



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Prove sperimentali su dispositivi ceramici porosi per la rimozione
catalitica delle sostanze inquinanti in impianti di combustione a biomassa

Giovanni Stoppiello

Report RdS/2012/295

PROVE SPERIMENTALI SU DISPOSITIVI CERAMICI POROSI PER LA RIMOZIONE CATALITICA DELLE SOSTANZE
INQUINANTI IN IMPIANTI DI COMBUSTIONE A BIOMASSA

Giovanni Stoppiello (ENEA)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Studi sulla produzione elettrica locale da biomasse a scarti

Responsabile Progetto: Vito Pignatelli, ENEA

SOMMARIO

Nell'ambito dell'Accordo di Programma tra il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA per la Ricerca sul Sistema Elettrico, il progetto 2.1.2, "Studi sulla produzione locale di energia da biomasse e scarti", prevede per quanto riguarda l'obiettivo B5, "Studio delle emissioni di inquinanti da impianti di combustione alimentati a biomasse solide", la realizzazione da parte di FN s.p.a. di supporti ceramici porosi da attivare con catalizzatori, al fine di rimuovere prevalentemente le sostanze inquinanti di natura organica presenti nei fumi di combustione di impianti a biomassa.

Al fine di verificare il comportamento di tali prototipi a contatto con i fumi di combustione, sono state effettuate presso la Hall Tecnologica ThEXAS del Centro Ricerche ENEA di Saluggia delle prove di combustione in caldaia, durante le quali una portata campionaria dei fumi è stata prelevata dal condotto fumario principale e convogliata attraverso una linea secondaria di campionamento, lungo la quale sono stati disposti i dispositivi ceramici da testare.

I parametri di emissione della caldaia sono stati misurati lungo lo stesso condotto fumario e a valle della linea di campionamento, a sua volta adoperata alternativamente con o senza i campioni ceramici al suo interno.

Dalle osservazioni di carattere fluidodinamico condotte sui prototipi esaminati, e dal confronto dei valori di emissione ricavati nelle varie condizioni di esercizio dell'apparato sperimentale, è stato possibile fornire delle prime indicazioni riguardo l'eventuale impiego dei componenti ceramici in sistemi di rimozione catalitica degli inquinanti, con particolare riferimento alla loro configurazione geometrica.

INDICE

INTRODUZIONE	5
APPARATO SPERIMENTALE	6
Combustibile utilizzato.....	6
Generatore di calore	7
Linea generale di campionamento	8
Sezione di prelievo e di derivazione dei fumi	12
Strumenti di analisi dei dati sperimentali	15
SUPPORTI CERAMICI ESAMINATI	17
PROVE SPERIMENTALI.....	20
Prove di esercizio della caldaia	20
Verifiche sperimentali sui sopporti ceramici	21
RISULTATI	22
Parametri di esercizio della caldaia	22
Dati di emissione della caldaia.....	25
Comportamento fluidodinamico dei sopporti ceramici	27
Valori di emissione a valle dei sopporti ceramici.....	28
CONCLUSIONI.....	31

INTRODUZIONE

Il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA hanno stipulato in data 2 Agosto 2010 un Accordo di Programma in base al quale è concesso un contributo finanziario per l'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale.

Il lavoro di seguito descritto si riferisce alle linee di ricerca previste nel Piano Annuale di Realizzazione 2011, per quanto attiene all'Area "Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente", tematica di ricerca "Sviluppo e diffusione dell'uso delle fonti rinnovabili: energia elettrica da biomasse".

In particolare, l'attività di seguito descritta è stata condotta nell'ambito del progetto 2.1.2 "Studi sulla Produzione locale di energia da biomasse e scarti", in relazione all'obiettivo B5 "Studio delle emissioni di inquinanti da impianti di combustione alimentati a biomasse solide".

In base a tale obiettivo, ENEA ed FN s.p.a hanno definito un accordo di collaborazione per la realizzazione di elementi ceramici porosi di nuova concezione, utilizzabili come supporti attivati per la rimozione catalitica degli inquinanti organici presenti nei fumi di combustione di impianti a biomassa.

Alcuni dei componenti ceramici realizzati da FN s.p.a a scopo prototipale sono stati testati presso la Hall Tecnologica ThEXAS del Centro Ricerche ENEA di Saluggia, dove è stata allestita una linea sperimentale dedicata per effettuare le prove propedeutiche e preliminari su tali dispositivi.

Il presente documento descrive l'apparato sperimentale predisposto a tal scopo, le modalità di esecuzione delle prove e i risultati ottenuti.

APPARATO SPERIMENTALE

Combustibile utilizzato

Nonostante la caldaia utilizzata per l'analisi sperimentale sia indicata dalla ditta costruttrice come un impianto a biomassa multicomcombustibile, le prove di combustione sono state condotte esclusivamente con pellet di legno.

L'impianto ha infatti mostrato problemi di inceppamento del dispositivo di alimentazione del combustibile se alimentato a cippato, mentre non è risultato adatto a bruciare materiale relativamente leggero (ad esempio lolla di riso) in quanto l'aria immessa in camera di combustione determina la fuoriuscita del combustibile dal braciere, in virtù della particolare conformazione degli iniettori.

Per le prove sperimentali è stato quindi utilizzato un pellet di legno naturale non trattato, rispondente alle normative DIN 51731, le cui caratteristiche fornite dal produttore sono:

- lunghezza media: 6 mm
- lunghezza massima: 30 mm
- potere calorifico: > 18720 kJ/kg
- ceneri residue: < 0,5%
- umidità: < 8%
- contenuto di zolfo: < 0,03%
- densità di bulk: 600 – 650 kg/m³
- densità lorda: 1210 kg/m³

Da analisi calorimetriche e termogravimetriche effettuate nel laboratorio chimico del Centro ENEA di Saluggia sono state inoltre ricavate le seguenti grandezze:

tenore idrico (%)	7,05
contenuto di umidità (%)	7,59
contenuto di ceneri (% tq)	0,34
potere calorifico superiore (kJ/kg tq)	19175
potere calorifico superiore (kJ/kg sul secco)	20630
potere calorifico inferiore (kJ/kg tq)	17965
potere calorifico inferiore (kJ/kg sul secco)	19514
potere calorifico inferiore netto (kJ/kg)	19585
contenuto di idrogeno sul secco (%)	5,09
contenuto di carbonio sul secco (%)	54,88
formula molecolare fittizia (sul secco)	CH _{1,11} O _{0,54}

Tabella 1: proprietà del combustibile utilizzato

Generatore di calore

L'impianto termico utilizzato per le prove sperimentali è una caldaia a combustibili solidi della ditta D'Alessandro Termomeccanica S.p.a., modello CSI 20.

Il combustibile viene alimentato dalla tramoggia di carico alla camera di combustione attraverso un doppio sistema di coclee e una valvola rotante. Quest'ultima è inserita tra i due organi di trasporto al fine di migliorare il dosaggio del materiale e per isolare il serbatoio da possibili ritorni di fiamma o da flussi inversi dei fumi di combustione.

Le coclee e la valvola rotante sono collegate tra loro attraverso un sistema di trasmissione a catena, il quale è a sua volta collegato ad un motore elettrico mediante un riduttore di giri.

L'aria di combustione è convogliata all'interno della caldaia mediante una soffiante elettrica, la cui regolazione avviene in automatico in base alla potenza termica erogata dalla caldaia.

Il rapporto tra aria primaria e secondaria è invece impostato manualmente, agendo su una valvola a clapet che distribuisce il flusso d'aria tra gli iniettori posti in corrispondenza del bruciere e quelli sistemati nella parte superiore della camera di combustione.

La portata di combustibile è impostata agendo sul dispositivo di comando elettronico in dotazione all'impianto, regolando la frequenza del numero di giri del motore di alimentazione.

I fumi prodotti in camera di combustione fuoriescono dalla caldaia attraversando una cavità realizzata in corrispondenza del portellone frontale dell'apparecchio, e oltrepassando uno scambiatore a fascio tubiero mediante il quale viene riscaldata la portata idrica dell'impianto. Lo scarico dei fumi è posto in posizione verticale, nella parte posteriore dell'apparecchio.



