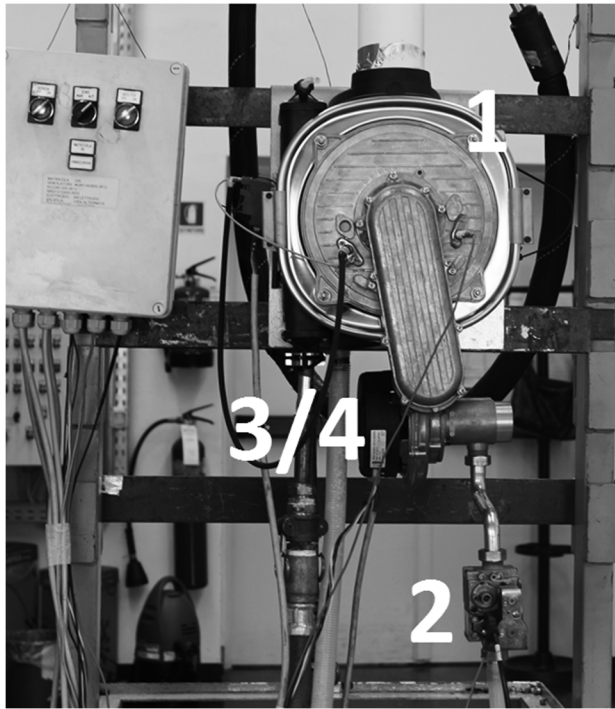
## **6.2. IL SISTEMA CALDAIA**

Tutte le prove che seguono sono state eseguite accostando i vari bruciatori ad un unico sistema caldaia che ricalca una normale caldaia premiscelata domestica. In questo modo si è quindi voluto evitare che nei confronti tra i diversi apparecchi vi fossero altre disparità che potessero influire sui risultati ottenuti.

Il setup di laboratorio si compone di:

1. Scambiatore *SERMETA ISO 3+1*;
2. Valvola gas *SIT 848*;
3. Mixer aria-gas *MONOVENTURI 1:5* per test a freddo e misura di emissioni;
4. Mixer aria-gas *BIVENTURI POLIDORO 1:10 Ø24* per curve ad U.

L'immagine seguente mostra la caldaia composta come indicato:

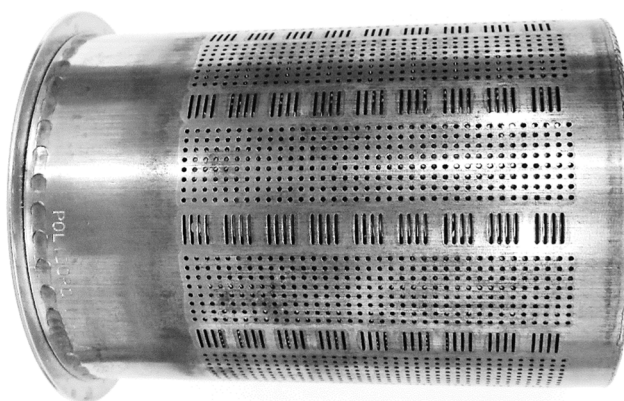


*Figura 36 – Foto dell'insieme caldaia adoperato per i test*

### 6.3. I BRUCIATORI IMPIEGATI

Per motivi di politica aziendale e riservatezza non sono state inserite le fotografie di tutti bruciatori testati. Essi comunque sono:

- Bruciatore in ACCIAIO TRANCIATO IN 2D con distributore interno a fori larghi e cilindro esterno a foratura alternata asole e punti.  
Per i grafici a venire tale modello sarà abbreviato con 2D.

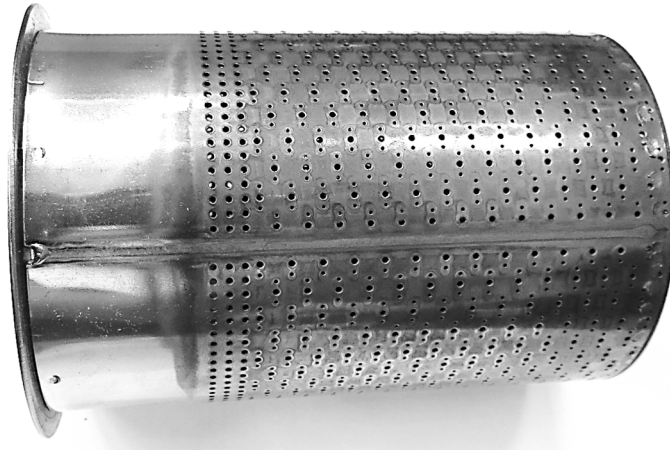


*Figura 37 – Bruciatore in acciaio tranciato, dall'esterno si nota la foratura a bande alternate tra punti e asole. Questa particolare foratura vuole favorire l'innesco di fiamma e la sua stabilità*



*Figura 38 – Bruciatore in acciaio tranciato, dall'interno si nota il distributore, un'ulteriore lastra d'acciaio forata a fori larghi per distribuire equamente la miscela tutt'attorno al piano del bruciatore*

- Bruciatore in acciaio *SINGLE-SHEET CON ALETTATURA* iniziale e foratura uniforme lungo tutta la superficie, tranne per la banda di saldatura lungo la quale i due lembi della lamiera vengono uniti per creare il cilindro (qui in risalto). Lo swirler ha la funzione di distribuire in modo uniforme la miscela su tutta la superficie. Per i grafici tale modello sarà abbreviato con 1 SHEET+ALETTE.



*Figura 39 - Bruciatore in acciaio tranciato single sheet*



*Figura 40 - Bruciatore in acciaio tranciato single sheet, vista dello swirler iniziale*

- Bruciatore in acciaio *SINGLE-SHEET CON DIAFRAMMA* alla base e foratura alternata ad asole e punti. In questo prodotto è presente anche una zona di accensione (da posizionare affianco al pilota) in

cui vi è una doppia foratura ad asole (sia orizzontali che verticali). Il bruciatore in questione è un prototipo di variante del Moka con swirler quindi le sue fotografie sono state omesse.

Per i grafici tale modello sarà abbreviato con 1 SHEET+DIAFRAMMA.

- Bruciatore in ACCIAIO TRANCIATO ricoperto con TESSUTO, non è altro che il primo modello proposto ricoperto da una fibra standard. Per i grafici tale modello sarà abbreviato con TESSUTO.

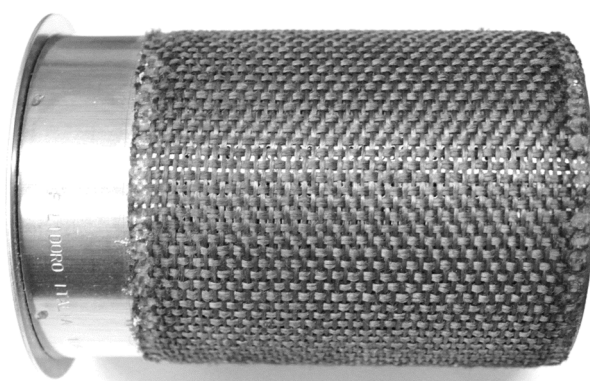
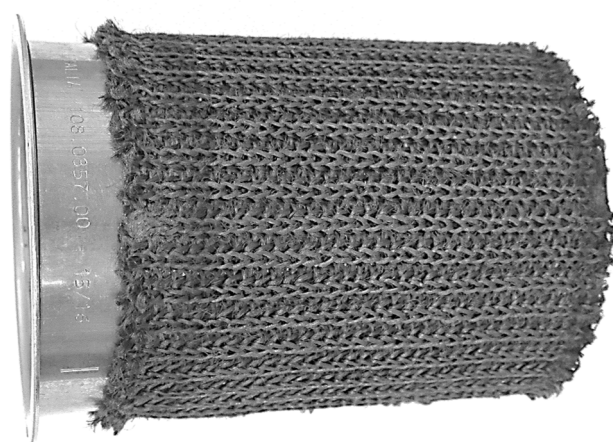


Figura 41 – Bruciatore con rivestimento di tessuto in FeCrAl



Figura 42 – Bruciatore rivestito con fibra tessuta. Dall'interno si nota il distributore, prova che è uno standard rivestito

- Bruciatore in *ACCIAIO TRANCIATO* ricoperto con *TESSUTO SPECIALE*, è ancora uno standard ricoperto da un tessuto prototipale, per verificare se con fibre metalliche diverse si ottengono risultati molto diversi. Anche in questo caso si sono omesse le fotografie. Per i grafici tale modello sarà abbreviato con *TESSUTO 2*
- Bruciatore in *ACCIAIO TRANCIATO* ricoperto con *MAGLIA FINE*. Per i grafici tale modello sarà abbreviato con *MAGLIA*.

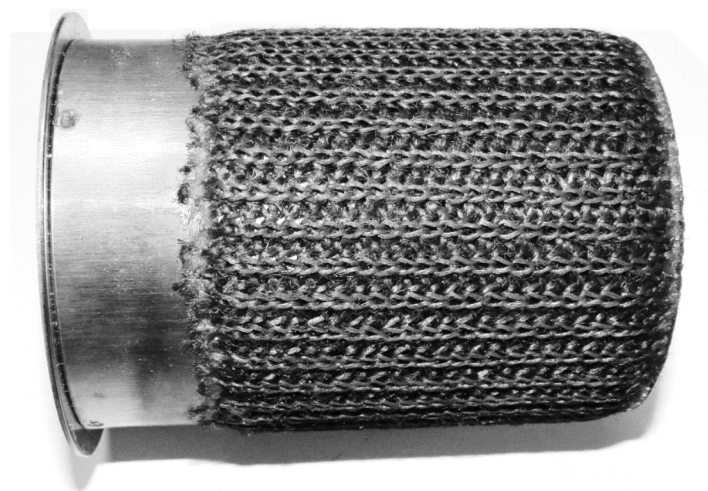


*Figura 43 - Bruciatore rivestito con maglia fine*



*Figura 44 - Bruciatore con rivestimento a maglia*

- Bruciatore a *MAGLIA* metallica con *DISTRIBUTORE SOTTOSTANTE AD ASOLE*, diversamente da uno standard ricoperto dalla maglia questo bruciatore è stato progettato appositamente per la soluzione porosa. Testando quindi le due soluzioni si vuole verificare se la progettazione abbia apportato ulteriori benefici o se l'elemento distintivo principale sia la maglia.  
Per i grafici tale modello sarà abbreviato con *MAGLIA 2*.



*Figura 45 – Bruciatore Maglia e distributore ad asole*



*Figura 46 – Bruciatore in maglia e distributore ad asole, dettaglio del distributore interno*

- Bruciatore in *FIBRA CERAMICA SINTERIZZATA* in cui la fibra è stata modellata in un reticolo uniforme di fori circolari, diversamente da tutti gli altri bruciatori indagati questo modello è l'unico ad essere piano e non cilindrico. Il modello in questione non è attualmente in produzione Polidoro.

Per i grafici tale modello sarà abbreviato con SINTERIZZATO.

- Bruciatore in acciaio in *LAMIERA TRANCIATA IN 3D*. La lamiera segue un disegno come indicato nello schizzo di figura 8.

Per i grafici tale modello sarà abbreviato con 3D.

#### **6.4. STABILITÀ A CALDO**

Quando si parla di stabilità a caldo si intende controllare come si comporta la fiamma quando, dopo che questa è già a regime a numero di giri del ventilatore costante, si va a starare la valvola del mixer gas-aria.

In questo modo ci si porta a lavorare in condizioni diverse da quella nominale e si può osservare come varia la combustione (ossia come variano le emissioni di CO) in base alla miscela di partenza (ossia in base all'eccesso d'aria misurato come percentuale volumetrica di CO<sub>2</sub>; il livello stechiometrico per il gas metano è 11.73%).

Da questi raffronti sono state stilate le cosiddette *CURVE AD U*. Queste curve sono state create per 3 potenze: a potenza massima di 25 kW, a potenza minima di 2.5 kW (modulazione 1:10) e ad una potenza intermedia di 12-13 kW (per la prova a potenza intermedia si è preso come punto di riferimento quello per velocità del ventilatore di 2992 rpm, mentre per la



prova al massimo e al minimo si è scelto il numero di giri tale da dare la potenza termica richiesta).

Unendo le curve ad U per i vari bruciatori si possono quindi fare i confronti tra i vari modelli. Un bruciatore con una buona stabilità a caldo dovrebbe avere una curva più piatta possibile, almeno nella parte centrale, e perdere di stabilità (con elevati valori di CO) quanto più agli estremi della regolazione possibile.

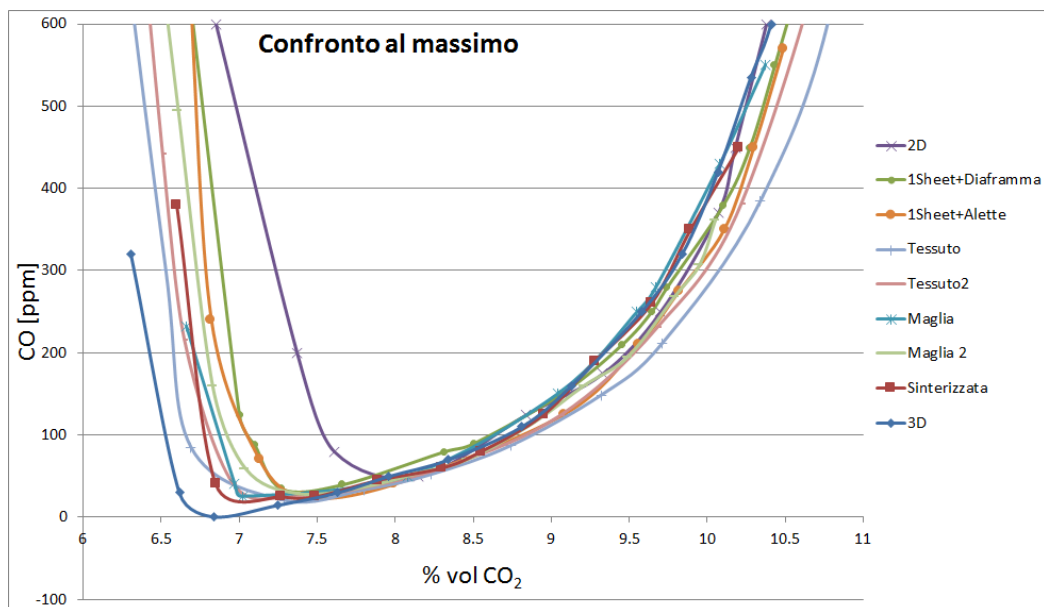


Figura 47 – Curve ad U alla massima potenza.

Dal grafico 47 si nota come a bassi livelli di CO<sub>2</sub> il bruciatore in lamiera tranciata 3D sia più stabile di tutti gli altri e come il modello 2D invece sia meno stabile (il che è probabilmente da ricollegare al fatto che tale bruciatore è stato progettato per una modulazione molto meno spinta di quella 1:10); mentre ad alti livelli di CO<sub>2</sub> non c'è una importante differenza tra i diversi modelli.

Per il confronto al minimo (grafico 48), si nota come le soluzioni in fibra metallica abbiano valori più alti di CO nella parte sinistra del grafico, ma con un aumento più dolce e lineare. Questo significa che non c'è una fase

di instabilità di fiamma prima dello spegnimento come avviene negli altri casi in cui le emissioni di CO schizzano in verticale; ma, al contrario, la fibra riesce a mantenere più stabile la fiamma. Anche ad alti valori di CO<sub>2</sub> i due tessuti riescono a disegnare una curva più larga. Il modello 2D è il meno performante per questi livelli di CO<sub>2</sub>, mentre non c'è una grossa differenza tra i restanti bruciatori.

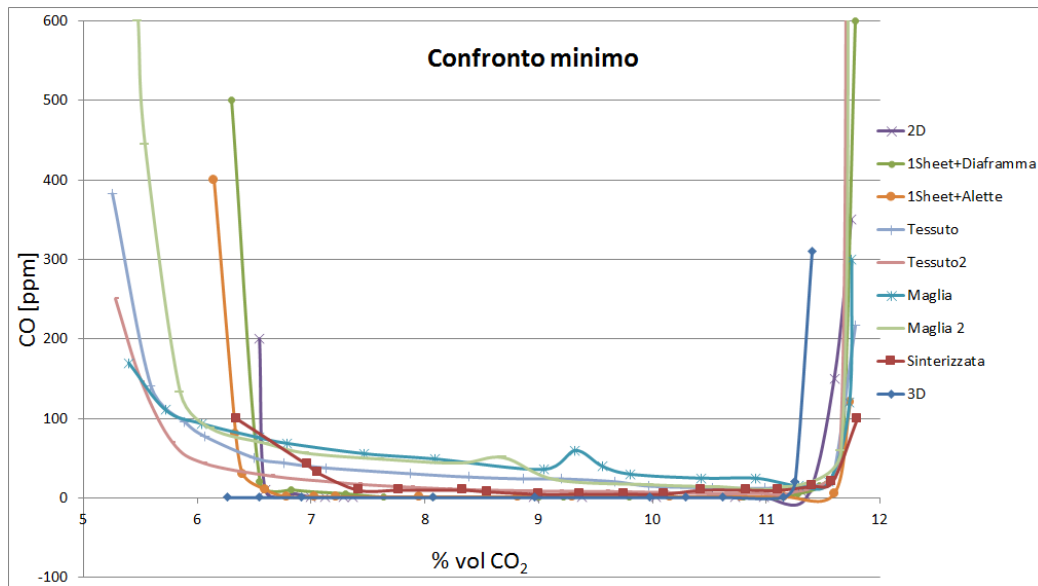


Figura 48 – Curve ad U alla minima potenza.

