



Ricerca di Sistema elettrico

## Analisi sperimentale della rigenerazione di filtri catalitici wall-flow per la riduzione del particolato fine prodotto dalla combustione di biomassa legnosa

M. Caldera, D. Lipari, A. De Sio, R. Roberto

ANALISI SPERIMENTALE DELLA RIGENERAZIONE DI FILTRI CATALITICI WALL-FLOW PER LA RIDUZIONE DEL PARTICOLATO FINE PRODOTTO DALLA COMBUSTIONE DI BIOMASSA LEGNOSA

M. Caldera, A. De Sio, R. Roberto (ENEA)  
D. Lipari (Politecnico di Torino)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica da biomasse e l'upgrading dei biocombustibili

Obiettivo: Sistemi di filtrazione ceramici per la rimozione del particolato fine (< 10 micron) nelle emissioni gassose

Responsabile del Progetto: Vito Pignatelli, ENEA

Gli autori ringraziano i tecnici Franco Viale, Daniele Pegoraro e Sergio Sabbione da per la preziosa collaborazione nell'allestimento del banco prova e nell'esecuzione delle prove sperimentali.

## Indice

SOMMARIO .....	8
1 INTRODUZIONE .....	10
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI .....	11
2.1 DEFINIZIONE DEL SISTEMA DI RIGENERAZIONE A MICROONDE .....	11
2.2 L'APPARATO SPERIMENTALE .....	12
2.2.1 <i>Generatore di calore</i> .....	12
2.2.2 <i>Analizzatori delle concentrazioni di CO e CO<sub>2</sub> infrarossi (NDIR)</i> .....	12
2.2.3 <i>Analizzatore di ossigeno paramagnetico</i> .....	12
2.2.4 <i>Strumento di misura della concentrazione di particolato</i> .....	13
2.2.5 <i>Analizzatore dei composti organici totali</i> .....	13
2.2.6 <i>Trasduttore di pressione</i> .....	13
2.2.7 <i>Riscaldatore elettrico</i> .....	13
2.2.8 <i>Termocamera a infrarossi</i> .....	14
2.3 IL BANCO PROVA FILTRI.....	14
2.4 DESCRIZIONE DELLE PROVE SVOLTE .....	19
2.4.1 <i>Prove con filtro a porosità standard e lunghezza 125 mm</i> .....	20
2.4.2 <i>Primo set di prove con filtro porosità maggiorata e lunghezza 125 mm</i> .....	31
2.4.3 <i>Prove filtro porosità maggiorata e lunghezza 60 mm</i> .....	41
2.4.4 <i>Secondo set di prove filtro porosità maggiorata e lunghezza 125 mm</i> .....	51
3 CONCLUSIONI .....	64

## Indice delle Figure

Figura 1. Vista della linea di prova sperimentale presso la Hall Tecnologica THEXAS a Saluggia .....	15
Figura 2. Particolare della linea di campionamento fumi, con il riscaldatore elettrico a fascia ceramica e la coibentazione in lana minerale per alte temperature a monte e a valle del riscaldatore .....	15
Figura 3. Immagine con termocamera IR del riscaldatore elettrico attivo .....	16
Figura 4. Sistema di disaccoppiamento idraulico della caldaia di prova dal circuito idraulico della Hall Tecnologica.....	17
Figura 5. Filtro utilizzato nelle prove sperimentali .....	18
Figura 6. Andamento tipico della caduta di pressione nel filtro .....	19
Figura 7. Andamento della caduta di pressione nel filtro nella prova A1.....	21
Figura 8. Andamento delle emissioni di PM e CO durante la prova A1 .....	23
Figura 9. Andamento della potenza utile e della temperatura dell'acqua in entrata ed uscita dalla caldaia durante la prova A1.....	23
Figura 10. Andamento della caduta di pressione ai capi del filtro in funzione del tempo di prova nella prova A2 .....	25
Figura 11. Andamento delle emissioni di PM e CO durante la prova A2 .....	27
Figura 12. Andamento della caduta di pressione ai capi del filtro a porosità standard .....	28
Figura 13. Efficienza di rigenerazione in funzione del numero di rigenerazioni .....	28
Figura 14. Strategia di rigenerazione adottata durante la prova .....	31
Figura 15. Andamento della caduta di pressione nel filtro nella prova B1.....	32
Figura 16. Andamento delle emissioni di PM e CO durante la prova B1 .....	33
Figura 17. Andamento della potenza e del rendimento durante la prova B1 .....	34
Figura 18. Andamento della caduta di pressione nel filtro della prova B2.....	35
Figura 19. Andamento delle emissioni di PM e CO durante la prova B2 .....	36
Figura 20. Andamento della potenza e del rendimento durante la prova B2 .....	36
Figura 21. Andamento della caduta di pressione ai capi del filtro di tipo B .....	37
Figura 22. Confronto tra la durata di ogni ciclo e il tempo percentuale di utilizzo del riscaldatore per la rigenerazione per il filtro tipo B .....	37
Figura 23. Confronto dell'efficienza di rigenerazione tra i filtri tipo A e B a porosità diverse .....	38
Figura 24. Confronto della caduta di pressione a fine rigenerazione tra i filtri tipo A e B .....	39
Figura 25. Andamento della caduta di pressione nel filtro nella prova C1.....	42
Figura 26. Particolare della prima rigenerazione nella prova C1 .....	43
Figura 27. Andamento della caduta di pressione nel filtro nella prova C2.....	46
Figura 28. Andamento della caduta di pressione nel filtro e nella prova C3 .....	49
Figura 29. Andamento della caduta di pressione nel filtro nella prova D1.....	52
Figura 30. Andamento delle emissioni di PM e CO durante la prova D1 .....	54
Figura 31. Andamento delle emissioni di CO <sub>2</sub> durante la prova D1.....	55
Figura 32. Andamento della caduta di pressione nel filtro della prova D2.....	56