Figura 1: caldaia a biomassa D'Alessandro Termomeccanica S.r.l., modello CSI 20

I dati tecnici forniti dal costruttore per il modello di generatore descritto sono indicati nella seguente tabella:

potenza nominale	kW	20
potenza al focolare	kW	24
massima pressione d'esercizio	bar	3
pressione di prova a tenuta	bar	4,5
massima temperatura di esercizio	°C	90
tensione alla rete	V	220
assorbimento elettrico	kW/h	0,21
consumo di combustibile*	kg/h	4,41
volume del serbatoio	dm ³	140
perdite di carico lato acqua (10K)	mbar	13
perdite di carico lato acqua (20K)	mbar	7
temperatura minima di azionamento	°C	40
capacità idrica della caldaia	litri	75
temperatura media dei fumi	°C	170 (± 20 %)
tiraggio minimo	Pa	20 (± 30 %)
diametro del camino	mm	160
portata dei fumi (180°C)	Nm ³ /h	36
peso caldaia vuota	kg/h	250 (± 5 %)
classe	EN 303-5	3

*con riferimento ad un potere calorifico inferiore di 17,6 MJ/kg, come da prospetto 8 della normativa EN 303/5, per prova di tipo "C"

Tabella 2: dati tecnici della caldaia forniti dal costruttore

Linea generale di campionamento

I fumi di combustione in uscita dalla caldaia attraversano un condotto fumario in acciaio, costituito da un primo segmento verticale non coibentato ($d_i = 150$ mm, $l = 525$ mm), e da un secondo tratto coibentato, posto in posizione orizzontale per una lunghezza pari a circa 2850 mm ($d_i = 150$ mm, $d_e = 190$ mm).

Lungo tale condotto, ad una distanza di circa 2800 mm dallo scarico della caldaia, una portata campionaria di fumi è prelevata in condizioni isocinetiche ed aspirata all'interno di una colonna d'acciaio, la cui lunghezza è circa pari a 1130 mm.

La stessa colonna è inserita per una lunghezza di 700 mm in un forno tubolare, che ne riscalda quindi la parte centrale. Quest'ultima è costituita da un portacella anch'esso in acciaio, all'interno del quale sono disposti i supporti ceramici da testare (vedi paragrafi successivi).

Ai due estremi della colonna, all'esterno del forno tubolare, sono disposti i punti di misurazione delle perdite di carico, relative quindi al sistema di derivazione dei fumi e ai componenti ceramici al suo interno.

In uscita dalla colonna d'acciaio i fumi di combustione vengono esaminati mediante un analizzatore portatile, capace di misurarne la temperatura e determinare la concentrazione di CO₂, O₂, CO, NO, NO₂, SO₂ ed idrocarburi incombusti.

Nella zona sottostante la colonna è poi disposto un portafiltro in acciaio, all'interno del quale è inserito un filtro in microfibra di vetro per la ritenzione e la misura del particolato nella portata campionaria dei fumi.

A valle di tale dispositivo è infine collegato il sistema di aspirazione e di raffreddamento dei gas.

All'interno del condotto fumario principale è inserita una seconda sonda di prelievo ($d_i = 6$ mm, $l = 75$ mm), con la quale i fumi vengono indirizzati direttamente ad altri due analizzatori, utili a misurare in questo caso la concentrazione di CO₂ e O₂. Nella stessa sonda di prelievo è inoltre presente una termocoppia di tipo K, mediante la quale si determina la temperatura dei fumi in uscita dalla caldaia.

E' inoltre prevista anche una terza sonda di campionamento dei fumi per la misura della pressione statica all'interno del condotto fumario (tiraggio).

Tutte le misure ricavate direttamente in condotta sono collegate ad un sistema informatico di acquisizione ed elaborazione dati, attraverso il quale è possibile determinare in tempo reale i maggiori parametri di esercizio dell'impianto (potenza, rendimento, portata, velocità, temperature, etc.), in maniera indipendente rispetto alle operazioni di verifica sperimentale dei supporti ceramici.



Figura 3: apparato sperimentale

Sezione di prelievo e di derivazione dei fumi

La sezione dell'apparato sperimentale corrispondente alla zona di prelievo della portata campionaria dei fumi è sostanzialmente formata dai seguenti componenti:

- sonda in acciaio per il prelievo isocinetico dei fumi di combustione.
- raccordi in silicone e punti di derivazione in vetro a "T", per la misura delle perdite di carico.
- colonna e portacestello in acciaio per il convogliamento dei fumi e l'alloggiamento dei supporti ceramici da testare.
- forno tubolare *Carbolite VST 12/600* per il riscaldamento dei fumi a contatto con i supporti ceramici.
- portafiltro in acciaio (diametro della sezione filtrante pari a 47 mm), e filtro in microfibra di vetro *Whatman GF/A* per la ritenzione del particolato.
- sistema di aspirazione e raffreddamento dei fumi, modello "*Zambelli*", composto da centralina refrigerante, condensatore e campionatore ad aspirazione.

Il prelievo dei fumi avviene in condizioni isocinetiche, in maniera quindi da non alterare il contenuto di particolato presente nella corrente gassosa. La portata campionaria è di conseguenza determinata in tempo reale attraverso l'elaborazione dei dati forniti dagli analizzatori connessi al condotto fumario principale.

Data la temperatura dei fumi, le concentrazioni di CO₂ e O₂, la portata e la composizione chimica del combustibile alimentato, il sistema di calcolo è in grado infatti di fornire automaticamente la portata di prelievo dei fumi, in base anche al diametro e alla posizione dell'ugello all'interno della sezione trasversale del condotto.

La stessa portata campionaria è poi regolata manualmente sul campionatore ad aspirazione, agendo sulle valvole di flusso e riciclo in dotazione allo strumento.

Le perdite di carico sono misurate mediante un manometro a colonna d'acqua, collegato a monte e a valle del portacestello d'acciaio per mezzo di raccordi a "T" in vetro, a loro volta inseriti nella linea di derivazione dei fumi attraverso dei raccordi in silicone.

L'utilizzo del forno tubolare ha lo scopo di evitare la condensazione dell'umidità e degli idrocarburi pesanti presenti nei fumi di combustione in corrispondenza degli elementi ceramici.

Esso è altresì utilizzato per regolare la temperatura di esercizio dei suddetti elementi, in vista soprattutto di una loro attivazione da parte di composti ad azione catalitica.



Figura 4: colonna d'acciaio, forno tubolare e sistema di aspirazione della portata campionaria

Le maggiori caratteristiche tecniche del forno tubolare *Carbolite VST 12/600* sono di seguito indicate:

- altezza del forno: 700 mm
- altezza totale dello strumento: 1000 mm
- diametro esterno: 350 mm
- diametro di lavoro: 110 mm
- lunghezza della zona riscaldata: 600 mm
- temperatura massima di lavoro: 1200°C
- temperatura massima di lavoro in esercizio continuo: 1100°C
- rampa di riscaldamento ($T_{max}-100^{\circ}C$): 45'
- termocoppia: tipo N
- alimentazione: 220 V (monofase)
- peso: 32 kg

I filtri in microfibra di vetro Whatman GF/A, utilizzati per la misura del particolato, hanno una capacità di ritenzione totale per particelle di $1,6 \mu\text{m}$, e un'efficienza di raccolta di 99,9% per particelle di diametro pari a $0,3 \mu\text{m}$.

Essi hanno un diametro di 47 mm, uno spessore di 0,26 mm e resistono ad una temperatura di filtrazione fino a 550°C .

La loro misura gravimetrica, effettuata prima e dopo le prove di combustione, consente di stabilire la concentrazione di particolato totale nella portata campionaria dei fumi.