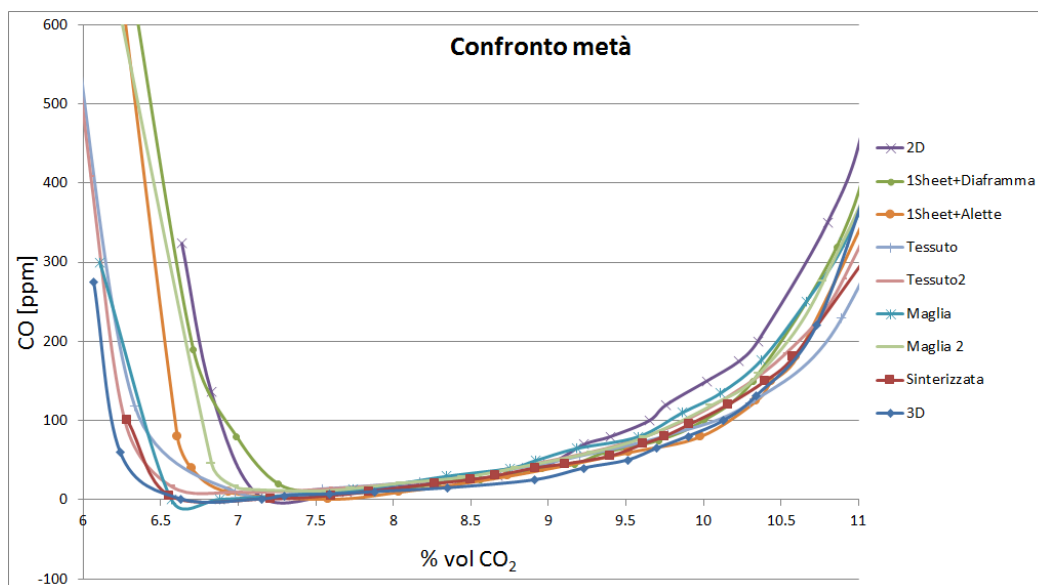


Figura 49 – Curve ad U a 2992 rpm.

Anche per le curve ad U a metà del carico (grafico 49) non si nota una marcata differenza per miscele vicine a quella stechiometrica. Mentre per bassi valori di CO<sub>2</sub> la lamiera tranciata in 3D riesce a creare una U più larga. La lamiera in 2D e i due single sheet invece sono le meno performanti.

Dai tre confronti non si evince un risultato univoco, se non il fatto che il modello in 2D è il modello meno performante quando si lavora a bassi valori di CO<sub>2</sub>.

Andando un po' più nello specifico possiamo dire che a medie e alte potenze è preferibile una lamiera tranciata 3D, mentre a basse potenze la fibra riesce a evitare l'insorgere dell'instabilità prima dello spegnimento della fiamma. Inoltre i bruciatori con fibra riescono a lavorare a livelli molto bassi di CO<sub>2</sub>.

In generale il modello ricoperto con maglia metallica ha sempre descritto curve con campane più larghe rispetto al bruciatore progettato per la maglia e con distributore ad asole. Apparentemente questa soluzione non migliora i range di stabilità di fiamma.

Per dare una lettura più quantitativa alle curve abbiamo raccolto, nelle seguenti tabelle, per quale valore di CO<sub>2</sub> la curva superasse valori di CO non più considerati di buona combustione, cioè superasse i 200 ppm corretti.

BRUCIATORE	CO <sub>2</sub> A FISSATO CO CONFRONTO AL MASSIMO	
	CO =200 (miscela magra)	CO = 200 (miscela grassa)
3D	6.5	9.4
TESSUTO	6.6	9.7
TESSUTO 2	6.7	9.5
MAGLIA	6.8	9.3
SINTERIZZATO	6.8	9.3
MAGLIA 2	6.9	9.5
1 SHEET+ALETTE	6.9	9.5
1 SHEET+DIAFRAMMA	7.0	9.3
2D	7.4	9.5

Tabella 4 – Confronto tra i vari bruciatori. Si indica il valore di CO<sub>2</sub> al quale il bruciatore si trova a lavorare con un'emissione di CO pari e superiore ai 200 ppm corretti. I valori si riferiscono alle curve ad U alla massima potenza

BRUCIATORE	CO <sub>2</sub> A FISSATO CO CONFRONTO A METÀ CARICO	
	CO =200 (miscela magra)	CO = 200 (miscela grassa)
3D	6.2	10.7
SINTERIZZATO	<6.3	10.7
TESSUTO 2	6.3	10.7
MAGLIA	6.3	10.5
TESSUTO	<6.4	10.8
1 SHEET+ALETTE	6.6	10.7
1 SHEET+DIAFRAMMA	6.7	10.5
MAGLIA 2	6.7	10.5
2D	6.8	10.4

Tabella 5 - Confronto tra i vari bruciatori. Si indica il valore di CO<sub>2</sub> al quale il bruciatore si trova a lavorare con un'emissione di CO pari e superiore ai 200 ppm corretti. I valori si riferiscono alle curve ad U a potenza media

BRUCIATORE	CO <sub>2</sub> A FISSATO CO CONFRONTO AL MINIMO	
	CO =200 (miscela magra)	CO = 200 (miscela grassa)
MAGLIA	<5.4	>11.7
TESSUTO 2	5.4	11.9
TESSUTO	5.5	12
MAGLIA 2	5.8	11.7
3D	<6.2	11.4
1 SHEET+ALETTE	6.3	>11.8
SINTERIZZATO	<6.4	>11.8
1 SHEET+DIAFRAMMA	6.5	11.8
2D	6.6	11.6

Tabella 6 – Confronto tra i vari bruciatori. Si indica il valore di CO<sub>2</sub> al quale il bruciatore si trova a lavorare con un'emissione di CO pari e superiore ai 200 ppm corretti. I valori si riferiscono alle curve ad U alla minima potenza

## 6.5. STABILITÀ A FREDDO

Per stabilità a freddo si intende verificare come e se il bruciatore sia in grado di mantenere accesa la fiamma quando viene acceso da freddo e subito dopo venga portato a lavorare alla minima potenza con una rampa più o meno brusca. Nello specifico i bruciatori sono stati settati per accendersi con il ventilatore che lavora a 3500 rpm (che corrispondono a una portata termica di 13-16 kW). Nella prova vengono quindi fatti accendere a tale velocità e lasciati stabilizzare per 2.1 secondi, dopo di che si inserisce la rampa di discesa della velocità del ventilatore. Sono state testate le rampe a 2 %/s, 3.6 %/s e 6 %/s. La discesa si interrompe una volta raggiunta la velocità tale da avere potenza minima, che in questo caso (per motivi di compatibilità dei bruciatori con il restante sistema caldaia) è stata posta pari a un settimo della potenza massima (regolazione 1:7).

Alla fine di ogni rampa, una volta che il bruciatore si trova a lavorare al minimo della potenza, può instaurarsi una combustione stabile già da subito, il che significa che il bruciatore lavora bene anche da freddo, può instaurarsi una instabilità iniziale che poi si va a smorzare appena il

bruciatore si scalda (instabilità possono essere alte emissioni o più frequentemente onde sonore), oppure ancora la fiamma può spegnersi a causa della forte instabilità.

Per ogni bruciatore si è ripetuto lo stesso test diverse volte per ciascuna rampa, per verificare se i risultati ottenuti fossero attendibili o piuttosto una casualità. Si è quindi stimata una soglia del 90% di successi senza instabilità iniziale e una soglia del 90% di successi con instabilità iniziale e si è riportato il numero di giri minimo per cui tale bruciatore rispetta tale soglia (cioè si è cercato quale fosse la velocità minima del bruciatore per la quale il bruciatore lavora bene al minimo anche da freddo) a tale velocità del ventilatore si è poi fatto corrispondere una determinata potenza termica specifica per ciascun modello testato.

I risultati così catalogati sono riportati nel grafico che segue (grafico 50), dove sono indicati con linea continua i successi senza instabilità e con linea tratteggiata i successi con instabilità:

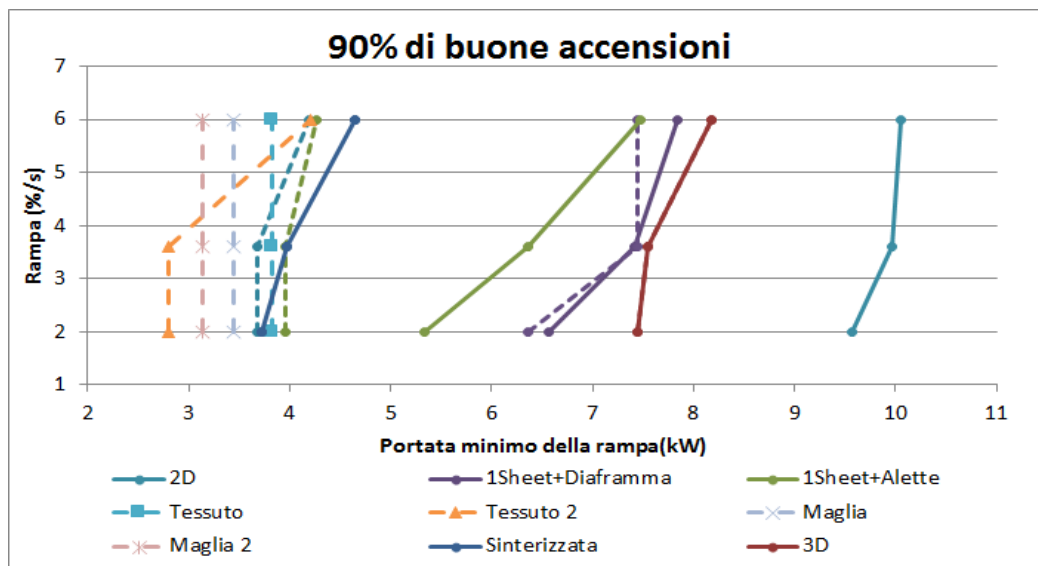


Figura 50 – 90 % di buone accensioni

Nel diagramma in questione è indicata la potenza termica minima alla quale i vari bruciatori, nel 90% dei casi, riescono a tenere accesa la fiamma. La linea continua indica una combustione stabile già dal principio, invece

la linea tratteggiata indica una fiamma instabile (l'instabilità era sempre accompagnata da rumore o fischi che potevano spegnersi presto o entrare in risonanza con il sistema caldaia e continuare a lungo). Dal confronto tra i vari modelli si vede come la fibra sinterizzata sia molto migliore sia delle soluzioni a single sheet sia dell'acciaio tagliato in 3D, in quanto riesce a produrre fiamma stabile a potenze di circa 4 kW, mentre gli altri due non scendono sotto i 5-7 kW. Per quanto riguarda i vari tessuti e maglie essi riescono a scendere anche sotto i 4 kW ma presentano sempre rumore, infatti manca totalmente la linea continua. La lamiera tranciata in 2D invece riesce a creare fiamma stabile solo a potenze non inferiori i 9-10 kW, scende sotto i 4 kW solo se si accetta il rumore. In ogni caso questi problemi di termoacustica non dipendono solo dal bruciatore ma dal sistema complessivo e non vanno generalizzati.

Il rumore comunque non è accettabile per un'installazione domestica, nella quale l'apparecchio deve essere il più silenzioso possibile. Per ovviare a tale problema bisogna valutare la possibilità di cambiare accoppiamenti bruciatore-scambiatore o di inserire elementi in grado di assorbire le onde o di smorzare la loro risonanza (materiale fonoassorbente o snorkel a monte della presa d'aria del ventilatore).

## **6.6. EMISSIONI**

Per quanto riguarda le prove relative alle emissioni risultanti da ogni apparecchio si tarata la valvola di miscelazione perché a massima potenza (circa 25 kW) e a minima potenza (circa a 3.5 kW, per una regolazione 1:7) la miscela aria-metano avesse sempre una concentrazione di circa il 9% di

CO<sub>2</sub> sul volume dei fumi secchi; quantità equivalente ad un eccesso d'aria del 30%<sup>11</sup>.

Una volta fatto in modo di avere l'eccesso d'aria voluto sia all'inizio che alla fine della modulazione, si sono misurate le emissioni per diversi punti intermedi tra quello di minima potenza e quello di massima potenza termica per tre tipi di gas la cui composizione è regolata da normativa: G20 equiparabile al gas metano, G21 con maggiore potere calorifero e G231 con minore potere calorifero.

Le emissioni di cui si è tenuto conto sono quelle di CO<sub>2</sub>, per verificare se effettivamente la valvola manteneva una miscela sempre abbastanza equivalente in tutti i punti, CO per verificare la buona combustione del gas e NOx.

I risultati ottenuti sono riportati nei seguenti diagrammi riassuntivi, suddivisi per tipo di emissione e per tipo di combustibile impiegato.

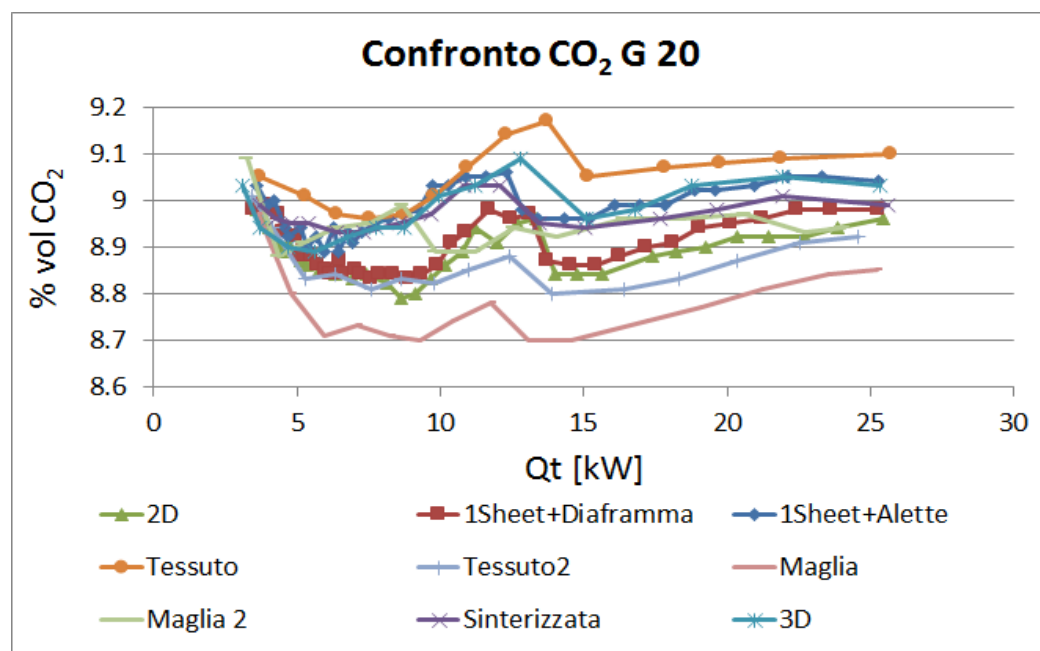


Figura 51 – Confronto degli andamenti delle emissioni di CO<sub>2</sub> per i vari bruciatori al variare della potenza termica

<sup>11</sup> Da paragrafo 2.1, eccesso d'aria = % CO<sub>2</sub> stechiometrica / % CO<sub>2</sub> misurata = 11.73% / 9% = 1.30.