<i>Figura 33. Andamento delle emissioni di PM durante la prova D2 .....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 34. Andamento della potenza e del rendimento durante la prova D2 .....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 35. Andamento della caduta di pressione del filtro D nei due giorni di prova.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 36. Efficienza di rigenerazione in funzione del numero di cicli del filtro D .....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 37. Confronto tra la durata di ogni ciclo e il tempo percentuale di utilizzo del riscaldatore per la rigenerazione nel filtro D .....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 38. Confronto fra l'andamento della caduta di pressione dei filtri B e D.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 39. Confronto fra la caduta di pressione raggiunta dopo ogni rigenerazione dei filtri B e D .....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 40: Confronto fra la durata dei cicli dei filtri B e D .....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 41: Confronto fra la durata della rigenerazione nei filtri B e D .....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 42. Confronto dell'efficienza di rigenerazione fra il filtro a porosità standard A e il filtro a porosità maggiorata D.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 43. Confronto fra la caduta di pressione alla fine di ogni rigenerazione fra il filtro A il filtro D .....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 44. Stato del filtro a ditale dopo due giorni di prove con il filtro D .....</i>	<i>63</i>

## Indice delle Tabelle

<i>Tabella 1. Tabella di denominazione dei filtri testati.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabella 2. Tabella riassuntiva della prova A1.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabella 3. Recupero della pressione iniziale e tempo di utilizzo del riscaldatore elettrico per i due cicli della prova A1.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabella 4. Caratteristiche della prima fase di deposizione del particolato nel filtro nella prova A1 .....</i>	<i>22</i>
<i>Tabella 5. Valori per cui si ha il passaggio da un meccanismo misto di depth filtration e cake filtration a un meccanismo prevalente di cake filtration nella prova A1.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabella 6. Temperatura dei fumi in uscita dal filtro all'inizio e alla fine della rigenerazione nella prova A1 .....</i>	<i>22</i>
<i>Tabella 7. Tabella riassuntiva della prova A2.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabella 8. Valori per cui si ha il passaggio da un meccanismo misto di depth filtration e cake filtration a un meccanismo prevalente di cake filtration nella prova A2.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabella 9. Temperatura dei fumi in uscita dal filtro all'inizio e alla fine della rigenerazione nella prova A2 .....</i>	<i>27</i>
<i>Tabella 10. Valori per cui si ha il passaggio da un meccanismo misto di depth filtration e cake filtration a un meccanismo prevalente di cake filtration nel filtro a porosità standard lungo 125 mm ...</i>	<i>29</i>
<i>Tabella 11. Temperatura dei fumi in uscita dal filtro durante l'inizio e la fine del processo di rigenerazione nel filtro a porosità standard lungo 125 mm .....</i>	<i>29</i>
<i>Tabella 12. Analisi dei cicli del filtro tipo A. In verde sono evidenziate le fasi in cui si ha una diminuzione della caduta di pressione, in azzurro le fasi in cui la caduta di pressione aumenta.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabella 13. Tabella riassuntiva della prova B1.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabella 14. Caratteristiche della prima fase di deposizione del particolato nel filtro nella prova B1 .....</i>	<i>33</i>
<i>Tabella 15. Valori per cui si ha il passaggio da un meccanismo misto di depth filtration e cake filtration a un meccanismo prevalente di cake filtration nella prova B1.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabella 16. Temperatura dei fumi in uscita dal filtro all'inizio e alla fine della rigenerazione nella prova B1.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabella 17. Tabella riassuntiva della prova B2.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabella 18. Valori per cui si ha il passaggio da un meccanismo misto di depth filtration e cake filtration a un meccanismo prevalente di cake filtration nella prova B2.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabella 19. Temperatura dei fumi in uscita dal filtro all'inizio e alla fine della rigenerazione nella prova B2 .....</i>	<i>35</i>
<i>Tabella 20. Analisi dei cicli del filtro tipo B. In verde sono evidenziate le fasi in cui si ha una diminuzione della caduta di pressione, in azzurro le fasi in cui la caduta di pressione aumenta.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabella 21. Tabella riassuntiva della prova C1 .....</i>	<i>41</i>
<i>Tabella 22: Analisi dei cicli della prova C1 .....</i>	<i>44</i>
<i>Tabella 23. Temperatura dei fumi in uscita dal filtro all'inizio e alla fine della rigenerazione nella prova C1 .....</i>	<i>43</i>
<i>Tabella 24. Valori per cui si ha il passaggio da un meccanismo misto di depth filtration e cake filtration a un meccanismo prevalente di cake filtration nella prova C1.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabella 25. Tabella riassuntiva della prova C2 .....</i>	<i>45</i>