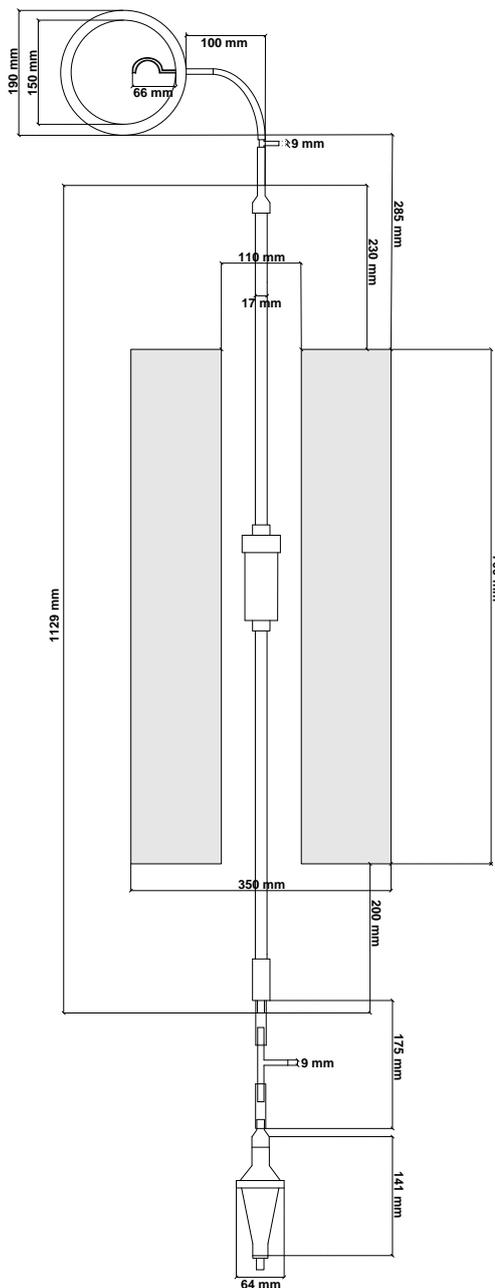


Figura 5: schema della sezione di prelievo e di derivazione dei fumi di combustione

Strumenti di analisi dei dati sperimentali

Il flusso di gas prelevato dal condotto fumario e uscente dalla colonna d'acciaio riscaldata è esaminato mediante l'analizzatore portatile *Eurotron GreenLine Mk2*, con il quale è possibile misurare le seguenti grandezze:

Parametri	Sensori	Campi ***	Risoluzione	Limiti errore **
O ₂	Elettrochimico	0 - 25 %	0.1%	±0.1 % vol
CO	Elettrochimico	0 - 4000 ppm	1 ppm	<300 ppm = ±5 ppm >300 ppm = ±4 %
CO	Elettrochimico	0 - 20000 ppm	1 ppm	<300 ppm = ±5 ppm >300 ppm = ±4 % >4000 ppm = ±6 %
CO	Elettrochimico	0 - 10 %	0.01%	<2000 ppm = ±100 ppm >2000 ppm = ± 5 %
NO	Elettrochimico	0 - 2000 ppm	1 ppm	<100 ppm = ±5 ppm >100 ppm = ±4 %
NO	Elettrochimico	0 - 4000 ppm	1 ppm	<100 ppm = ±5 ppm >100 ppm = ±4 % >2000 ppm = ±5 %
NO ₂	Elettrochimico	0 - 800 ppm	1 ppm	±5 ppm
NO _x	Calcolato *	0 - 2000 ppm	1 ppm	
SO ₂	Elettrochimico	0 - 2000 ppm	1 ppm	<100 ppm = ±5 ppm >100 ppm = ±4 %
C _x H _y	Pellistore	0 - 5 %	0.01 %	±5 % i.s.
CO ₂	Calcolato	0 - 99.9 %	0.1 %	
T _{air}	Pt100	0 - 99°C	1°C	±0.5 %
T _{gas}	Tc K Tc S	0 - 999°C 0 - 1600°C	1°C 1°C	±0.25 % ±0.25 %
Pressure/dP	Piezo-resistivo	±19.99 hPa	0.01 hPa	±4 %
Excess air	Calcolato	1.00 - infinity	0.01	
Gas velocity	Calcolato	0 - 99.9 m/s	0.1 m/s	
Efficiency	Calcolato	1 - 99.9 %	0.1 %	
Smoke	Metodo carta filtro	0 - 9 Bacharach		
Differential Temp.	Calcolato	0 - 999°C	0.1°C	

Tabella 3: parametri misurati dall'analizzatore portatile *Eurotron GreenLine Mk2*

Lo stesso strumento permette inoltre di ricondurre le concentrazioni di CO, NO, NO₂ e SO₂ ai valori corrispondenti ad una determinata concentrazione di O₂ nei fumi di combustione (in questo caso scelta in base alla normativa¹ pari al valore di 10%).

Dal condotto fumario principale i fumi vengono poi analizzati attraverso i seguenti ulteriori strumenti:

- analizzatore paramagnetico per O₂, *Maihak OXOR 6N* (0 – 25 %)
- analizzatore ad infrarossi per CO₂, *Maihak UNOR 6N* (0 – 20 %)
- manometro differenziale per la misura del tiraggio (0 – 1 mbar)
- termocoppia tipo K per la misura della temperatura (0 – 1250 °C)

¹ EN 303-5

Tali dispositivi sono collegati ad un sistema informatico di elaborazione dati, i cui componenti principali sono:

- moduli di acquisizione *National Instruments Ltd, SCXI 1102/1122* (16 canali per termocoppie + 16 canali per segnali 4 – 20 mA)
- sistema di acquisizione *National Instruments Ltd, SCXI 1303*
- scheda di acquisizione *PC – MIO – 16 E⁻¹ “Dev 1”*
- software di elaborazione dati *National Instruments Ltd, LabView 7.0*

Grazie all'utilizzo di tali sistemi informatici e attraverso la realizzazione di un modello di calcolo dedicato è possibile determinare in tempo reale, oltre alle grandezze prima elencate, anche i seguenti parametri di esercizio dell'impianto:

- portata d'acqua nel circuito idraulico della caldaia (l/s)
- temperatura di mandata e di ritorno dell'acqua in caldaia (°C)
- temperatura di campionamento dei fumi in aspirazione (°C)
- portata dei fumi nel condotto fumario (Nm³/h)
- velocità media dei fumi nel condotto fumario (m/s)
- portata di campionamento dei fumi (l/min alla T di campionamento)
- velocità di campionamento dei fumi (m/s)
- rendimento termico dell'impianto (%)
- potenza erogata (kW)
- potenza ceduta al circuito idraulico (kW)

Per la misura gravimetrica dei filtri in microfibra di vetro, necessaria per la determinazione del contenuto di particolato nei fumi, si utilizza una bilancia di precisione *OHAUS Explorer*, con risoluzione pari a 0,0001 grammi e fondo scala pari a 210 grammi.

SUPPORTI CERAMICI ESAMINATI

I prototipi dei supporti ceramici realizzati da FN s.p.a. sono costituiti da un insieme di elementi cilindrici cavi, ciascuno dei quali ha un'altezza pari a circa 34 mm, un diametro esterno all'incirca uguale a 6 – 8 mm, e uno spessore variabile tra 0,5 e 1 mm.

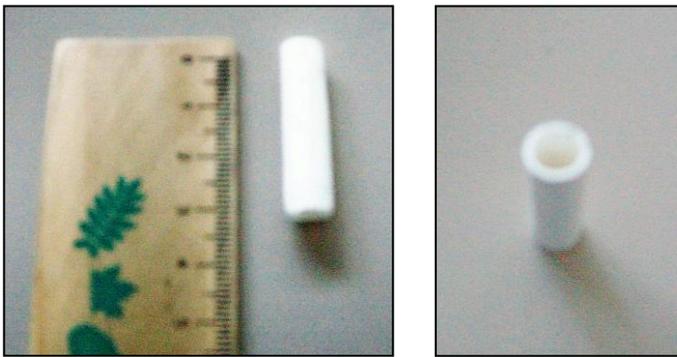


Figura 6: elementi ceramici utilizzati per la realizzazione dei supporti

Il materiale di cui sono formati tali elementi è Allumina (Al_2O_3) in polvere. Essi vengono realizzati mediante formatura (colatura su nastro) e sinterizzazione fino alla temperatura di 1500 °C.

Ne consegue una porosità compresa tra 34 % e 39 % (pori aperti), e una dimensione media dei pori di circa 0,46 μ m.

Il peso di ogni singolo elemento è mediamente compreso tra 1,20 e 1,25 grammi.

I cilindri ceramici sono disposti in posizione verticale ed affiancati uno all'altro all'interno di un cestello di acciaio, in maniera da acquisire una configurazione a "tamburo" rispetto al flusso di gas che li attraversa in senso longitudinale (vedi fig. 7 e 8).

La geometria dei supporti è stata scelta nella sua fase prototipale in base alle capacità realizzative di FN S.p.a. (forma cilindrica), alla disponibilità di un'adeguata cella di contenimento (cestello in acciaio), e al fine di riprodurre la struttura a nido d'ape dei filtri catalitici già disponibili in commercio per impianti termici di piccola taglia.

Il numero di elementi inseriti all'interno del cestello è pari a 10, a cui corrisponde, date le dimensioni del cestello e degli elementi stessi, un grado di vuoto medio della sezione di passaggio dei fumi pari a 77 %.

La superficie laterale totale dei supporti così formati è invece pari a circa 150 cm².