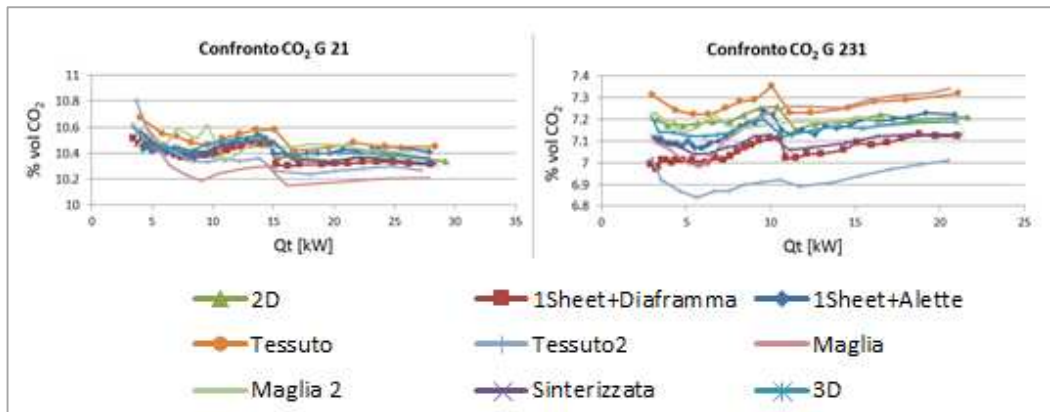


Figura 52 – Confronto degli andamenti delle emissioni di CO<sub>2</sub> per i vari bruciatori al variare della potenza termica, per il combustibile G21 e G231

Poiché i bruciatori sono precedentemente stati settati per avere un valore di 9% di CO<sub>2</sub> sia al minimo che al massimo, le varie curve sovrastanti dovrebbero ricongiungersi tutte agli estremi; in realtà si vede come al massimo le curve non restino tutte rispettose di questo settaggio. In generale possiamo però notare che i vari valori assunti sono tutti molto prossimi a 9. Inoltre gli andamenti di ciascun bruciatore non variano variando tipo di gas.

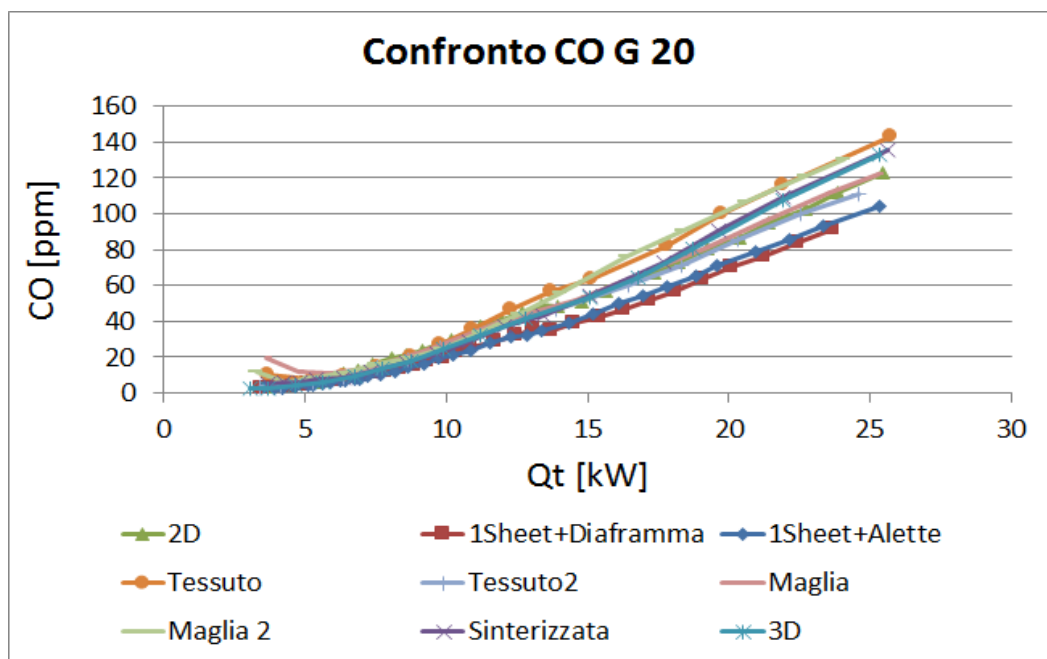


Figura 53 - Confronto degli andamenti delle emissioni di CO per i vari bruciatori al variare della potenza termica

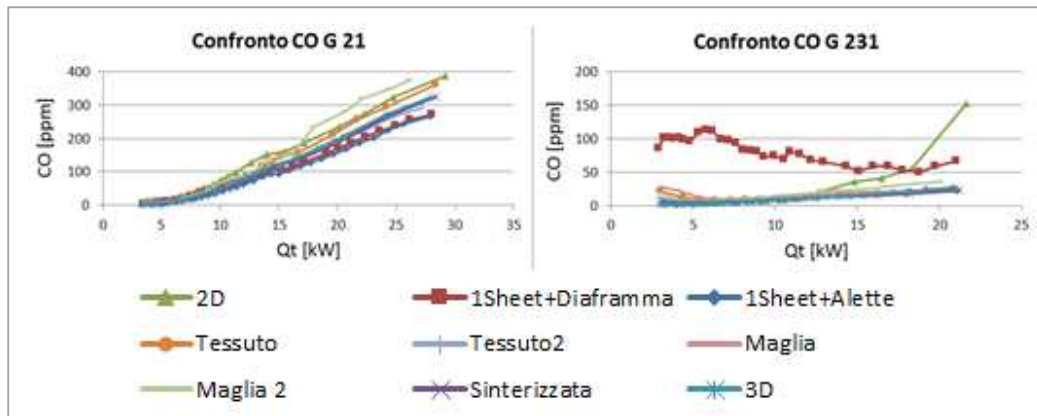


Figura 54 - Confronto degli andamenti delle emissioni di CO per i vari bruciatori al variare della potenza termica, per il combustibile G21 e G231

Si nota come le emissioni di monossido di carbonio dei vari bruciatori siano tutte molto simili e come il valore delle emissioni in ppm cresca al crescere della potenza termica. Nel caso delle emissioni a G20, tra i vari modelli, il modello ricoperto con tessuto presenta emissioni maggiori, mentre i due single sheet presentano le minori emissioni. Gli andamenti delle emissioni a G21 rispecchiano quelli a G20, mentre nelle emissioni a G231 il single sheet con diaframma ha andamento totalmente opposto (decescente invece che crescente) ed inoltre le emissioni del 2D schizzano ad alte potenze, probabile sintomo di una non perfetta combustione.

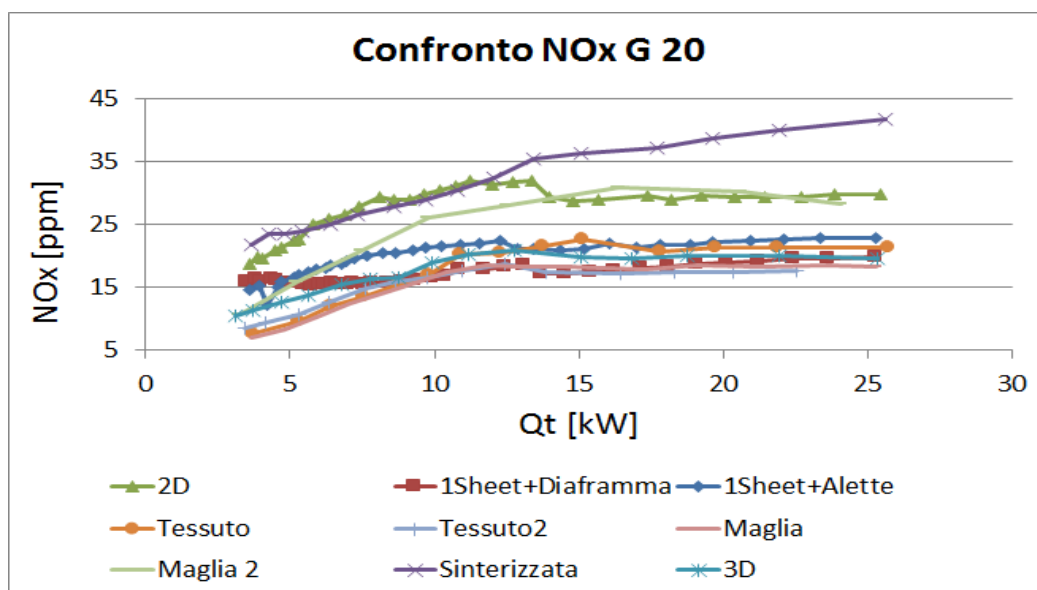


Figura 55 - Confronto degli andamenti delle emissioni di NOx per i vari bruciatori al variare della potenza termica

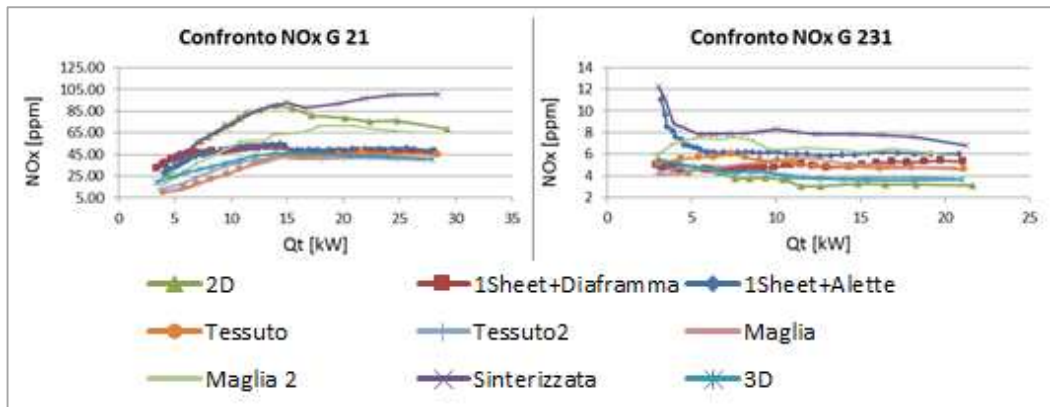


Figura 56 - Confronto degli andamenti delle emissioni di NOx per i vari bruciatori al variare della potenza termica, per il combustibile G21 e G231

Per quanto riguarda le emissioni di NOx si nota come i valori delle emissioni siano generalmente abbastanza costanti all'aumentare del carico. A G20 e G21 si differenziano solo la fibra sinterizzata, le cui emissioni aumentano con il carico, e il tranciato in 2D, che ha valori di emissioni nettamente maggiori agli altri modelli.

Ricordiamo inoltre che le emissioni di NOx sono il fattore di riferimento per distinguere le caldaie domestiche in classi di merito. Se eseguiamo la somma pesata delle emissioni a diversi carichi come indicato nella normativa UNI EN 15502 (e nel paragrafo 2.3) otteniamo i seguenti valori di emissioni:

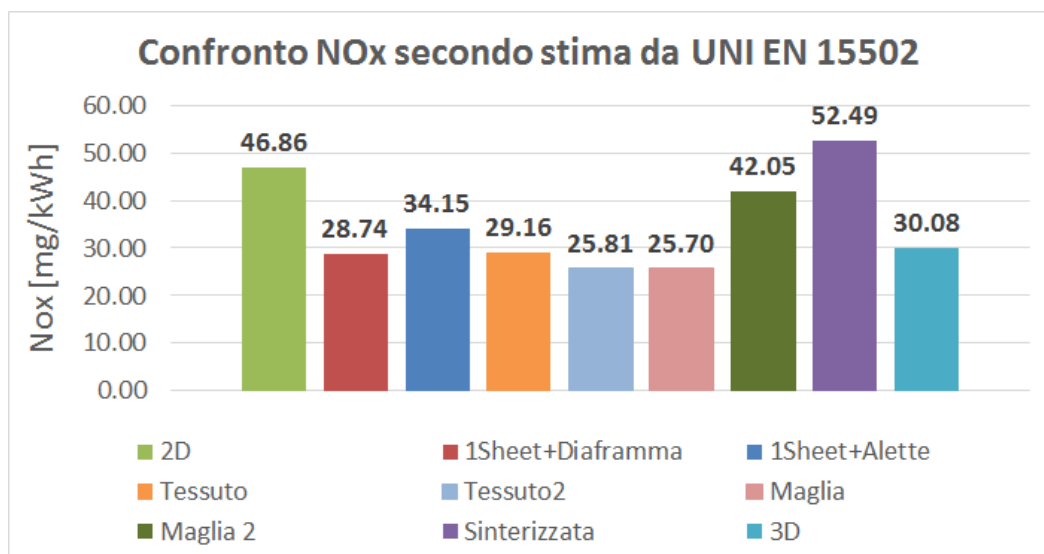


Figura 57 - Confronto delle emissioni di NOx per i diversi bruciatori, secondo metodo di calcolo proposto da normativa UNI EN 15502.

Ricordiamo che il valore massimo per appartenere alla classe più performante sono 56 mg/kWh, quindi tutte le caldaie rientrano in tale classe.

Concludendo, per quanto riguarda le emissioni possiamo dire che non c'è un bruciatore che si differenzi in assoluto, in positivo o in negativo, rispetto agli altri. I tessuti in genere sembrano essere i più performanti per quanto riguarda gli NOx. Mentre per il CO i tessuti sembrano essere gli sfavoriti.

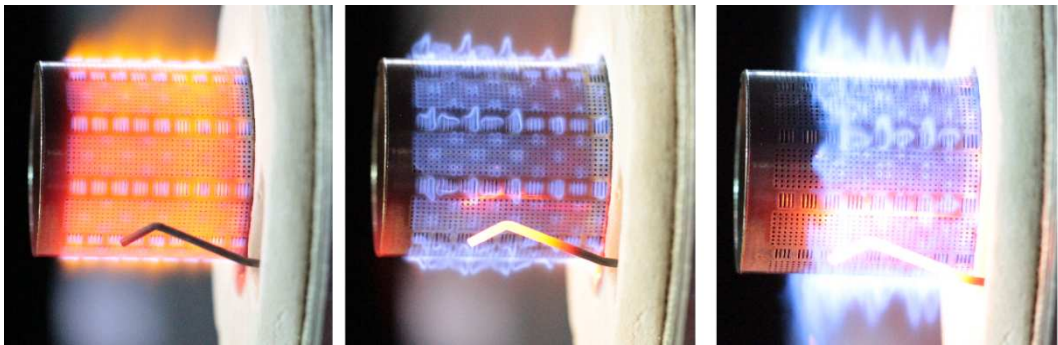
Il confronto diretto tra il modello standard in 2D, il modello studiato appositamente per la maglia e lo standard rivestito con maglia metallica sembra mostrare quest'ultima soluzione come preferibile in quanto con emissioni minori tra le tre.

## **6.7. PROVE IN ARIA LIBERA**

Per quanto riguarda le prove in aria libera si è provveduto a estrarre il bruciatore, il ventilatore e la valvola di miscelazione dal corpo caldaia, per poter osservare le fiamme che sono state prodotte nelle prove precedenti. Non si tratta di una prova quantitativa, ma piuttosto di una prova qualitativa, anche perché non si può ignorare l'effetto che ha la camera chiusa in cui brucia la fiamma in caldaia, specialmente sulla stabilizzazione di fiamma.

Per ogni bruciatore si è provveduto a registrare le fiamme prodotte a un basso numero di giri (1100/1200 rpm, corrispondenti a circa 2.5 kW) ad un numero di giri intermedi (2200 rpm, corrispondenti a circa 3.6 kW) e ad un alto numero di giri (5200 rpm, corrispondente a circa 25 kW). Qui di seguito riportiamo le immagini di ciò che si è osservato:

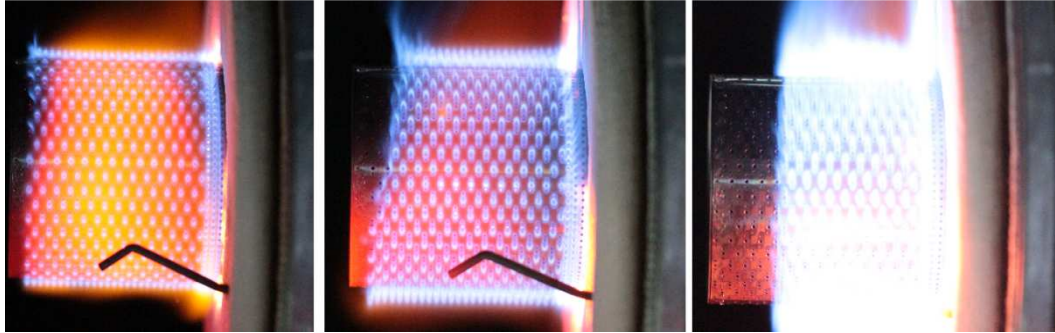
- LAMIERA TRANCIATA IN 2D: è da notare come l'acciaio diventi incandescente per le basse portate (quando il flusso di gas non è sufficiente a staccare la fiamma dalla superficie) e invece si raffreddi man mano che la fiamma si allontana con il crescere della portata termica. Alla massima potenza la fiamma è talmente soffiata che comincia il fenomeno del blow-off all'estremità più lontana del bruciatore, estremità nella quale le fiamme sono sempre più lunghe, come si nota anche dalla foto a potenza intermedia.



*Figura 58 – Test in aria libera del 2D per potenze termiche crescenti*

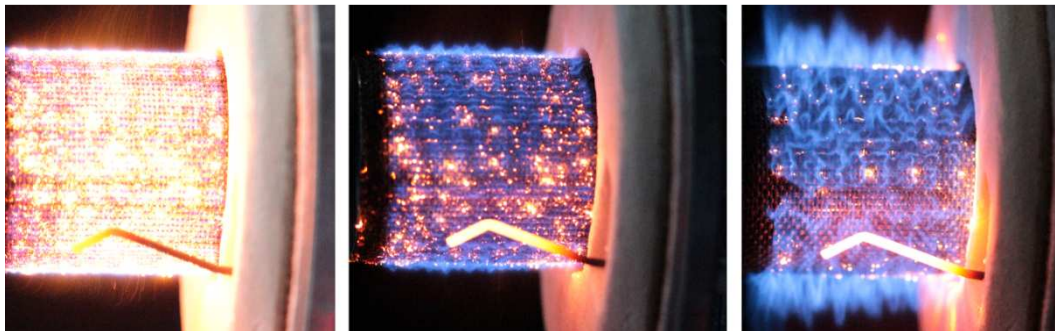
- SINGLE SHEET CON DIAFRAMMA INIZIALE: In questo caso, a bassa potenza termica la superficie è meno incandescente e la fiamma è già più definita che nello standard. L'effetto del blow-off però comincia prima ed è molto sviluppato alla massima potenza termica. Come per il paragrafo in cui si descrivono i modelli testati, anche qui alcune foto verranno omesse.

- **SINGLE SHEET CON ALETTATURA INIZIALE:** anche in questo caso la fiamma è più distaccata dalla superficie in acciaio, ma in modo meno evidente che con il diaframma.



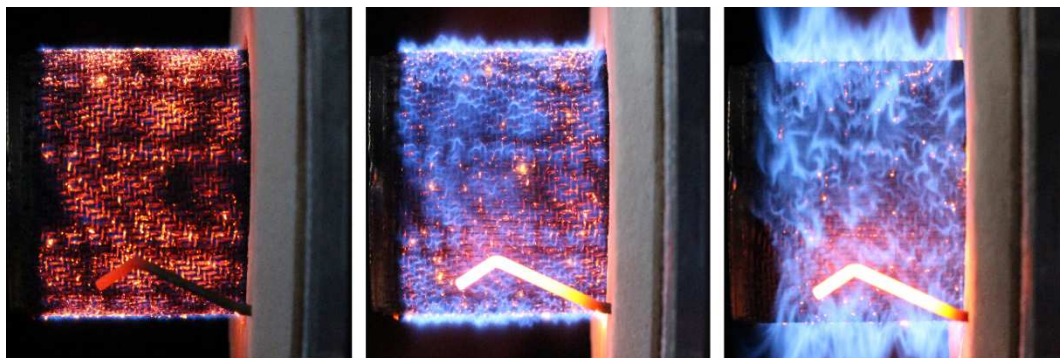
*Figura 59 - Test in aria libera del 1 Sheet + Alette*

- **TESSUTO:** si nota bene come il tessuto diventi incandescente e la fiamma blu scompaia alla vista, sintomo di un probabile inizio di rientro in matrice.



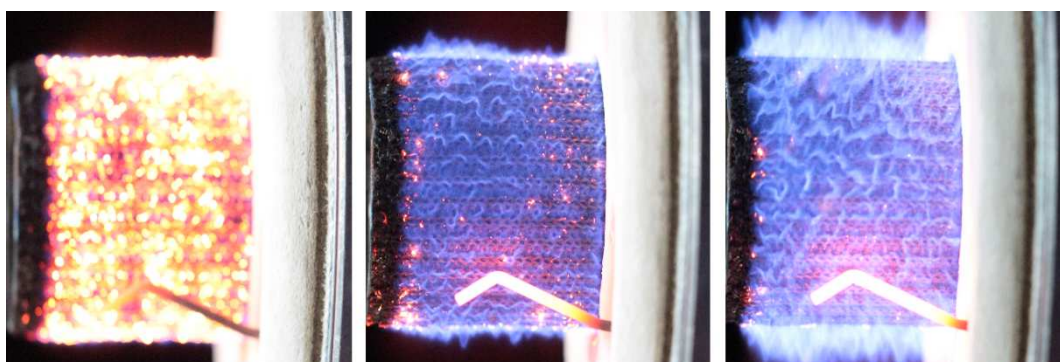
*Figura 60 – Test in aria libera del ricoperto con tessuto*

- TESSUTO 2: rispetto al precedente tessuto (standard Polidoro), si nota come la fiamma sia più distaccata, al minimo carico la superficie è meno incandescente e al massimo la lunghezza di fiamma è maggiore.



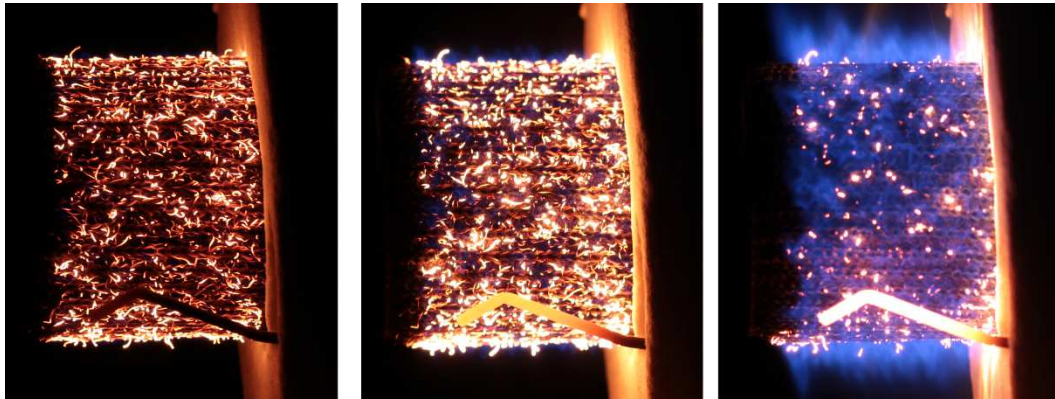
*Figura 61 – Test in aria libera con altro tessuto*

- MAGLIA: anche in questo caso si nota come a basse portate termiche la maglia diventi incandescente e non si percepisca più la fiamma libera. Ad alte portate termiche non vi è segno di blow-off.



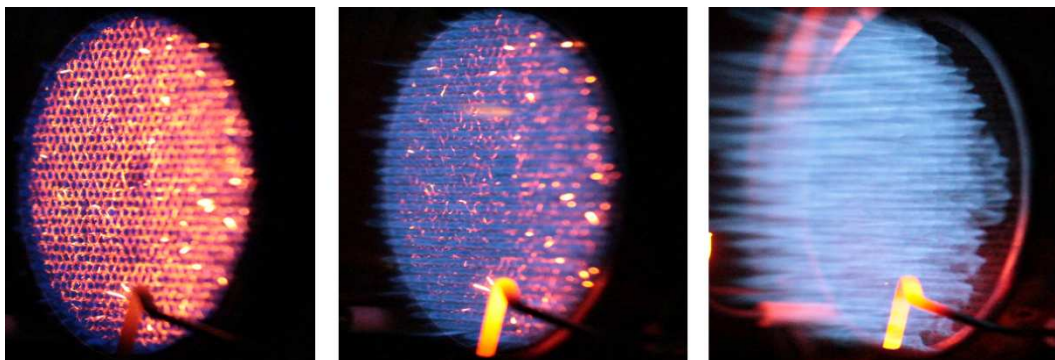
*Figura 62 – Test in aria libera dello standard ricoperto con maglia*

- **MAGLIA 2:** in questo caso la fiamma che si sviluppa è più corta e vicina alla superficie del bruciatore, rispetto allo standard ricoperto con maglia, lo si capisce notando come la fiamma sia molto meno blu rispetto alle foto al punto precedente.



*Figura 63 – Test in aria libera del modello a maglia metallica con distributore ad asole*

- **FIBRA SINTERIZZATA:** al minimo carico la matrice non è molto radiante e la fiamma è ancora piuttosto esterna ad essa. Al massimo carico, anche se la lunghezza di fiamma è notevole, ma non si hanno ancora fenomeni di blow-off.



*Figura 64 – Test in aria libera con fibra sinterizzata*



- LAMIERA TRANCIATA 3D: in questo caso le fiammelle sono molto bene distinte già al minimo carico, non si può definire una superficie di fiamma unica. Inoltre il fenomeno del blow-off comincia già a carichi parziali.

Dalle varie prove in aria libera possiamo evincere che più la fiamma è ancorata alla superficie a basse portate termiche e meno si incorre nel fenomeno del blow-off al salire della potenza. Le fibre, sia tessuto che maglia, sono i modelli in grado di diventare più incandescenti e quindi probabilmente sono i primi a vedere un rientro della fiamma nella matrice. Nel caso dei bruciatori in acciaio tranciato, sia piano che 3D, il distacco della fiamma dalla superficie è voluto per evitare che questa si deformi troppo a contatto con le alte temperature, è comunque da tenere sotto controllo il fenomeno del blow-off che potrebbe portare al distacco totale della fiamma.

Come detto sopra, comunque questa valutazione non è del tutto indicativa del comportamento reale in caldaia in quanto le pareti dello scambiatore vanno a proteggere la fiamma e potrebbero ritardare o addirittura impedire certi fenomeni di sollevamento della fiamma.

## **6.8. PERDITE DI CARICO**

Per quanto riguarda le perdite di carico, con l'apposito strumento descritto al paragrafo 6.1, si è misurata la perdita di carico, statica, dinamica e quindi totale, che ogni bruciatore impone ad un flusso d'aria mosso dal ventilatore a definiti numeri di giri. I risultati ottenuti sono ancora di tipo qualitativo piuttosto che quantitativo perché per calcolare la perdita di

carico effettiva ci si sarebbe dovuti inserire nel sistema caldaia e con la miscela effettivamente utilizzata. I valori ottenuti però ci permettono comunque di fare un confronto tra i diversi modelli poiché il sistema dei test è rimasto costante per tutte le prove.

I risultati ottenuti sono rappresentati nei seguenti grafici:

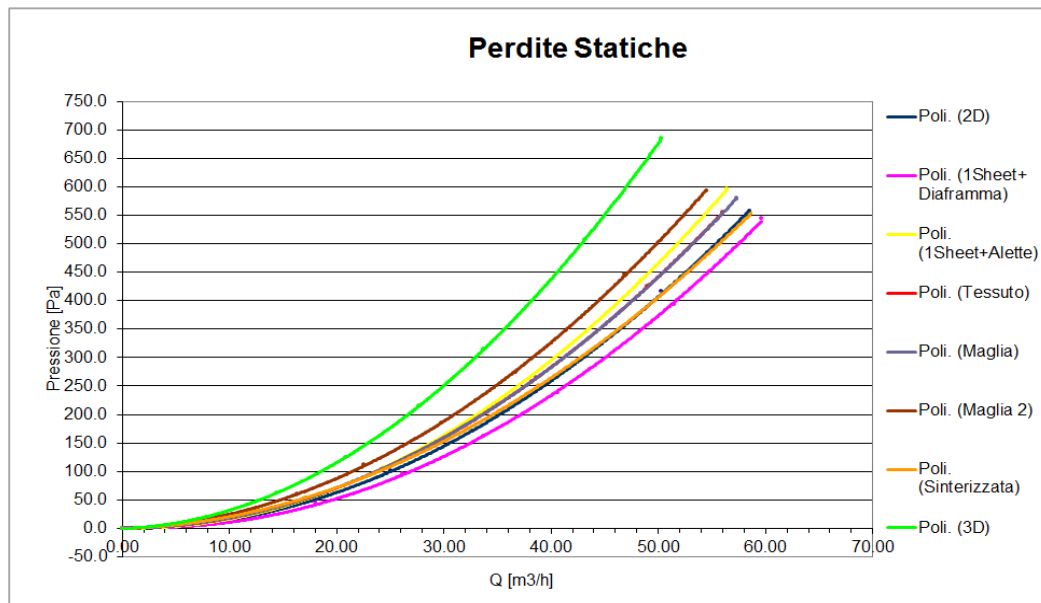


Figura 65 – Perdite di pressione statica dei vari bruciatori.

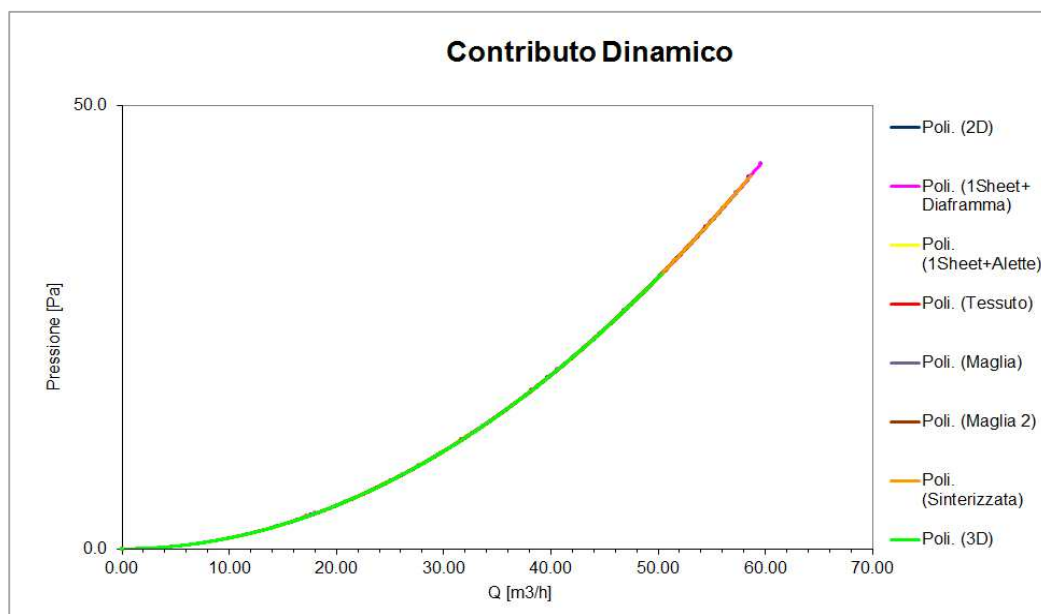


Figura 66 – Perdite di pressione dinamica dei vari bruciatori.

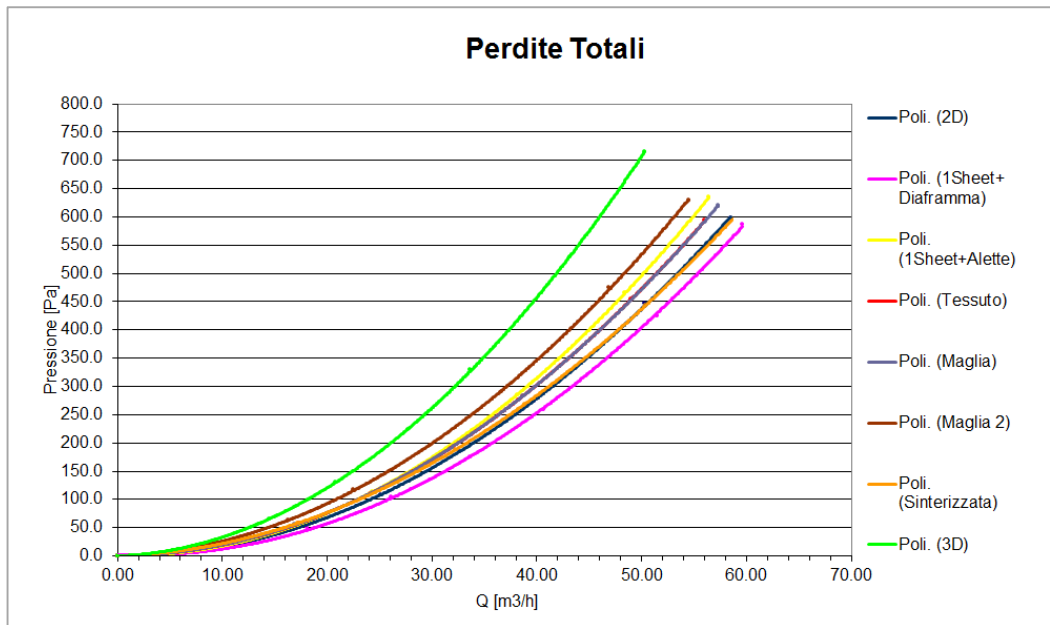


Figura 67 – Perdite totali di pressione dei vari bruciatori.

Dalla figura 65 per le perdite statiche si nota subito come il bruciatore in lamiera tranciata in 3D abbia perdite nettamente superiori a tutti gli altri bruciatori. Seguono il single sheet con alette, lo standard ricoperto con maglia e quello ricoperto con tessuto Polidoro che hanno uguali perdite, così come lo standard Polidoro e la fibra sinterizzata. Le perdite minori sono riscontrate per il single sheet con diaframma; in questo caso la mancanza delle alette iniziali fa molta differenza.

Per quanto riguarda le perdite dinamiche, i vari bruciatori non influiscono sulla quota di pressione da convertire in energia cinetica lungo il condotto e quindi il grafico 66 collassa in un'unica linea per tutti i modelli testati. Di conseguenza quindi il diagramma delle perdite totali (Figura 67) ricalca quello delle perdite statiche.