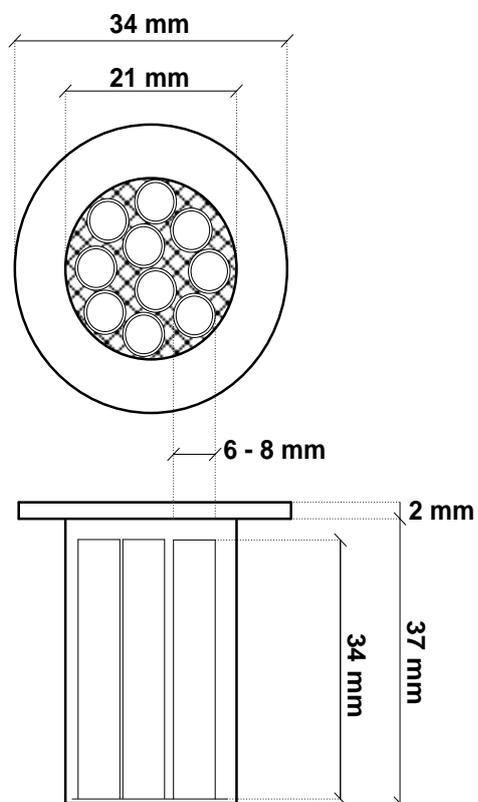


Figura 7: schema e dimensioni dei supporti ceramici



Figura 8: supporti ceramici esaminati

Il cestello d'acciaio contenente gli elementi cilindrici è inserito in un portacestello dello stesso materiale a sua volta connesso ai restanti elementi tubolari della colonna riscaldata, attraverso la quale fluisce la portata campionaria dei fumi di combustione (vedi fig. 9).

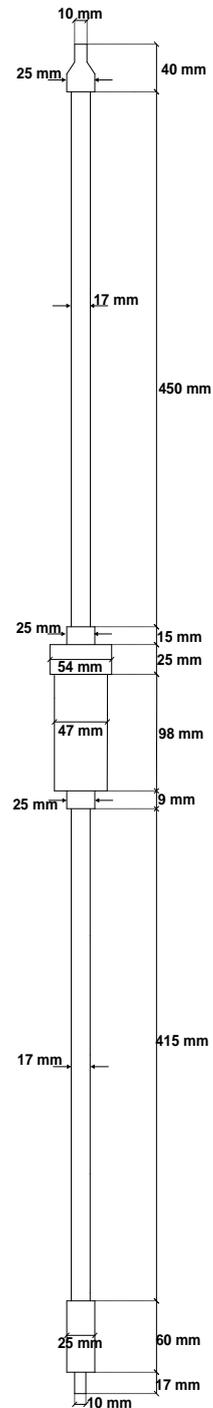


Figura 9: schema geometrico e dimensioni della colonna d'acciaio utilizzata per la portata campionaria dei fumi

PROVE SPERIMENTALI

Prove di esercizio della caldaia

La prima parte dell'attività sperimentale è stata incentrata sulla verifica dei parametri di funzionamento della caldaia.

Sono state analizzate due diverse condizioni di esercizio, rispettivamente corrispondenti a due differenti valori della portata di alimentazione del combustibile:

- portata massima di alimentazione, determinata in base alle indicazioni fornite dalla casa costruttrice riguardo la massima frequenza del motore di alimentazione (15 Hz, corrispondenti a 5,3 kg/h di combustibile tal quale)
- portata di combustibile per la quale la caldaia eroga una potenza termica pari al valore nominale indicato dalla casa costruttrice (20 KW). Il valore di portata corrispondente a tale condizione è risultato pari a 4,93 kg/h, equivalente ad una frequenza di alimentazione del motore di 14,1 Hz.

La regolazione dell'aria è stata mantenuta pressoché costante, e in condizioni tali che la concentrazione di O₂ nei fumi risultasse compresa tra 9% e 11% (valore di riferimento da normativa EN 303-5 pari a 10%).

Il sistema di aspirazione dei fumi dal condotto fumario è stato regolato in maniera tale che per tutte le prove si registrasse un valore del tiraggio pari a 20 Pa, quale valore minimo indicato dalla normativa per il tipo di impianto utilizzato e valore di riferimento consigliato dalla stessa casa costruttrice.

Il circuito idraulico della caldaia è stato mantenuto in condizioni di portata minima consentita dal sistema di alimentazione dell'acqua. Si è quindi registrato per tutte le prove un valore di portata idrica compreso tra 2,27 e 2,35 l/s.

La temperatura massima di ritorno dell'acqua è stata inoltre fissata a 70 °C. Tale condizione è stata realizzata grazie all'azione di un sistema automatico di by-pass, il quale regola in base alla temperatura il flusso di una portata parziale d'acqua attraverso un serbatoio a temperatura ambiente (volano termico). In tal modo è stato quindi possibile mantenere la caldaia a pieno regime, pur garantendo valori costanti delle temperature di entrata e di uscita dell'acqua (indicativamente comprese nell'intervallo 69 / 72 °C). L'analisi dei dati sperimentali è stata infatti condotta a seguito allo stabilizzarsi delle suddette temperature.

Per la verifica d'esercizio della caldaia, sono state effettuate sette prove sperimentali, ognuna della durata di circa 60 minuti (periodo di acquisizione dei dati).

Per quanto riguarda le emissioni inquinanti, in questo primo set di prove, le concentrazioni di CO, NO, NO₂, SO₂, idrocarburi incombusti e particolato sono state determinate direttamente lungo il condotto fumario, scollegando la linea di derivazione dei fumi e utilizzando lo stesso punto di prelievo per l'inserimento del filtro in microfibra di vetro e della sonda dell'analizzatore *Eurotron GreenLine Mk2* (vedi paragrafi precedenti).

Verifiche sperimentali sui sopporti ceramici

Un secondo set di prove è stato realizzato allo scopo di verificare il comportamento dei sopporti ceramici a contatto con i fumi di combustione della caldaia.

I test sono stati condotti in maniera da evidenziare i possibili effetti di ritenzione del particolato da parte degli stessi sopporti e gli eventuali fenomeni di intasamento.

Inoltre è stata investigata la loro capacità di abbattimento delle sostanze inquinanti (in particolar modo CO e particolato) già a temperature relativamente basse (150 – 200 °C).

A tal scopo sono state eseguite ulteriori quattro coppie di prove sperimentali, ognuna delle quali caratterizzata dalle stesse condizioni di esercizio della caldaia e dalla stessa temperatura di settaggio del forno tubolare.

Ogni coppia di prove è stata quindi condotta inserendo in un primo caso gli elementi ceramici nel cestello d'acciaio (come descritto nei paragrafi precedenti) e nel secondo caso mantenendo lo stesso cestello vuoto.

Dal confronto dei dati di emissione registrati nelle due diverse condizioni di esercizio si è quindi cercato di valutare l'efficacia dei dispositivi ceramici sull'abbattimento delle sostanze inquinanti.

Le prove eseguite in assenza degli elementi ceramici hanno avuto una durata di circa 60 minuti (a partire dalla condizione di stabilità delle temperature del circuito idraulico), mentre le prove effettuate con gli elementi ceramici all'interno del cestello sono proseguite per ulteriori 240 minuti. Tale maggiore durata è stata conseguita al fine di valutare la capacità di ritenzione del particolato da parte dei sopporti porosi e di stimarne il rischio di intasamento mediante l'osservazione delle perdite di carico.

Tutte le prove inerenti la verifica dei sopporti ceramici sono state effettuate nelle stesse seguenti condizioni di esercizio:

- portata di combustibile pari a 4,93 kg/h, corrispondente a 20 kW di potenza termica erogata
- concentrazione di O₂ nei fumi di combustione compresa tra 9% e 11%
- tiraggio dei fumi pari a 20 Pa

Le quattro coppie di test effettuate differiscono quindi per la sola temperatura di settaggio del forno tubolare, rispettivamente regolata su valori di 700 °C, 600 °C, 500°C e 400°C.

Mediante tale impostazione si è cercato di valutare gli effetti della condensazione dell'umidità e degli idrocarburi pesanti presenti nei fumi sulla capacità di ritenzione dei sopporti, oltre che sulle misure di particolato eseguite a valle.

In virtù delle condizioni costanti di esercizio e grazie al mantenimento della portata isocinetica di prelievo, la velocità spaziale del sistema esaminato si è mantenuta su valori pressoché costanti, la cui media su tutte le prove è pari a 66675 h⁻¹.

La velocità superficiale dei fumi (a tubo vuoto) in corrispondenza dei sopporti ceramici è risultata invece compresa tra 0,21 e 0,24 m/s.

RISULTATI

Parametri di esercizio della caldaia

In base alle prove effettuate sulla caldaia nelle due diverse condizioni di alimentazione e potenza (vedi paragrafi precedenti), sono stati rilevati i seguenti parametri di funzionamento:

		$P_{max} = 22 \text{ kW}$		$P_n = 20 \text{ kW}$	
portata combustibile tq	kg/h	5,29	5,29	4,93	4,93
input termico	kW	26,4	26,4	24,6	24,6
tiraggio	Pa	20	20	20	20
T fumi	°C	238	236	233	229
CO₂ nei fumi	% vol	9,91	11,31	10,22	10,94
O₂ nei fumi	% vol	10,79	9,40	10,17	9,77
eccesso d'aria	-	1,06	0,81	0,94	0,87
rendimento termico	%	81,7	83,5	82,4	83,5
rendimento utile	%	55,0	53,2	54,1	52,3
potenza termica erogata	kW	21,6	22,0	20,3	20,6
potenza termica ceduta	kW	14,5	14,0	13,3	12,9
portata fumi	Nm ³ /h	55	49	50	47
velocità fumi	m/s	1,67	1,46	1,50	1,39
portata acqua	l/s	2,30	2,32	2,30	2,34
T mandata	*C	70,8	71,6	70,7	71,0
T ritorno	*C	69,3	70,1	69,3	69,7

Tabella 4: parametri di esercizio della caldaia

Sono riportati i valori di esercizio della caldaia corrispondenti alle condizioni di minimo e massimo eccesso d'aria, per ciascun valore di portata di combustibile alimentato.

La caldaia presenta dati medi di funzionamento abbastanza stabili nelle varie condizioni di esercizio:

- temperatura dei fumi mediamente compresa tra 230°C e 250 °C.
- rendimento termico dell'apparecchio compreso tra 81% e 84% (con tendenza a diminuire all'aumentare dell'eccesso d'aria).
- rendimento utile, corrispondente alla potenza termica ceduta al circuito idraulico, compreso tra 52% e 55% (con tendenza ad aumentare per valori maggiori dell'eccesso d'aria).

Di seguito si riportano i grafici relativi alla misura e al calcolo in tempo reale di alcuni parametri di esercizio, con riferimento alle due diverse condizioni di potenza (20 kW e 22 kW) e allo stesso valore d'eccesso d'aria ($e = 0,89$):

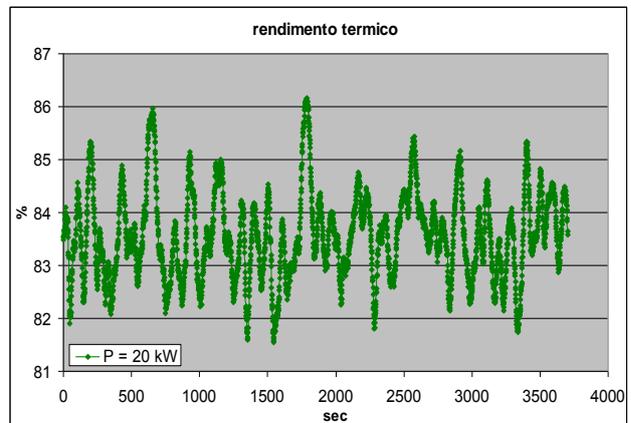
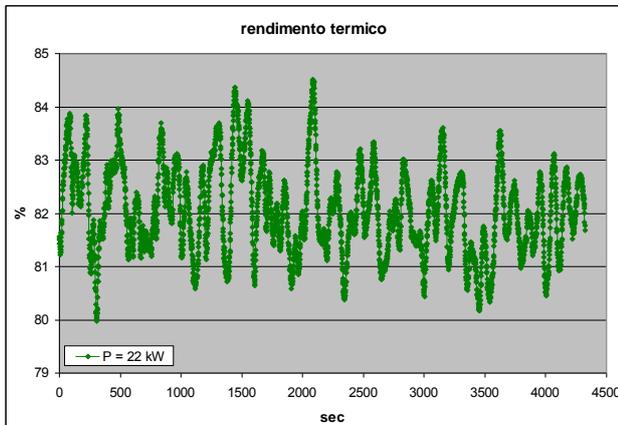


Figura 10: valori del rendimento termico della caldaia registrati durante le prove di combustione

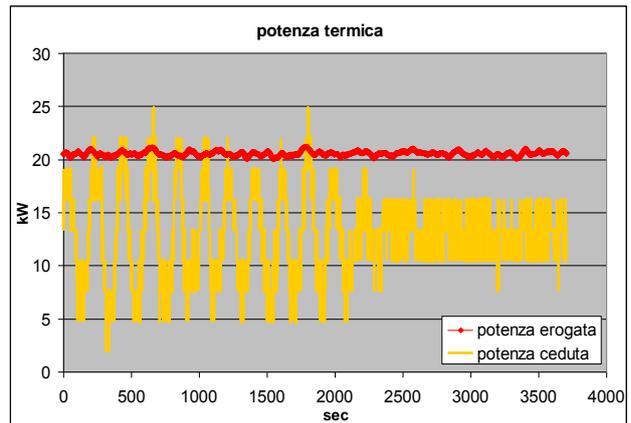
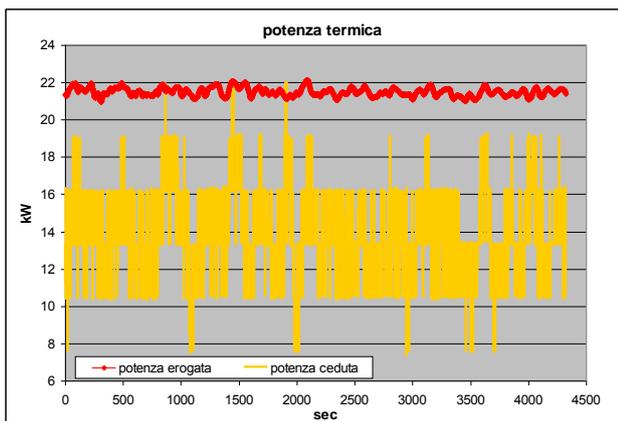


Figura 11: potenza termica erogata dalla caldaia e potenza ceduta al circuito idraulico durante le prove di combustione (portata di combustibile rispettivamente pari a 5,3 kg/h e 4,9 kg/h)

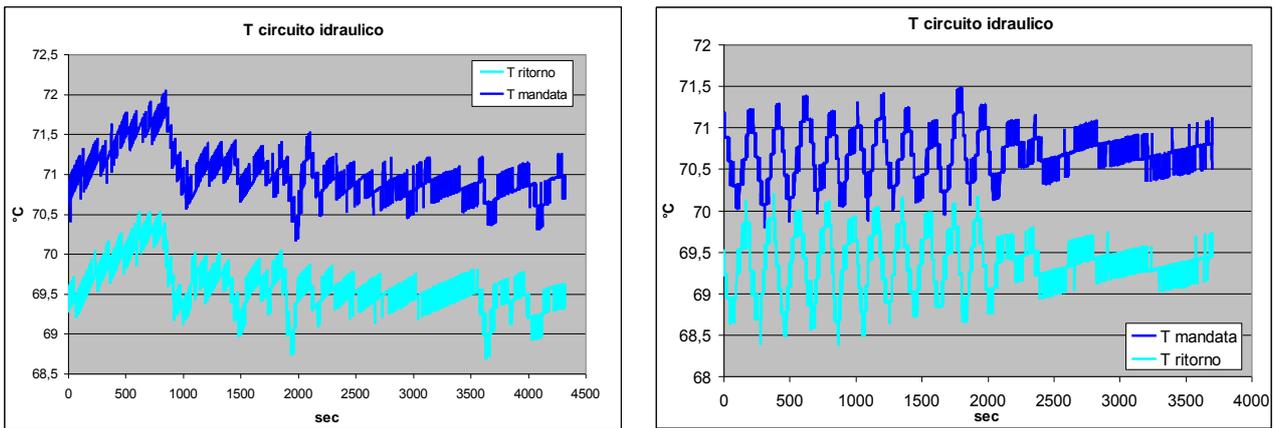


Figura 12: temperature di mandata e di ritorno dell'acqua durante le prove di combustione (potenza ceduta al circuito idraulico rispettivamente pari a 14 kW e 13 kW).