## 6.9. VALUTAZIONI DI POROSITÀ

Poiché nelle diverse prove non si è visto una differenza schiacciante tra il funzionamento dei bruciatori a fibra porosa rispetto a quelli in lamiera tranciata si è deciso di valutare se essi effettivamente permettessero una combustione *IN* mezzo poroso o se questa avvenisse semplicemente sopra la loro superficie.

A questo proposito si è quindi proceduto con il valutare il numero di Peclet per ognuno di loro; ricordiamo brevemente che quando il numero di Peclet supera il valore soglia di 65 la combustione può avvenire nel mezzo poroso, altrimenti questa si sposta in superficie.

Il numero di Peclet si calcola attraverso l'equazione:

$$Pe = S_L * d_m * C_p * \rho / \lambda$$

Dove:

- $S_L$  è la velocità laminare di fiamma. Poiché essa deve essere pari alla velocità di uscita della miscela aria-combustibile per far sì che il fronte di fiamma resti in una posizione fissa e non arretri o si sposti in avanti, si è deciso di calcolarla come velocità media della miscela, cioè come il rapporto tra la portata volumetrica in uscita (in m<sup>3</sup>/s) e la sezione ortogonale di passaggio (in m<sup>2</sup>), la quale a sua volta è stata calcolata come prodotto tra la superficie media dei vari macrofori per la stima del loro numero per cm<sup>2</sup> di superficie porosa, per la misura della superficie ricoperta di tessuto poroso:

$$S_L = \frac{\dot{V}_{fuel} + \dot{V}_{air}}{A_{foro} * n_{fori/cm^2} * cm_{tot}^2}$$

- $dm$  è il diametro medio equivalente dei fori del tessuto. Il suo valore è stato stimato facendo una media dei diametri equivalenti di diversi fori.
- $C_p$  è il calore specifico a pressione costante della miscela aria-combustibile, esso è stato calcolato come somma dei  $c_p$  dei due componenti pesata per la loro frazione in peso:

$$C_{p\ mix} = \sum_i C_{p\ i} * W_i$$

- $\rho$  è la densità della miscela aria-combustibile, è stato calcolato come il rapporto tra il prodotto del peso molecolare della miscela per la pressione alla quale si trova e il prodotto tra la costante universale dei gas per la temperatura della miscela in kelvin:

$$\rho_{mix} = MW_{mix} * \frac{P}{R * T}$$

Tale formula deriva dalla legge universale dei gas.

- $\lambda$  è la conduttività termica della miscela ed è stata calcolata come media pesata tra la conduttività termica dei vari componenti per la loro frazione molare, attraverso la seguente formula:

$$\lambda_{mix} = \frac{1}{2} \sum_i x_i \lambda_i + \frac{1}{\sum_i x_i / \lambda_i}$$

Come si può notare, solamente i primi due termini dipendono dal tipo di bruciatore, mentre gli altri sono sensibili solamente al tipo di gas usato.

I calcoli sono stati eseguiti solamente per il gas G20 (equiparabile a metano puro) per la condizione di minimo carico; in quanto, dalle prove in aria libera, questa sembrava l'unica condizione dubbia sull'effettivo rientro della fiamma in matrice.

I vari passaggi e i risultati sono riportati nella tabella seguente:

		TESSUTO	TESSUTO2	MAGLIA	MAGLIA 2	SINTERIZZATA
<b>V fuel</b>	m3/s	8.00E-05	7.51E-05	7.69E-05	7.9E-05	8.00E-05
<b>V air</b>	m3/s	9.93E-04	9.32E-04	9.55E-04	9.8E-04	9.93E-04
<b>d m</b>	m	7.80E-04	6.80E-04	7.10E-04	7.1E-04	1.20E-03
<b>A foro</b>	m2	6.07E-07	5.15E-07	3.96E-07	4.0E-07	1.13E-06
<b>fori/cm<sup>2</sup></b>	-	35	45	26	26	
<b>cm<sup>2</sup> tot</b>	cm2	162.73	162.73	162.73	153.94	
<b>A tot fori</b>	m2	3.46E-03	4.59E-03	2.04E-03	1.6E-03	9.53E-04
<b>SL</b>	m/s	0.31	0.27	0.62	0.67	1.13
<b>ρ mix</b>	kg/m3	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
<b>Cp mix</b>	J/kgK	13499	13499	13499	13499	13499
<b>λ mix</b>	W/mK	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
<b>Pe</b>	-	<b>89.93</b>	<b>67.44</b>	<b>162.43</b>	<b>176.53</b>	<b>501.57</b>

*Tabella 7 – Tabella riassuntiva dei calcoli fatti per ricavare il numero di Peclet per i vari modelli di bruciatori con fibra porosa*

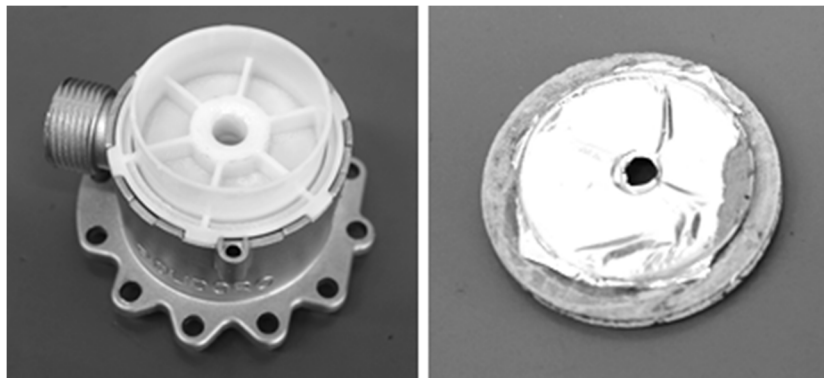
Come si nota dall'ultima riga della tabella 4, tutti i bruciatori al minimo carico prevedono un numero di Peclet superiore a 65, anche se il secondo tessuto non lo supera di molto. Ciò significa che tutti i modelli prevedono la possibilità del rientro di fiamma in matrice.

Da notare che, se aumenta il numero di giri del ventilatore, aumenta anche la portata di combustibile inviata al bruciatore e quindi deve aumentare la velocità laminare di fiamma per evitare il blow-off. Questo fatto farebbe aumentare il numero di Peclet garantendo ancor più la combustione in matrice; in realtà, dalle foto, si vede che succede esattamente il contrario, cioè la fiamma si stacca dal bruciatore. Questo è probabilmente dovuto al fatto che la velocità di fiamma aumenta con un certo ritardo rispetto alla portata di gas, tanto da far sì che la fiamma possa staccarsi dalla superficie impedendo quindi che rientri ulteriormente.

## 6.10. STUDIO DEL COMPORTAMENTO AL MINIMO CARICO TERMICO

Infine, si è voluto indagare su come si comportino i vari modelli a portate più basse rispetto alla modulazione 1:10. Si sono quindi a provate portate termiche dai 3 kW in giù, facendo in modo di restare sempre centrati sul 9% di CO<sub>2</sub>, fino ad arrivare a spegnimento di fiamma.

Per fare ciò si è a montato il mixer monoventuri per basse portate assieme ad un ulteriore diaframma per poter modulare a portate così basse.



*Figura 68 – Mixer aria-gas e diaframmi montati per poter scendere a portate termiche così basse in modo stabile*

Lo scopo di questa prova è valutare per quale portata il bruciatore non è più in grado di rimanere acceso, lungo la discesa delle portate si sono raccolti anche i valori di CO<sub>2</sub> e le emissioni di CO ed NO<sub>x</sub>. Infine è eseguita una curva ad U centrata ad una portata di 1.5 kW e a 9% di CO<sub>2</sub>.

Per tale fase di test ci si è concentrati solo su alcuni modelli:

- Lamiera tranciata in 2D
- Standard rivestito con maglia
- Bruciatore in maglia con distributore ad asole
- Bruciatore a fibra sinterizzata

Il seguente grafico riporta la portata minima, in kW, raggiunta da ogni bruciatore prima di spegnere:

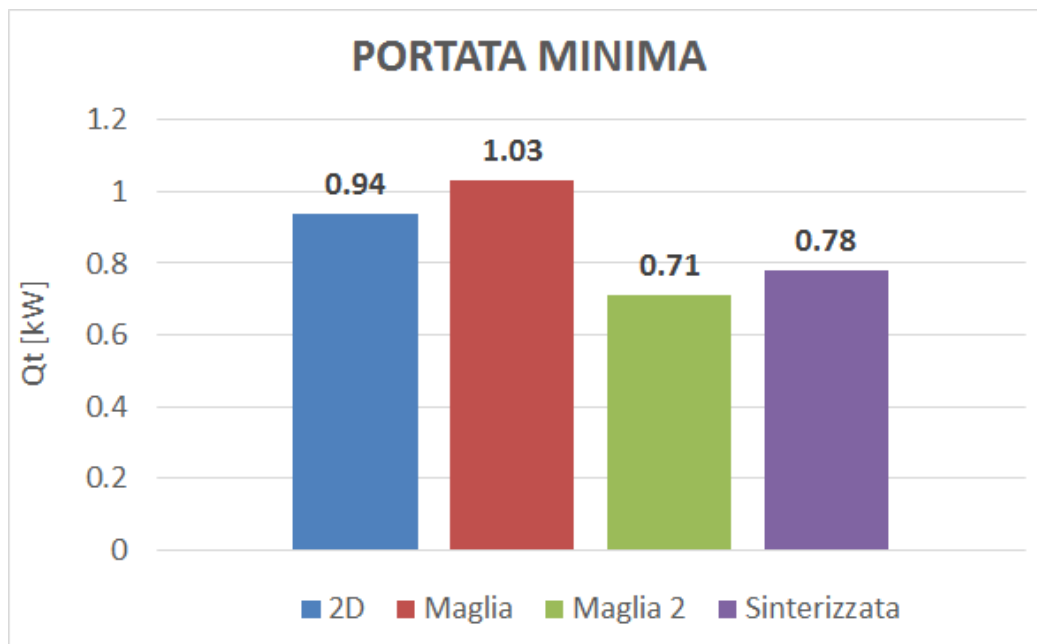


Figura 69 – Minima portata termica raggiunta dai bruciatori testati

Poiché per ottenere i risultati precedenti ad un certo punto della discesa si è dovuti bypassare l'elettrodo di ionizzazione, nel prossimo grafico sono riportate le portate termiche in kW alle quali è stato fatto il bypass.

L'elettrodo di ionizzazione è un dispositivo di sicurezza presente nella caldaia, questo elettrodo va ad attrarre gli ioni liberati durante una combustione riuscendo così a generare una piccola corrente elettrica che poi viene tramutata in un segnale da inviare alla centralina che controlla l'intera caldaia. Se questa corrente non è sufficiente la centralina vede la fiamma come spenta e blocca il flusso di gas verso il bruciatore. In questo modo si evitano fuoriuscite di gas.

In realtà a carichi così bassi (circa 1 kW termico) la corrente di ionizzazione prodotta è così bassa da non essere rilevata dall'elettrodo anche se la fiamma sta continuando a bruciare. In questo caso siamo andati a



bypassare questo sistema di sicurezza per avere l'effettiva portata minima. Se non avessimo compiuto questo bypass l'ultima portata letta sarebbe stata quella per cui l'elettrodo di ionizzazione non rilevava più una corrente sufficiente. Il seguente grafico riporta queste portate:

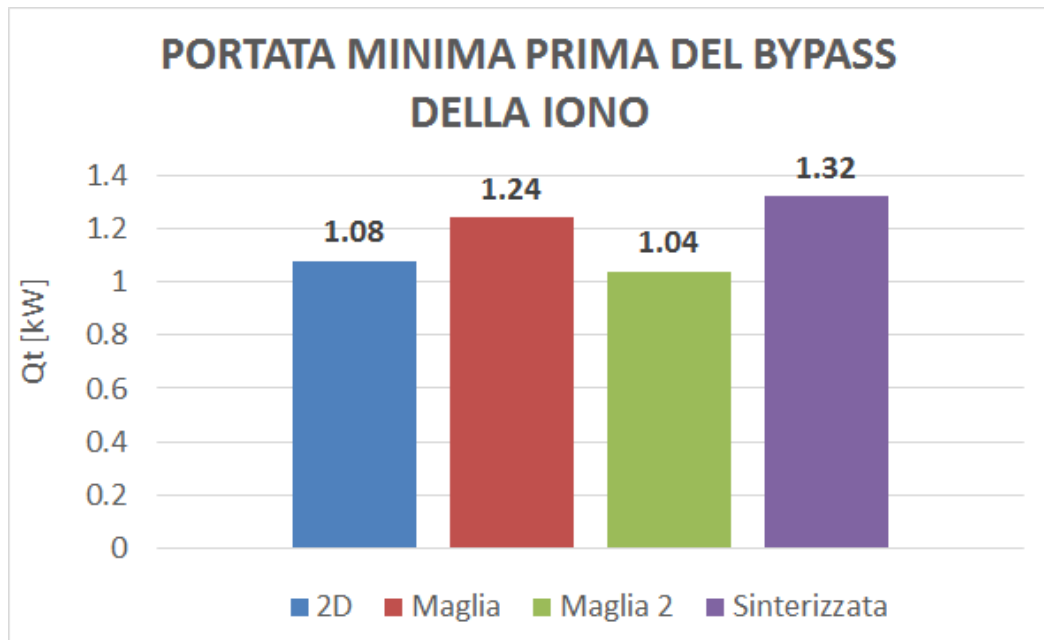


Figura 70 – Portata termica minima raggiunta prima dell'intervento dell'elettrodo di ionizzazione

In questo grafico si nota come le portate raggiunte senza bypass siano anche di 0.3 kW superiori alle portate minime raggiungibili.

In entrambi i grafici precedenti il bruciatore a maglia con distributore ad asole riesce ad arrivare a carichi più bassi rispetto agli altri modelli. In genere comunque i quattro modelli non sono molto diversi tra loro.

I prossimi tre grafici riportano i confronti tra gli andamenti di CO<sub>2</sub>, CO ed NO<sub>x</sub>:

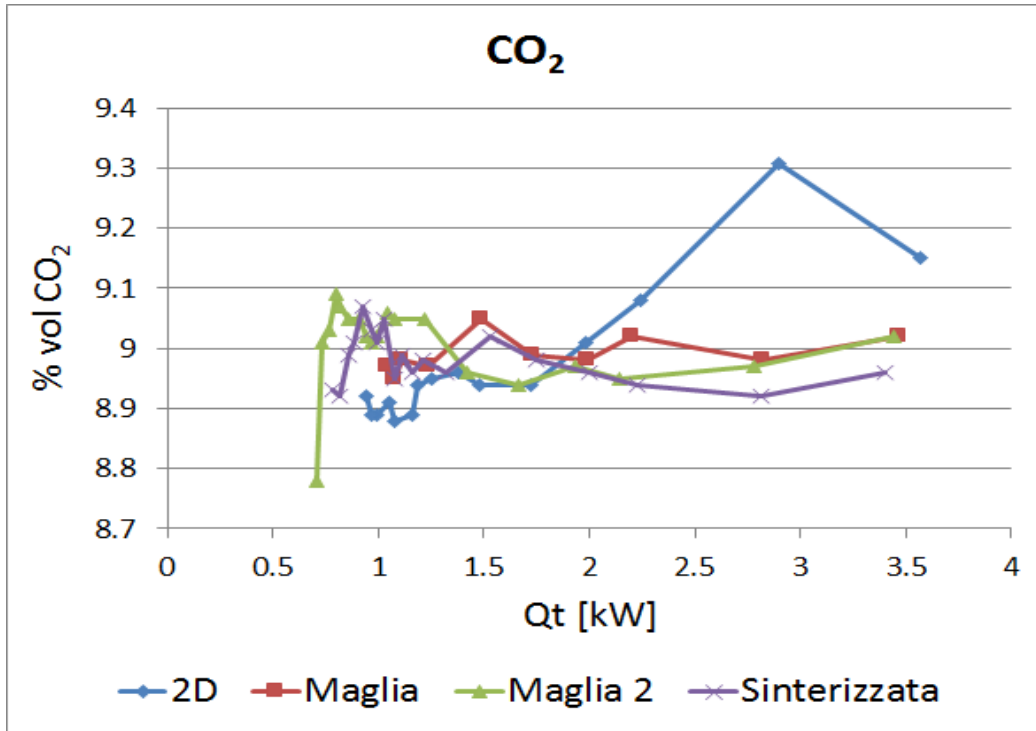


Figura 71 – Andamento della CO<sub>2</sub> nelle discese verso il carico minimo

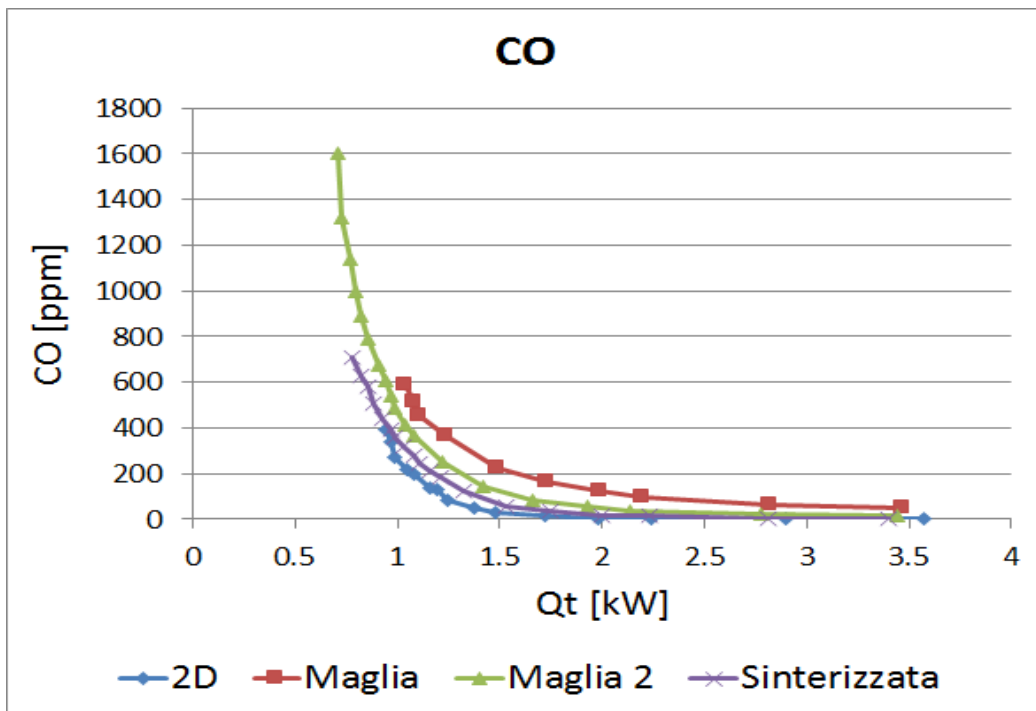


Figura 72 - Andamento della CO nelle discese verso il carico minimo

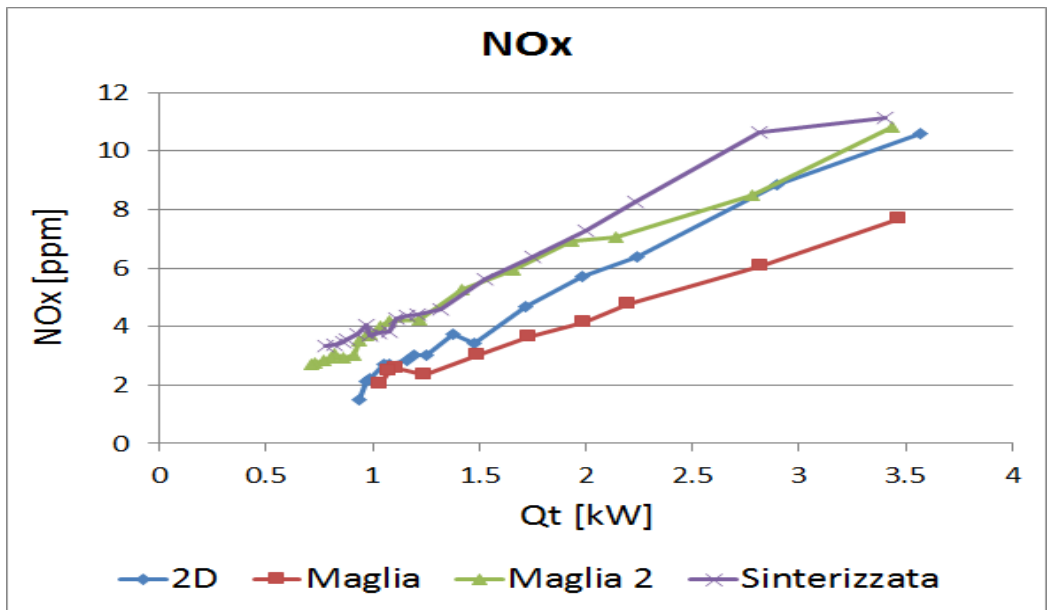


Figura 73 - Andamento della CO2 nelle discese verso il carico minimo

Anche in questo caso si nota come le curve abbiano tutte andamenti piuttosto simili tra loro.

Infine ci si è posti alla velocità del ventilatore tale da avere circa 1,5 kW e si sono eseguite le curve ad U.

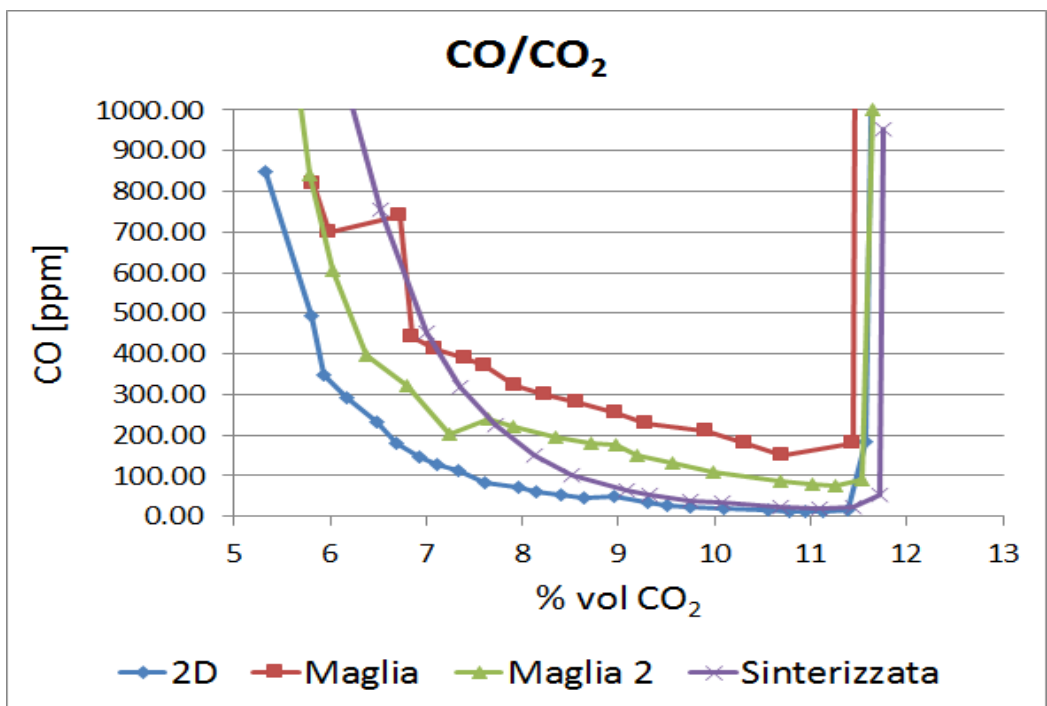


Figura 74 - Confronto tra le curve ad U dei vari bruciatori, centrate a 1,5 kW e a 9% di CO2

Queste curve a U, se confrontate con quelle ricavate centrandosi alla minima portata della regolazione 1:10 (figura 48), mostrano andamenti piuttosto diversi. In questo caso infatti si nota come il bruciatore con campana più ampia sia lo standard Polidoro, questo stesso bruciatore però era il modello che aveva risultati peggiori nelle normali curve ad U. Tale variazione di prestazioni è probabilmente da intendere al fatto che una fiamma così debole sia molto vicina alla superficie del bruciatore, che quindi si scalda e modifica il suo funzionamento.

### **6.11. IL BRUCIATORE A SCHIUMA CERAMICA**

Nell'ottica di dare una valutazione a tutti i tipi di bruciatori premiscelati porosi, sono stati eseguiti in sede Polidoro anche alcuni test su bruciatori porosi in schiuma ceramica.

Questo articolo non rientra nel catalogo prodotti della ditta, ma si è voluto inserire la valutazione di tale materiale poroso per valutare se esso possa effettivamente sostituire, anche solo in parte, alcuni prodotti di fabbricazione Polidoro.

Si è quindi deciso di valutare queste mattonelle ceramiche sotto i seguenti punti di vista:

- La temperatura della matrice solida.
- Il tempo necessario per avere una completa accensione di tutta la superficie porosa.
- Le emissioni prodotte, principalmente di CO e NOx.

I test sono stati eseguiti su due mattonelle in schiuma di carburo di silicio (SiC), una con porosità di 10 ppi e una di 15 ppi, e in totale si sono valutate quattro diverse condizioni di % di CO<sub>2</sub> e tre carichi termici differenti.

### MISURE DI TEMPERATURA:

Per le misure di temperatura sono state adoperate sia delle termocoppie di tipo K, sia una termocamera, imponendo pari a 1 il valore di emissività della mattonella. Ovviamente l'emissività non può avere valore unitario ma esso sarà sicuramente molto prossimo a tale valore limite infatti, effettuando una misurazione della temperatura in due punti distinti, una volta con la termocoppia e una volta con la termocamera, si sono ottenuti i seguenti risultati:

		Punti di misurazione	
		Posizione in basso	Posizione in alto
Strumento	Termocoppia	1230	1150
	Termocamera	1236	1158

Tabella 8 – Confronto tra i valori di temperatura in °C misurati con la termocoppia e con la termocamera.

Dopo aver stabilito il valore da imporre all'emissività del materiale, per valutare il valore di temperatura medio di tutta la mattonella, si è deciso di considerare il valore medio tra sette punti, come indicato nell'immagine seguente.

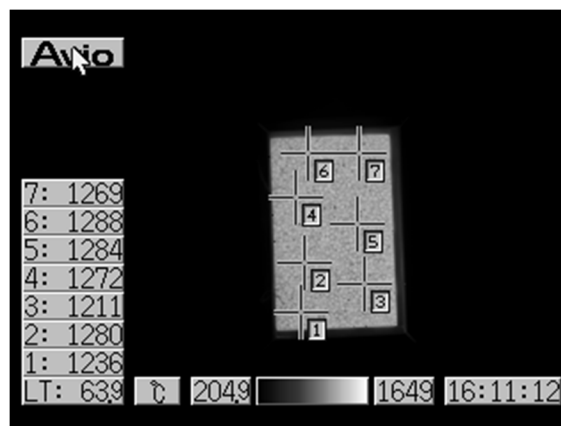


Figura 75 – Immagine restituita dalla termocamera con i sette punti di misura della temperatura

La tabella seguente riporta la temperatura media in °C ricavata dalla termocamera per le 12 condizioni di test per la mattonella con porosità di 10 ppi. Il combustibile utilizzato è sempre metano.

Temperatura media [°C]		CO2 % in vol.			
		7.5	9	10.5	11.5
<b>Carico termico [kW]</b>	10	1065	1176	1178	1260
	15	1108	1215	1284	1302
	20	1136	1263	1336	1348

*Tabella 9 – Temperatura medie misurate in °C per la mattonella con porosità di 10 ppi, per le 12 condizioni di carico previste*

Dalla tabella 9 si nota facilmente come la temperatura tenda a salire sia con l'aumento del carico termico, sia con l'aumento della percentuale di CO<sub>2</sub> nei fumi (ricordiamo che solitamente la condizione nominale prevede una percentuale di circa il 9 % di CO<sub>2</sub> in vol.).

Le stesse misurazioni, anche se in modo parziale sono state svolte anche sulla mattonella con porosità di 15 ppi:

Temperatura media [°C]		CO2 % in vol.			
		7.5	9	10.5	11.5
<b>Carico termico [kW]</b>	10		1141		1200
	15		1230		1293
	20		1309		1376

*Tabella 10 - Temperatura medie misurate in °C per la mattonella con porosità di 15 ppi*

Anche queste misure confermano l'andamento riscontrato per i 10 ppi. Si nota inoltre che una porosità più fitta non sembra comportare particolari differenze nella temperatura della matrice.

#### *TEMPO DI ACCENSIONE:*

Si è deciso di valutare il tempo di completa accensione della piastra ceramica (cioè il tempo perché la fiamma rientri completamente nella matrice) poiché, dopo la prima sessione di prove, si era notato che questo fenomeno impiegava sempre un tempo considerevole.

Infatti, dal momento dell'accensione della scintilla, la fiamma si sviluppa inizialmente sopra la superficie della matrice e poi, man mano che la struttura porosa si riscalda (e quindi il limite minimo di infiammabilità della miscela scende a valori più bassi), la fiamma comincia a rientrare, prima in alcuni punti, *hot spots*, e poi da questi si propaga la combustione in matrice, fino a quando non vi è più fiamma superficiale.

La valutazione dei tempi di accensione è stata fatta impiegando semplicemente un cronometro e il tempo è stato fermato quando la temperatura interna della fiamma raggiungeva il 95% della temperatura massima per quella condizione di carico e di CO<sub>2</sub>.

In genere si è notato come la matrice con porosità di 10 ppi fosse più veloce a raggiungere il rientro della fiamma e inoltre gli hot spots che si venivano a formare erano in posizioni casuali, mentre per la matrice a 15 ppi di porosità la fiamma cominciava a rientrare sempre dagli angoli della mattonella.

Le seguenti tabelle mostrano i risultati ottenuti per le 12 condizioni di prova prima per la mattonella a 10 ppi e poi per quella a 15 ppi. I valori inseriti sono in secondi.

Tempo di accensione [sec]		CO2 % in vol.			
		7.5	9	10.5	11.5
Carico termico [kW]	10	>600	92	81	50
	15	>600	94	53	54
	20	>600	110	60	55

Tabella 11 – Tempi di accensione in secondi per la mattonella da 10 ppi

Tempo di accensione [sec]		CO2 % in vol.			
		7.5	9	10.5	11.5
Carico termico [kW]	10		210		78
	15		420		70
	20		>600		104

Tabella 12 – Tempi di accensione in secondi per la mattonella da 15 ppi

Dalle Tabelle 11 e 12 si può notare come miscele più vicine a quella stechiometrica (la % di CO<sub>2</sub> stechiometrica è pari a 11.73%) impiegano molto meno tempo di quelle più diluite. Mentre la variazione del carico termico non sembra comportare grosse variazioni di tempo di accensione. Si nota inoltre come, a parità di condizioni di carico e miscela, la mattonella con porosità più fitta impieghi un tempo nettamente maggiore per far rientrare la fiamma.

#### EMISSIONI:

Per quanto riguarda le emissioni si è deciso di eseguire la loro misurazione solo per la miscela a 9% di CO<sub>2</sub> in vol., poiché questa è la condizione più frequente. I risultati ottenuti, in ppm, sono riportati nella tabella seguente.



Emissioni [ppm]		10 ppi		15 ppi	
		CO	NOx	CO	NOx
Carico termico [kW]	10	4	9	3	13
	15	8	9	11	14
	20	12	11	10	14

*Tabella 13 – Valori delle emissioni misurati in ppm per le due mattonelle. Le prove si riferiscono alla sola miscela al 9% di CO2 in volume ei fumi*

Come si vede dai dati riportati in Tabella 13, tutti i valori di emissione sono molto bassi. Inoltre le emissioni di CO aumentano con il carico mentre quelle di NOx non ne sono molto influenzate. Infine non c'è una sostanziale differenza tra le due porosità.

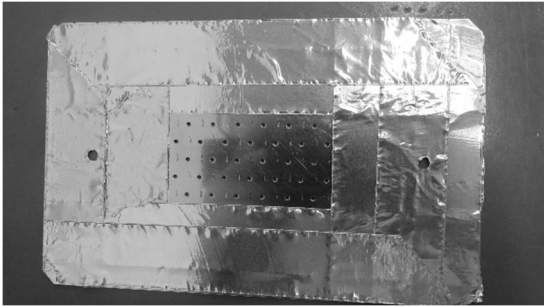
#### **VARIAZIONI DI CONFIGURAZIONE**

Infine si è voluto aggiungere un ulteriore test, ossia si sono ripetute le misure di temperatura e di tempi di accensione dopo aver modificato il piatto di acciaio che, posteriormente alla mattonella in ceramica, funge da distributore. Si è quindi voluto verificare se una diversa configurazione potesse in qualche modo andare ad influenzare quanto già visto.

Per le precedenti prove si è utilizzato un distributore privo di fori ma di dimensione più ridotta rispetto a quella della mattonella di ceramica, cosicché la miscela combustibile entri dai lati esterni.