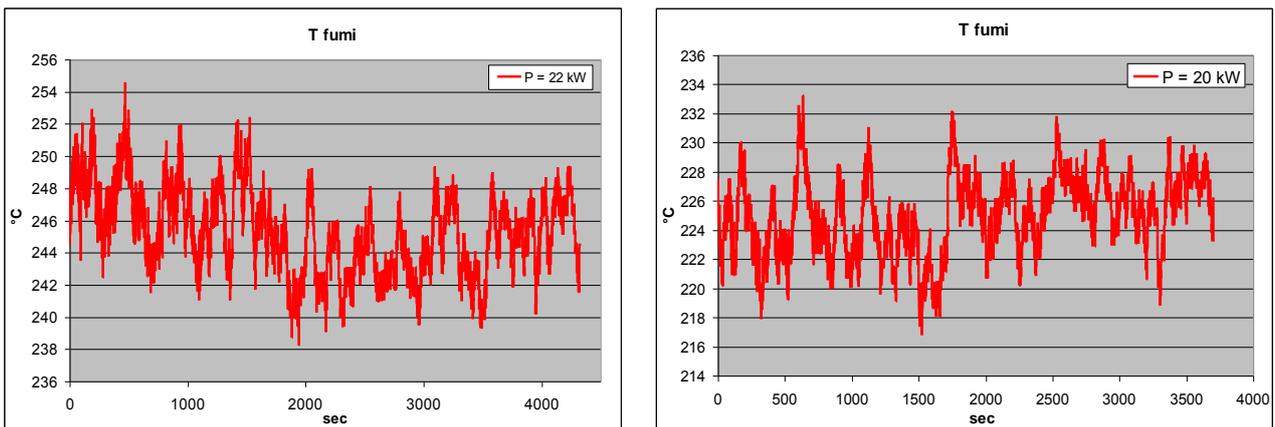


Figura 13: temperatura di uscita dei fumi durante le prove di combustione

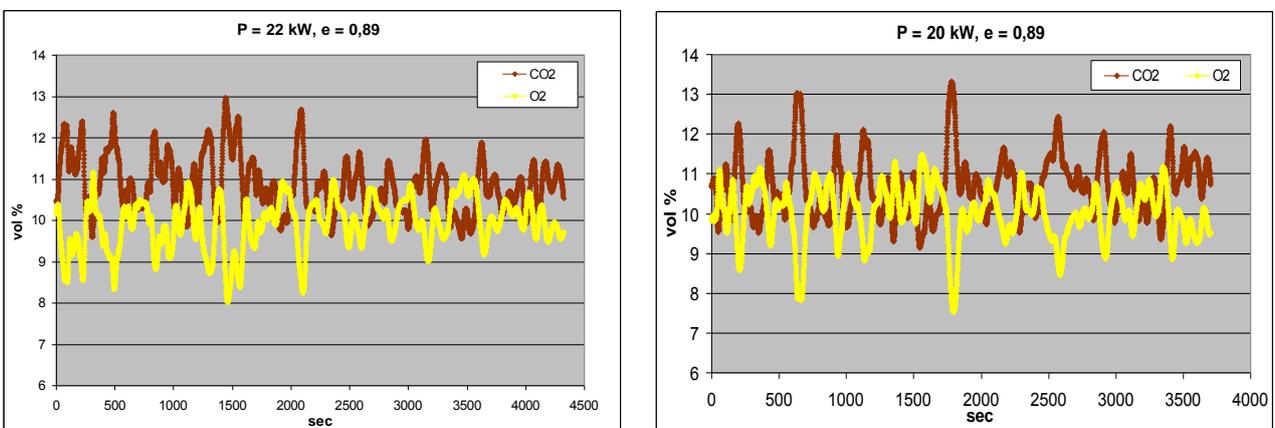


Figura 14: concentrazioni di CO₂ e O₂ nei fumi anidri di combustione

Dati di emissione della caldaia

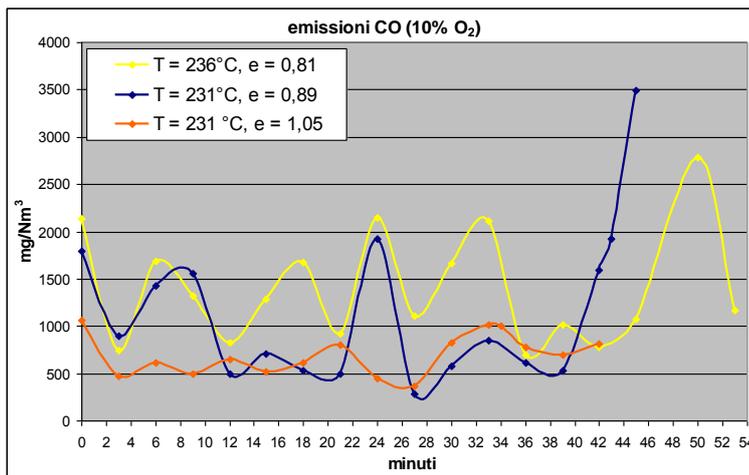
Per quanto riguarda le emissioni inquinanti, durante le prove la caldaia ha mostrato un comportamento notevolmente discontinuo e irregolare, facendo registrare delle forti oscillazioni dei valori di emissione, soprattutto in riferimento alle misure di CO.

Per quest'ultimo si sono rilevati picchi di emissione anche superiori a 4000 mg/Nm³, indipendentemente dalle condizioni di esercizio della caldaia.

Non si sono riscontrate notevoli differenze tra le due condizioni di funzionamento alle quali la caldaia è stata esercitata (diversa portata e potenza), mentre solo in alcuni casi è possibile dedurre una certa dipendenza tra i valori di emissione e l'eccesso d'aria (soprattutto per le emissioni di SO₂).

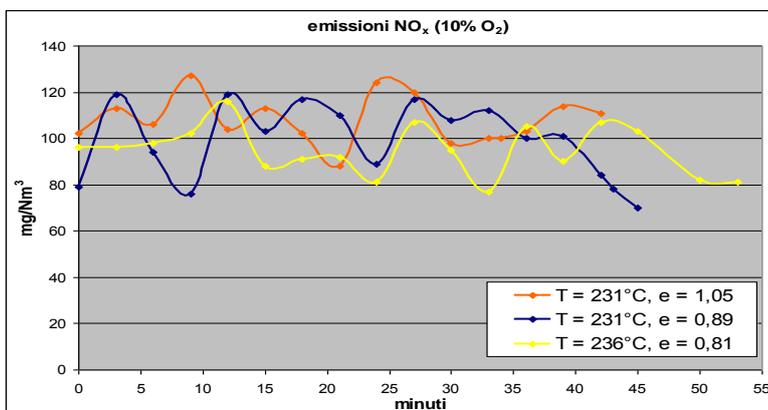
Durante tutte le prove effettuate, la misura degli idrocarburi incombusti è risultata inferiore al valore di risoluzione dello strumento utilizzato, per cui è stato possibile desumere solamente un livello di emissione inferiore a 100 ppmv.

Di seguito si riportano alcuni dei grafici e dei dati di emissione relativi a CO, NO_x, e SO₂, direttamente misurati al camino:



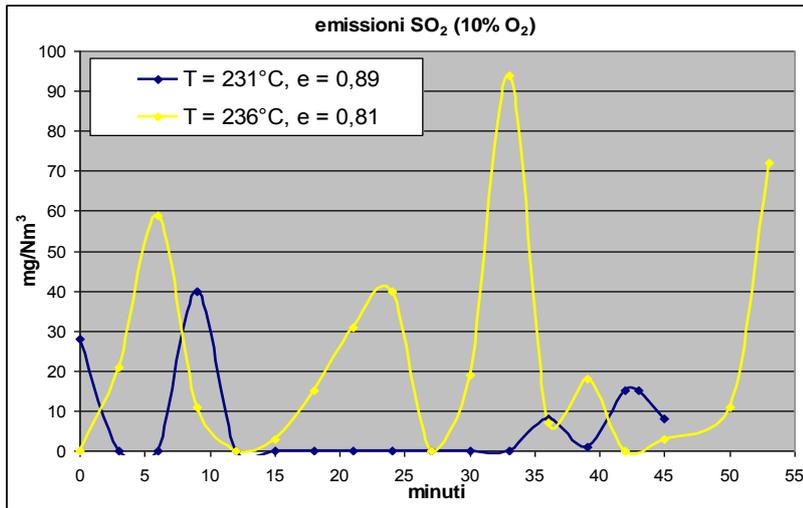
CO (valore medio al 10% O ₂)	
e	mg/Nm ³
0,81	1398
0,89	1159
1,05	698