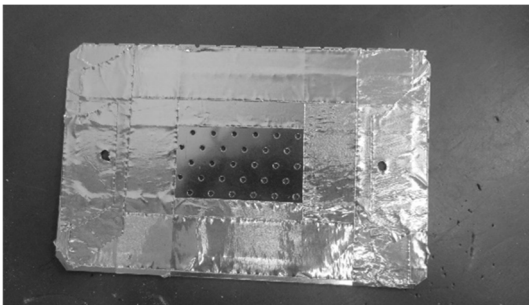
I vari distributori utilizzati sono i seguenti:

- Piastra metallica A, con fori di 1.5 mm di diametro:



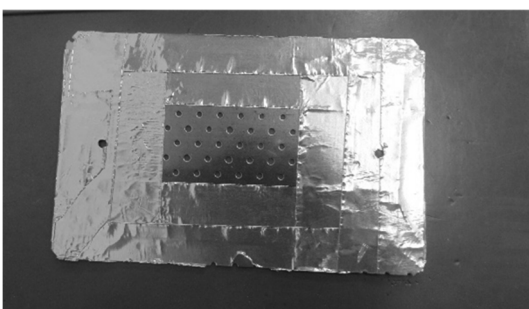
*Figura 76 - Distributore con fori da 1.5 mm di diametro*

- Piastra metallica B, con fori di 2 mm di diametro:



*Figura 77 - Distributore con fori da 2 mm di diametro*

- Piastra metallica C, con fori di 2.5 / 3 mm di diametro:



*Figura 78 - Distributore con fori da 2.5 / 3 mm di diametro*

È da specificare che le misurazioni di emissioni riportate precedentemente sono state effettuate utilizzando il piatto distributore C.

I risultati ottenuti testando i tre distributori sulla mattonella a 15 ppi di porosità, con miscela al 9 % di CO<sub>2</sub> in volume di fumi, sono indicati nelle tabelle seguenti.

Temperatura media [°C]		Distributore A	Distributore B	Distributore C
<b>Carico termico [kW]</b>	10	1169	1135	1159
	15	1229	1208	1213
	20	1304	1282	1283

*Tabella 14 – Temperature medie in °C della mattonella a 15 ppi di porosità con diversi distributori e miscela sempre al 9% di CO<sub>2</sub>*

Tempo di accensione [sec]		Distributore A	Distributore B	Distributore C
<b>Carico termico [kW]</b>	10	270	176	240
	15	314	340	420
	20	420	420	600

*Tabella 15 – Tempi di accensione in secondi della mattonella a 15 ppi di porosità con diversi distributori e miscela sempre al 9% di CO<sub>2</sub>*

Dai confronti riportati nelle Tabelle 14 e 15, non sembra che il distributore posteriore possa modificare sensibilmente né la temperatura della matrice, né il tempo di accensione. Questo probabilmente è dovuto al fatto che l'effetto principale di distribuzione della miscela infiammabile avviene all'interno della matrice e non a causa del piatto posteriore.

Concludendo, per quanto riguarda questa tipologia di bruciatori premiscelati si nota che la temperatura della miscela (e quindi la sua capacità radiante) aumenta con l'aumentare della quantità di gas nella miscela fino a livello stechiometrico e con l'aumentare del carico termico, mentre non è influenzata dal tipo di porosità. Questi risultati erano stati predetti dallo studio degli articoli scientifici fatto nel capitolo 5.

Per quanto riguarda il tempo per andare a regime si è visto che esso è dipendente principalmente dalla porosità piuttosto che dalla miscela aria-combustibile o dal carico termico. In ogni caso i tempi sono di natura considerevole quindi questo tipo di configurazione non sarebbe adatta per risposte rapide, ma piuttosto per lavori stazionari in ciclo continuo.

Infine, anche in questo caso come era stato ricavato dagli articoli studiati per il capitolo 5, le emissioni prodotte sono di molto inferiori a quelle misurate per bruciatori premiscelati di tipo superficiale, sia porosi che non.

Possiamo quindi concludere dicendo che questi bruciatori sono sicuramente adatti ad applicazioni di tipo industriale, in cui serva una grossa quantità di calore radiante per tempi molto lunghi. Non sono invece adattabili al riscaldamento domestico per via dei lunghi tempi di entrata in regime e di adattamento a carichi variabili. Inoltre, le grosse sollecitazioni termiche dovute alle continue variazioni di carico non sarebbero sicuramente sopportabili da questo materiale così fragile, non solo per la natura del suo componente, ma anche per la sua struttura non compatta.

## 7. CONCLUSIONI

Lo scopo di questa tesi era di fare una valutazione di diversi bruciatori porosi premiscelati (specialmente porosi a fibra metallica) e di compararli con bruciatori premiscelati più tradizionali per verificare se il mezzo poroso potesse o meno comportare un vantaggio.

Le valutazioni che si sono affrontate sono di diversa natura e non hanno portato ad una conclusione univoca.

Il primo aspetto che si è voluto studiare è se l'aggiunta di una fibra metallica porosa ad un bruciatore tradizionale in acciaio tranciato potesse migliorare la stabilità di fiamma, cioè far ottenere una combustione più completa o per un range più ampio di miscela infiammabile. Si sono quindi studiate le curve ad U, in cui si riportano i valori di CO emessi al variare della percentuale di CO<sub>2</sub> nei fumi. Più la campana della U è bassa ed ampia e più stabile si considera la combustione.

In questo caso si è visto che la semplice aggiunta di una fibra porosa, di qualsiasi tipo, permette una campana più ampia rispetto ai classici bruciatori in lamiera tranciata, soprattutto quando si lavora a basse portate termiche.

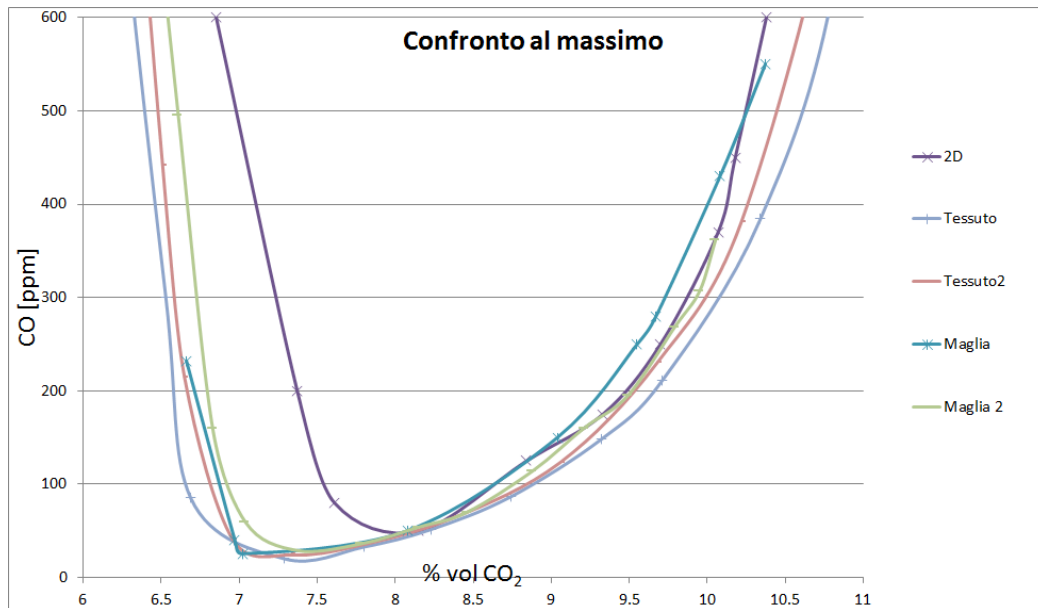


Figura 79 – Dettaglio delle curve ad U a massima potenza, confronto tra il bruciatore standard Polidoro, gli standard ricoperti con tessuto o maglia e la maglia con distributore ad asole

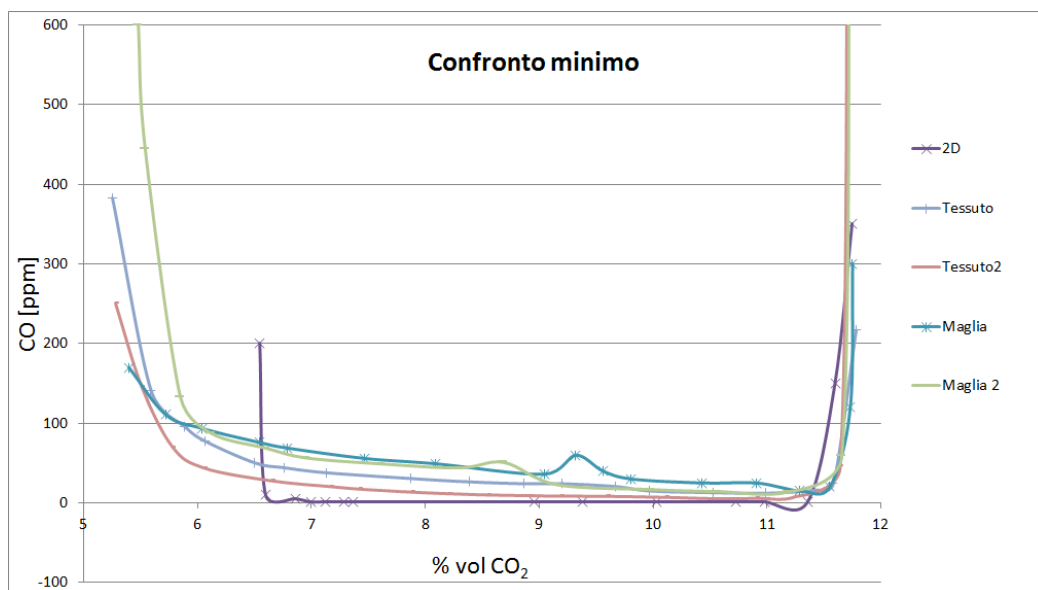


Figura 80 – Dettaglio delle curve ad U a minima potenza, confronto tra il bruciatore standard Polidoro, gli standard ricoperti con tessuto o maglia e la maglia con distributore ad asole

I due grafici precedenti sono un dettaglio dei grafici 47 e 48 presentati nel capitolo 6. In essi si vede bene come la semplice aggiunta di una maglia metallica, o meglio di un tessuto, sopra al bruciatore standard ne migliori la campana di stabilità a ogni portata termica.

Tornando a controllare il confronto tra tutti i bruciatori testati, la soluzione più stabile, specialmente con miscele molto magre, risulta comunque quella con lamiera tranciata in 3D. Con questa infatti, la campana si allarga ulteriormente verso sinistra e addirittura, al minimo, scompare la fase di instabilità prima dello spegnimento (nel dettaglio in figura 81 e 82).

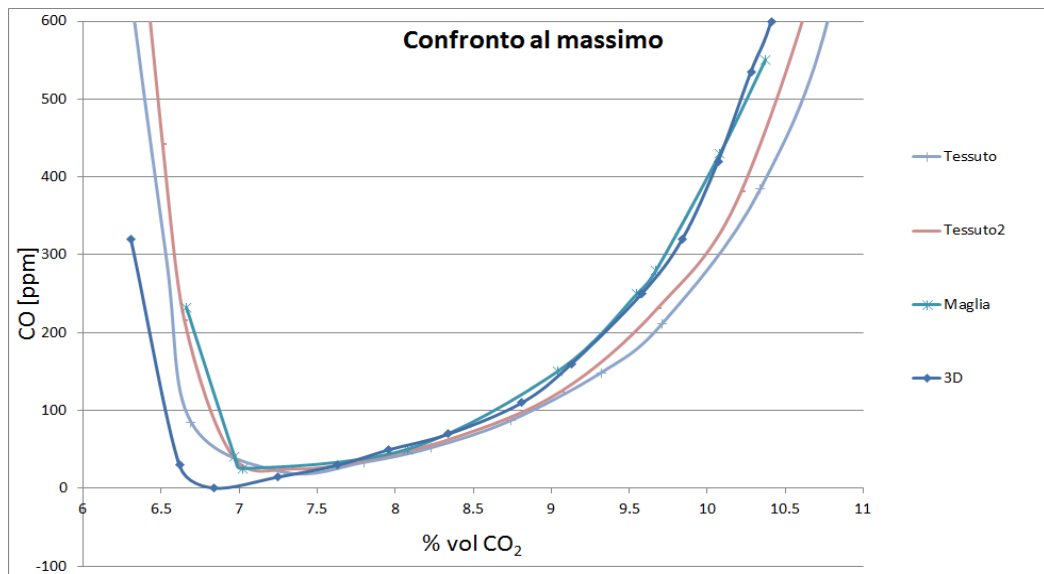


Figura 81 - Dettaglio delle curve ad U a massima potenza, confronto tra i bruciatori standard ricoperti con tessuto o maglia e la lamiera tranciata in 3D

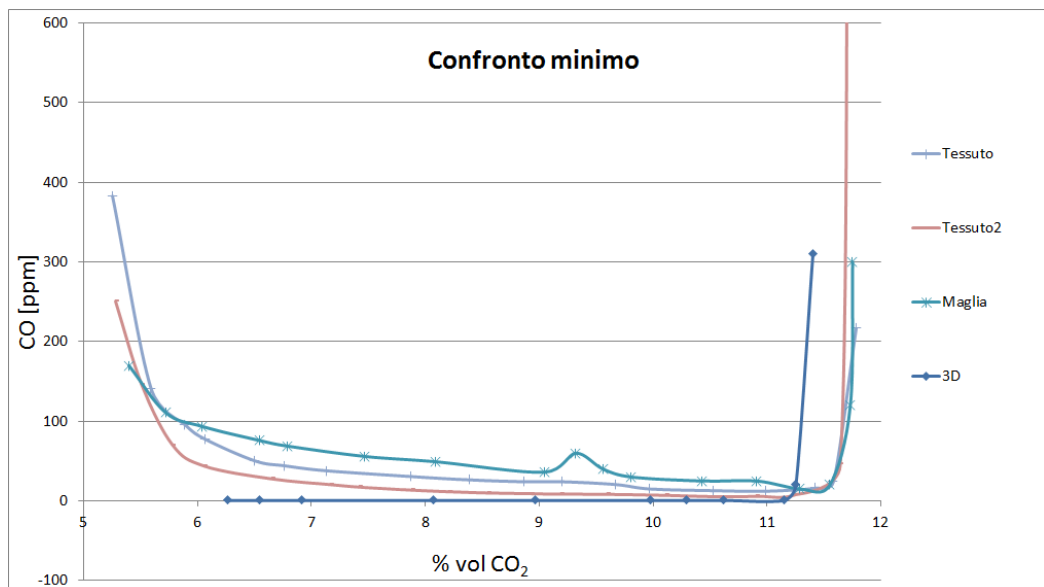


Figura 82 - Dettaglio delle curve ad U a minima potenza, confronto tra i bruciatori standard ricoperti con tessuto o maglia e la lamiera tranciata in 3D

Una volta stabilito che l'aggiunta di uno strato poroso può migliorare l'efficienza di un bruciatore che lavora a caldo (cioè a regime), si è passati a studiare se questo miglioramento si riscontri anche per un bruciatore che lavori a freddo.

Si è deciso di effettuare anche questa valutazione pensando al tipo di utilizzo di questi particolari bruciatori, ossia all'utilizzo in caldaia, dove praticamente non esiste la possibilità di far lavorare la macchina in modo costante per lunghi periodi, ma piuttosto si hanno continue modulazioni del carico o addirittura continue accensioni e spegnimenti.

In questo caso la condizione più critica per i bruciatori è quella di dover accendere al minimo carico termico dopo una sosta prolungata, poiché lo strumento si trova a lavorare in una zona prossima allo spegnimento di fiamma e, per di più, il fatto di essere freddo agevola ulteriormente questo spegnimento.

Dai test svolti si è ricavato che rivestire un bruciatore con una fibra metallica porosa non è sufficiente a garantire la stabilità di fiamma in queste condizioni. Infatti questi bruciatori, seppur riuscissero a mantenere accesa la fiamma anche a portate termiche molto basse, presentavano delle instabilità di fiamma sotto forma di rumore e fischi, condizione non accettabile per una macchina domestica. Si è però anche notato che un bruciatore poroso ceramico, come il bruciatore in fibra sinterizzata, non presenta tale fastidioso problema riuscendo comunque a scendere a portate termiche molto basse anche da freddo (per grafico dettagliato vedi figura 50).

Queste considerazioni ci portano a ritenere che la fibra potrebbe essere una buona soluzione anche per questo tipo di stabilità, ma che essa debba prima essere studiata in modo molto più approfondito per evitare la formazione di rumori.



Una soluzione a tale problema può venire non solo dall'ottimizzazione del singolo bruciatore ma di tutto il sistema caldaia (ad esempio si può studiare uno scambiatore da accoppiare al bruciatore, tale da non fungere da cassa di risonanza per le vibrazioni, oppure si può provvedere all'applicazione di uno snorkel in grado di smorzare le onde sonore prodotte dallo spostamento d'aria che si verifica all'accensione della fiamma).

Infine si è voluto valutare la bontà del bruciatore poroso dal punto di vista delle emissioni per varie tipologie di combustione (cioè variando sia il combustibile sia la potenza termica prodotta). Dai grafici ottenuti si è ricavato che, per gas G20 (simil metano) e G21 (con maggiore potere calorifero) i bruciatori che producono minori emissioni di CO sono quelli in lamiera tranciata; per gas a basso potere calorifero invece (gas G231) la soluzione in lamiera tranciata non è in grado di favorire una buona combustione e le emissioni di CO prodotta schizzano a valori molto alti.