Figura 15: misura della concentrazione di CO per differenti valori di eccesso d'aria



NO _x (valore medio al 10% O ₂)	
e	mg/Nm ³
0,81	95
0,89	99
1,05	108

Figura 16: misura della concentrazione di NO_x per differenti valori di eccesso d'aria



SO ₂ (valore medio al 10% O ₂)	
e	mg/Nm ³
0,81	22
0,89	7
1,05	0

Figura 17: misura della concentrazione di SO₂ per differenti valori di eccesso d'aria

Si riportano altresì i valori delle emissioni di particolato, anch'esse misurate direttamente al camino, per differenti valori di eccesso d'aria:

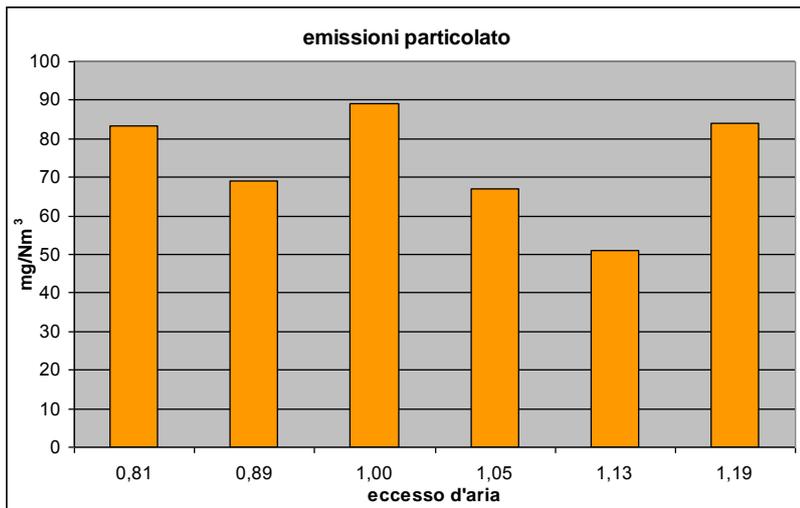


Figura 18: concentrazioni di particolato misurate al camino per differenti valori di eccesso d'aria (valore medio = 74 mg/Nm³)

Comportamento fluidodinamico dei supporti ceramici

Nelle condizioni di esercizio dapprima descritte, i supporti ceramici inseriti nella colonna d'acciaio hanno fatto registrare delle perdite di carico pressoché nulle e invariati durante i periodi di prova (300 minuti ciascuno).

Le misure indicate dal manometro a colonna sono infatti oscillate per l'intera durata dei test tra 2,5 mmH₂O e 3 mmH₂O, con una perdita di carico di base (a cestello vuoto) pari a circa 2 mmH₂O.

Anche la differenza di peso dei supporti, ricavata mediante le misure effettuate prima e dopo le prove di combustione, non ha evidenziato alcun incremento dovuto alla deposizione di

materiale organico sui cilindri, avendo registrato variazioni di peso non significative e riconducibili alle normali fluttuazioni dello strumento di misura.

Da un'analisi visiva dei supporti ceramici a seguito delle prove, si è constatato che essi rimangono praticamente intatti e puliti all'interno del cestello fino a valori di temperatura dei fumi in uscita dalla colonna pari a 70°C (corrispondente ad una temperatura fissata del forno tubolare pari a 400°C e ad una temperatura stimata all'interno della colonna pari a 149°C).

Per quest'ultimo caso è stato possibile notare un irregolare sporcamento della superficie laterale dei cilindri, prevalentemente esterna, che denota la probabile condensazione dell'umidità e degli idrocarburi pesanti sulla superficie degli stessi, e un flusso irregolare dei fumi, concentrato maggiormente tra gli spazi liberi della sezione del cestello tra un elemento cilindrico e l'altro.



Figura 19: supporti ceramici a seguito delle prove di combustione ($T \approx 150^{\circ}\text{C}$)



Figura 20: elementi cilindrici a seguito delle prove di combustione ($T \approx 150^{\circ}\text{C}$)

Valori di emissione a valle dei supporti ceramici

I valori di emissione delle sostanze inquinanti, misurati a valle della colonna d'acciaio, non hanno mostrato differenze sostanziali rispetto ai dati ottenuti dalla misura diretta al condotto fumario.

Il confronto dei dati di concentrazione di CO, ricavati per le varie coppie di test sia in assenza che in presenza dei supporti ceramici lungo la linea di campionamento, ha evidenziato una capacità di abbattimento nulla di tali dispositivi rispetto all'inquinante considerato, per lo meno alle temperature di esercizio raggiunte durante i test.

Di seguito sono riportati i grafici relativi alle misure di CO effettuate durante le quattro coppie di test, indicando con "prova 0" il test condotto in assenza dei cilindri ceramici all'interno del cestello, e con "prova 1" la prova condotta nelle stesse condizioni di esercizio, con all'interno del cestello gli elementi porosi.

Sono inoltre indicate le temperature di uscita dei fumi dalla colonna d'acciaio e i valori d'eccesso d'aria corrispondenti ad ogni prova condotta.

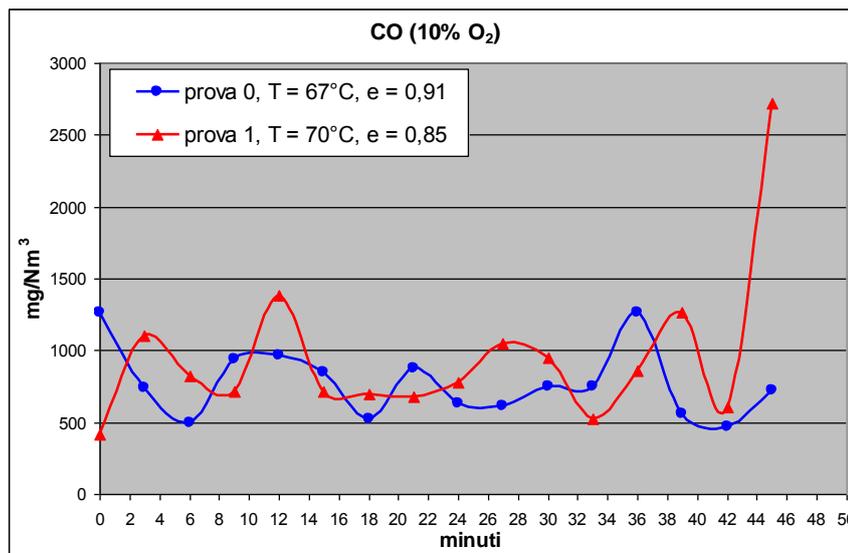


Figura 21: concentrazioni di CO a valle della linea di campionamento (T forno = 400 °C)

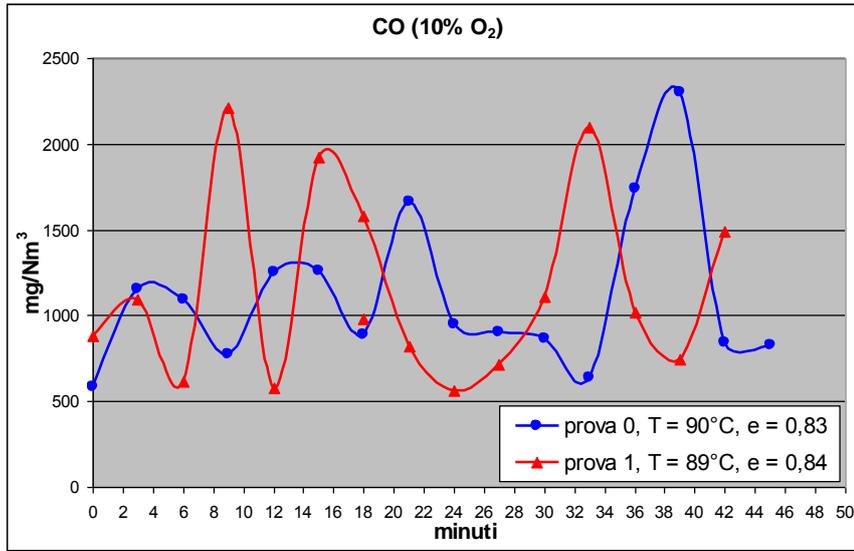


Figura 22: concentrazioni di CO a valle della linea di campionamento (T forno = 500 °C)

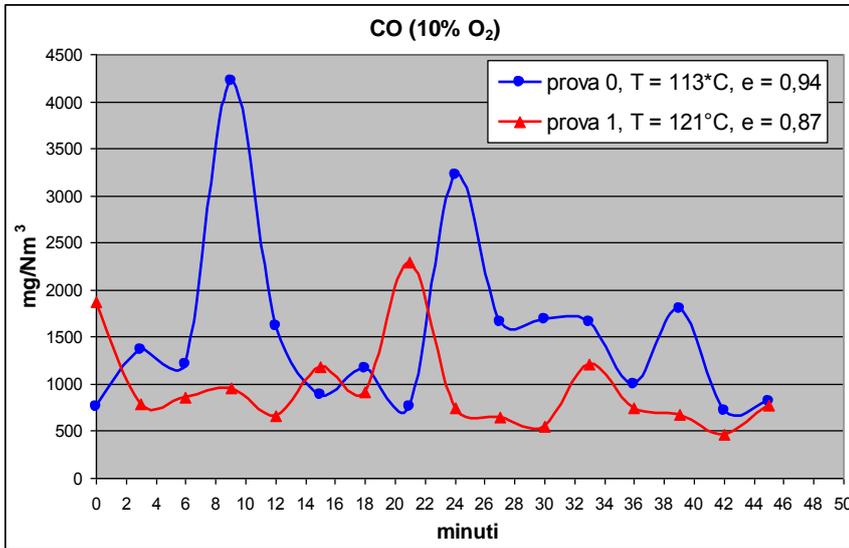


Figura 23: concentrazioni di CO a valle della linea di campionamento (T forno = 600 °C)

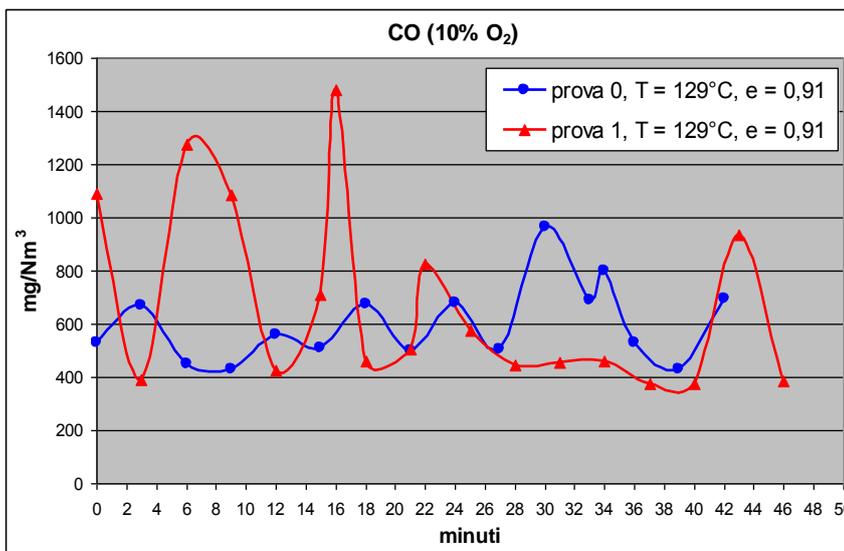


Figura 24: concentrazioni di CO a valle della linea di campionamento (T forno = 700°C)

Anche per quanto riguarda il particolato, non si riscontrano differenze significative tra le misure effettuate a valle dei supporti ceramici e i valori rilevati in assenza di essi.

E' possibile notare un aumento della concentrazione di particolato per i test condotti a temperature di uscita dei fumi più basse (indicativamente minori di 90°C). Tale andamento è presumibilmente dovuto alla condensazione dell'umidità e dei composti organici a più alto peso molecolare in corrispondenza dei filtri di vetro.

Tale tendenza risulta confermata anche per le prove condotte in presenza dei supporti ceramici all'interno della colonna d'acciaio. E' lecito quindi dedurre effetti non significativi di tali dispositivi anche per quanto riguarda le sostanze condensabili presenti nei fumi, per lo meno alle temperature di prova alle quali essi sono stati testati.

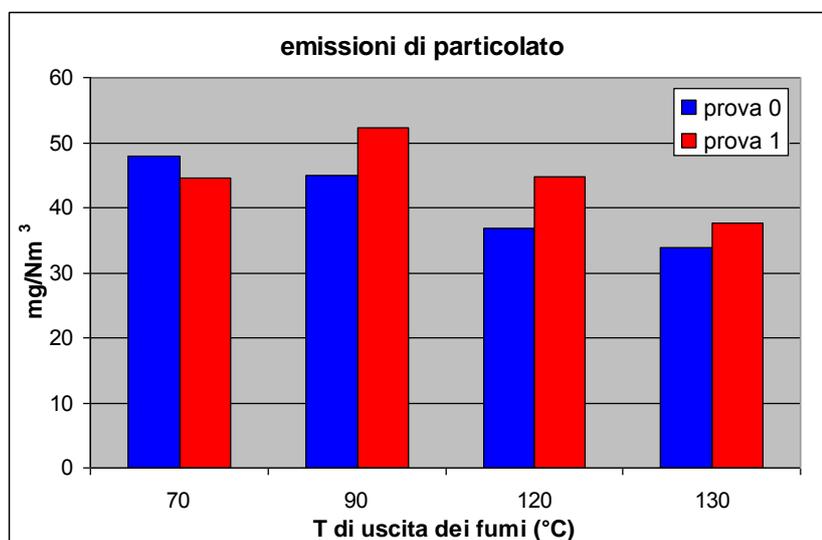


Figura 25: valori di emissione del particolato misurati a valle della linea di campionamento

CONCLUSIONI

All'interno della Hall Tecnologica ThEXAS del Centro Ricerche ENEA di Saluggia sono state effettuate delle prove di combustione in caldaia, utilizzando del pellet di legno e allestendo lungo la linea fumi una sezione sperimentale per la verifica di dispositivi ceramici porosi, realizzati da FN s.p.a.

Tali componenti sono concepiti per essere in seguito utilizzati come supporti attivati in sistemi di rimozione catalitica degli inquinanti, al fine di abbattere prevalentemente le emissioni di natura organica presenti nei fumi di combustione degli impianti a biomassa.

Oltre alla determinazione dei parametri di funzionamento del generatore di calore e alla verifica dei livelli di emissione nelle sue varie condizioni di esercizio, l'attività sperimentale è stata quindi incentrata sull'osservazione del regime fluidodinamico che si instaura in corrispondenza di tali supporti. E' stata inoltre investigata la loro capacità di rimozione degli inquinanti a temperature relativamente basse (150°C – 200°C) e senza l'aggiunta di catalizzatori sulla loro superficie.

La configurazione geometrica dei supporti è stata definita in base alla cella di contenimento disponibile in laboratorio, alle capacità realizzative di FN s.p.a. (forma cilindrica), e in similitudine con la struttura a nido d'ape dei filtri catalitici già disponibili in commercio, ad oggi applicati su impianti termici di piccola taglia.

Da questo punto di vista le prove sperimentali hanno dimostrato un'inconsistente rischio di intasamento dei supporti da parte del particolato solido, ma anche una distribuzione del flusso attraverso la sezione di passaggio dei fumi piuttosto irregolare, con l'instaurarsi di canali preferenziali per i quali buona parte della superficie degli elementi ceramici è interessata solo marginalmente dal contatto coi gas.

Oltre a dover ovviamente ridefinire i maggiori parametri di dimensionamento (velocità spaziale e velocità superficiale del gas) in base al particolare catalizzatore che si intenderà utilizzare nel prosieguo dell'attività, da questo primo set di prove è quindi ragionevole dedurre la necessità di cambiare o modificare la geometria dei supporti, in maniera da uniformare maggiormente il flusso e migliorare il contatto tra solido e gas.

Per quanto riguarda invece la capacità di abbattimento degli inquinanti organici e del particolato, le misure di concentrazione non hanno evidenziato differenze significative tra i valori ricavati in presenza dei dispositivi ceramici all'interno della linea di campionamento, e i dati ottenuti in assenza di essi.

Oltre che per l'assenza dei composti ad azione catalitica sulla superficie dei supporti, il mancato effetto sulla composizione dei fumi potrebbe essere attribuito anche ai seguenti ulteriori motivi (o una combinazione di essi):

- bassi valori di temperatura nella sezione di campionamento
- insufficiente qualità del contatto tra i fumi e gli elementi ceramici
- scarso tempo di residenza dei gas all'interno dei dispositivi porosi