Un semplice confronto tra la soluzione in lamiera 2D e quella rivestita in fibra mostra che questo accorgimento non comporta grandi risultati se non con gas povero (le figure seguenti 83 – 85 sono solamente dei dettagli delle figure 51 e 52 mostrate nel capitolo 6)

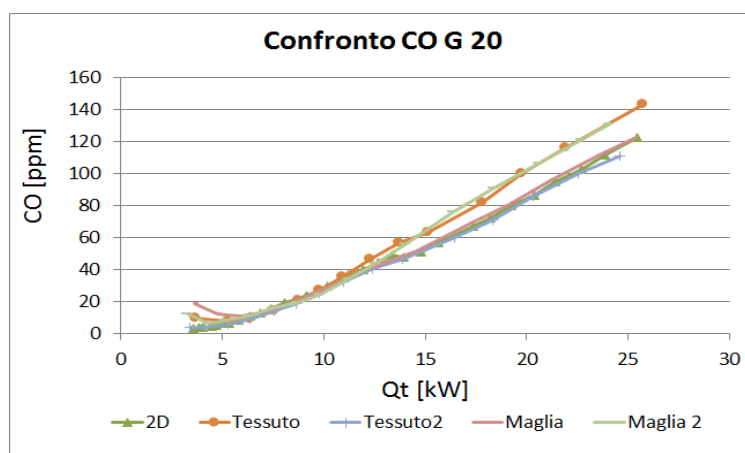


Figura 83 – Emissioni di CO con gas G20, confronto tra il bruciatore standard Polidoro e quelli rivestiti in fibra

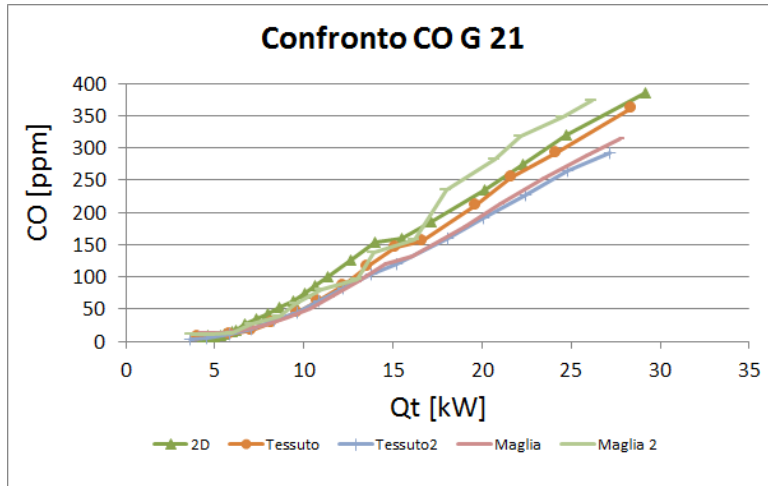


Figura 84 - Emissioni di CO con gas G20, confronto tra il bruciatore standard Polidoro e quelli rivestiti in fibra

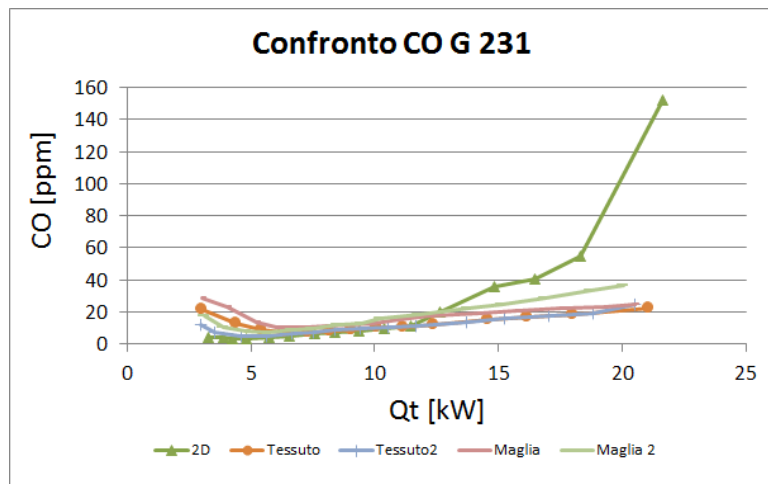


Figura 85 - Emissioni di CO con gas G20, confronto tra il bruciatore standard Polidoro e quelli rivestiti in fibra

Per quanto riguarda le emissioni di NOx, esse sono state misurate in contemporanea con quelle di CO e quindi si riferiscono alle stesse condizioni di potenza e miscela combustibile

Da una media pesata a varie potenze si è ricavato un valore unico di emissione di NOx e si è visto che tale valore cala sensibilmente quando si passa dal bruciatore tranciato standard allo stesso rivestito di tessuto poroso; ma poiché si è riscontrato un valore simile ai tessuti anche con un bruciatore particolare in lamiera tranciata, si è dedotto che per ottenere

un abbassamento di emissioni di NOx la fibra metallica non è l'unica soluzione attuabile. Tale risultato si riscontra anche se si osservano le emissioni del bruciatore in fibra sinterizzata, infatti i suoi valori di NOx sono i più alti riscontrati in tutte le prove.

Per chiarezza ripetiamo la figura 57 del capitolo 6:

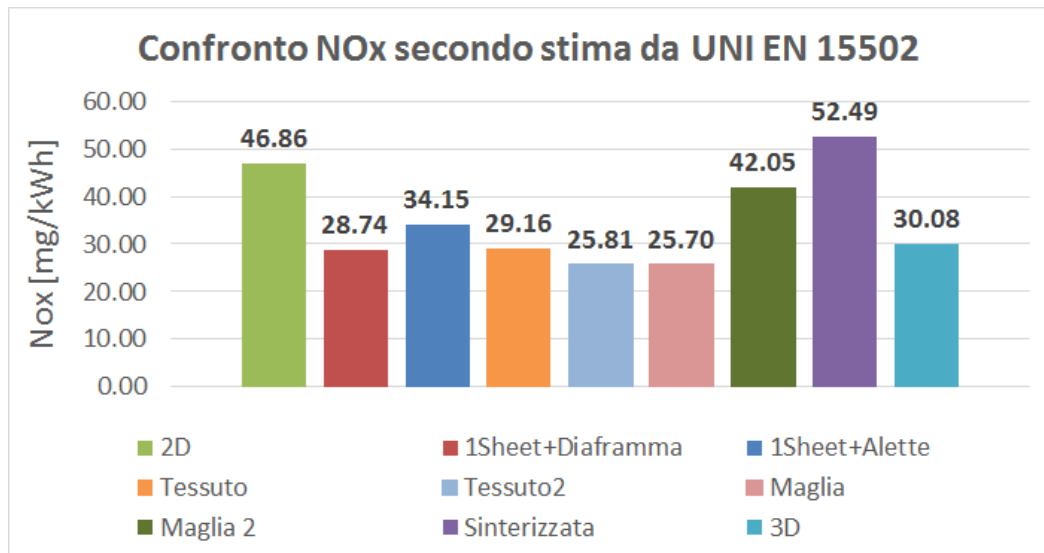


Figura 86 – Confronto delle emissioni di NOx per i diversi bruciatori, secondo metodo di calcolo proposto da normativa UNI EN 15502.

Un'ulteriore prova svolta era relativa alle perdite di carico dei bruciatori, si voleva verificare se l'aggiunta del mezzo poroso potesse introdurre perdite di carico significative. In realtà dai confronti si è notato che non vi è una sostanziale differenza tra tutti i bruciatori testati, se non per quello in lamiera tranciata 3D (per grafico dettagliato vedi figure 65 - 67).

Per finire la classificazione di questi bruciatori si è andati ad indagare su quale sia la portata minima che riescono a mantenere accesa. I seguenti due grafici sono la riproduzione delle figure 69 e 70 del capitolo 6. In essi si vede che il bruciatore in maglia Polidoro con distributore ad asole riesce a scendere alle portate più basse.

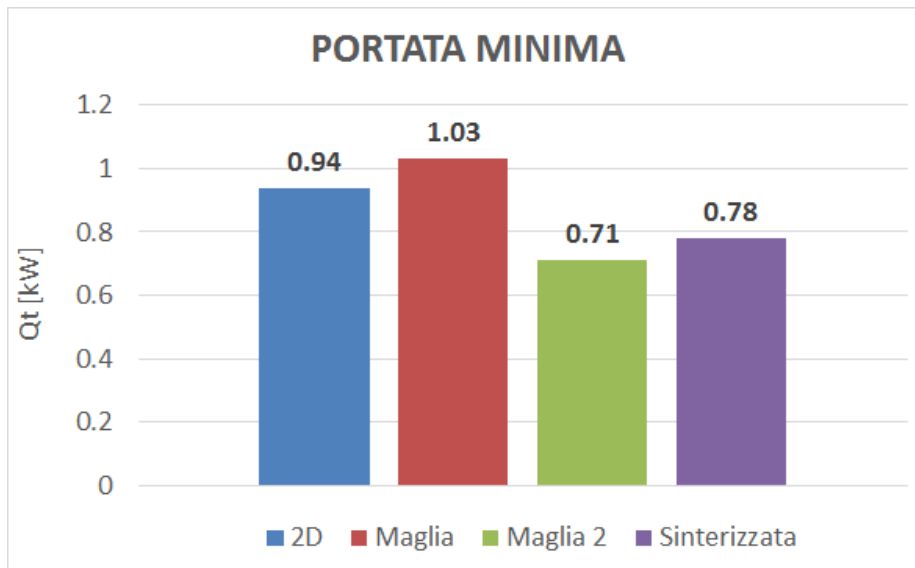


Figura 87 - Minima portata termica raggiunta dai bruciatori testati

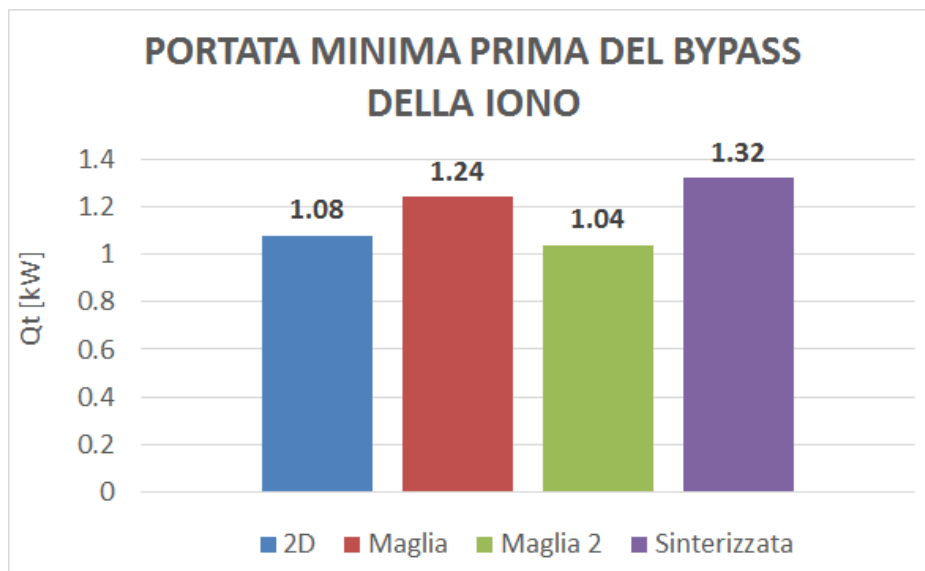


Figura 88 - Minima portata termica raggiunta dai bruciatori prima del bypass dell'elettrodo di ionizzazione

In ultima analisi si sono valutate le caratteristiche di temperatura, tempi di risposta ed emissioni di un bruciatore premiscelato a schiuma ceramica e si è visto che tali bruciatori riescono effettivamente a lavorare a temperature molto alte, tanto da diventare radianti (si è arrivati anche oltre ai 1300 °C), e con bassissime emissioni di CO ed NOx (si resta sempre sotto i 20 ppm), ma che hanno anche una notevole inerzia termica che li rende molto lenti ad accendersi e ad adattarsi ai cambiamenti di portata termica richiesti. Quest'ultimo fattore, assieme alla fragilità del materiale,

non li rende adottabili in una caldaia domestica, possono invece essere un'ottima soluzione in ambiente industriale in cui serve una importante frazione di calore radiante a carico costante.

In definitiva possiamo affermare che l'aggiunta del mezzo poroso sopra la superficie di un bruciatore in lamiera tranciata porta a dei benefici sotto il punto di vista di:

- Stabilità di combustione di un bruciatore operante in modo stazionario (la campana della curva ad U si allarga).
- Emissioni di NO<sub>x</sub>, sia a diversi carichi termici sia con diversi gas combustibili.

Non si sono visti vantaggi significativi per quanto riguardava:

- Accensione a basse portate termiche di bruciatori freddi (cosiddetta stabilità a freddo).
- Emissioni di monossido di carbonio.
- Perdite di carico.

Inoltre non si è riscontrato alcuno svantaggio nell'adozione di tali bruciatori tranne che dal punto di vista dei costi (anche il 2/300 % rispetto a quelli classici in semplice lamiera tranciata).

Per gli stessi confronti con altri bruciatori innovativi si è riscontrato che:

- La fibra porosa sinterizzata è nettamente migliore di tutte le altre soluzioni per la stabilità a freddo, ma ha le più alte emissioni di NO<sub>x</sub>.
- La lamiera tranciata 3D ha le curve a U tra le più estese, specie per miscele magre, ma ha alte perdite di carico.

Per concludere si vogliono lasciare degli spunti per ulteriori lavori futuri.

Sarebbe opportuno aggiungere una valutazione dell'influenza degli scambiatori di calore sulle prestazioni complessive, in modo da capire se esista un accoppiamento ideale scambiatore-bruciatore che massimizzi i risultati ottenibili.

Si potrebbe inoltre eseguire una valutazione più approfondita dell'influenza che può avere il carico specifico per unità di area, a parità di altri fattori. In questo caso si dovrebbe andare a modificare la foratura e/o il tipo di trama del mezzo poroso per ricercare se e in che misura questi fattori possono influenzare il comportamento di un bruciatore.

Si può inoltre andare a studiare più dettagliatamente se effettivamente la fiamma sia rientrata nei modelli che sono stati testati. Una possibilità è quella di ripetere i test in aria libera in condizioni più simili a quelle che si verificano in caldaia ed eseguire delle foto con l'ausilio di particolari filtri in grado di evidenziare solamente la fiamma rispetto allo sfondo luminoso che la circonda.

Un ulteriore sviluppo possibile è relativo alla ricerca di modulazioni più spinte. Si è visto come le fibre porose vadano ad allargare la campana di stabilità di combustione a miscele molto magre; questo dato dovrebbe sicuramente essere preso in considerazione quando si parla di progettare una caldaia con possibilità di modulazione superiore a 1:10.

Soprattutto quest'ultimo aspetto potrebbe essere la carta vincente per far entrare a pieno diritto i bruciatori premiscelati porosi a fibra metallica nel mercato delle caldaie a uso domestico; campo comunque in cui gli aspetti economici sono estremamente importanti e quindi non si può dimenticare il problema dei costi.

## 8. BIBLIOGRAFIA

Articoli consultati:

- A. Chattopadhyay, *“A Peclet Number Based Analysis of Mixed Convection for Lid-Driven Porous Trapezoidal Enclosure”* (2015)
- B. Yu, *“Combustion characteristics and thermal efficiency for premixed porous-media types of burners”* (2013)
- C. Keramiotis, *“An experimental investigation of stability and operation of a biogas fuelled porous burner”* (2012)
- C. Tierney et al. *“Materials design and selection issues in ultra-lean porous burners”* (2006)
- N. Delalic et al., *“Porous media compact heat exchanger unit – experiment and analysis”* (2004)
- H. Gao et al. *“Combustion of methane/air mixtures in a two-layer porous burner: a comparison of alumina foams, beads, and honeycombs”* (2013)
- I. Cerri, M. Pavese, G. Saracco, V. Specchia, *“Premixed metal fiber burners based on a Pd catalyst”* (2003)
- K. Qiu et al. *“Termophotovoltaic power generation system using natural gas-fired radiant burners”* (2006)
- M. A. Mujeebu, *“Combustion in porous media and its applications – A comprehensive survey”* (2008)
- M. Weclas, *“Potential of porous medium combustion technology as applied to internal combustion engines”* (2004)

- S. A. Leonardi, R. Viskanta, J. P. Gore, *“Radiation and thermal performance measurements of a metal fiber burner”* (2001)
- S. Wood et al. *“Porous burners for lean-burn applications”* (2006)

Testi Consultati:

- *“An introduction to combustion, concepts and applications”* di Stephen R. Turns
- *“Extrusion in Ceramic”* di Frank Handle
- *“Preparatory Study on Eco-design of CH Boilers”*, Task 4 di René Kemna, Martijn van Elburg, William Li, Rob van Holsteijn
- *“Process development for the manufacturing of flat knitted innovative 3D spacer fabrics for high performance composite applications”* di M. Sc. Md. Abounaim, tesi di dottorato presso l'università di Dresda