<i>Tabella 26. Analisi dei cicli della prova C2 .....</i>	<i>47</i>
<i>Tabella 27. Valori per cui si ha il passaggio da un meccanismo misto di depth filtration e cake filtration a un meccanismo prevalente di cake filtration nella prova C2 .....</i>	<i>48</i>
<i>Tabella 28. Temperatura dei fumi in uscita dal filtro all'inizio e alla fine della rigenerazione nella prova C2 .....</i>	<i>48</i>
<i>Tabella 29. Tabella riassuntiva della prova C3 .....</i>	<i>48</i>
<i>Tabella 30. Analisi dei cicli del filtro della prova C3 .....</i>	<i>50</i>
<i>Tabella 31. Temperatura dei fumi in uscita dal filtro all'inizio e alla fine della rigenerazione nella prova C3 .....</i>	<i>51</i>
<i>Tabella 32: Valori per cui si ha il passaggio da un meccanismo misto di depth filtration e cake filtration a un meccanismo prevalente di cake filtration nella prova C3 .....</i>	<i>51</i>
<i>Tabella 33. Tabella riassuntiva della prova D1 .....</i>	<i>51</i>
<i>Tabella 34. Caratteristiche della prima fase di deposizione del particolato nel filtro nella prova D1 .....</i>	<i>53</i>
<i>Tabella 35. Temperatura dei fumi in uscita dal filtro all'inizio e alla fine della rigenerazione nella prova D1 .....</i>	<i>54</i>
<i>Tabella 36. Valori per cui si ha il passaggio da un meccanismo misto di depth filtration e cake filtration a un meccanismo prevalente di cake filtration nella prova D1 .....</i>	<i>54</i>
<i>Tabella 37. Tabella riassuntiva della prova D2 .....</i>	<i>55</i>
<i>Tabella 38. Analisi dei cicli del filtro di tipo D. In verde sono evidenziate le fasi in cui si ha una diminuzione della caduta di pressione, in azzurro le fasi in cui la caduta di pressione aumenta .....</i>	<i>58</i>
<i>Tabella 39. Quantità di particolato catturato da ogni filtro dopo una campagna di prove .....</i>	<i>63</i>

## Sommario

Il presente elaborato descrive le attività svolte e i risultati ottenuti nell'ambito del Piano di Realizzazione Annuale 2014 dell'Accordo di Programma ENEA-MiSE per la Ricerca sul Sistema Elettrico, con riferimento alla tematica "Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente", e al progetto B.1.1 "Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica da biomasse e l'upgrading dei biocombustibili".

L'attività di ricerca concerne l'analisi sperimentale di filtri catalitici con matrice in carburo di silicio (SiC) e catalizzatore in ferrite di rame ( $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ ) per l'abbattimento del particolato carbonioso emesso dai generatori di calore a biomassa solida. I filtri sono forniti dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Salerno (Di.I.In.), che collabora con ENEA nell'ambito della presente attività di ricerca.

L'obiettivo principale della campagna di prove è stato quello di verificare sperimentalmente e analizzare il comportamento dei filtri durante le fasi di rigenerazione, che rappresenta un aspetto critico per garantire adeguate prestazioni e durata per questo tipo di prodotto.

Date le caratteristiche dei materiali che costituiscono i filtri (matrice e catalizzatore), ottimi assorbitori di microonde, particolare interesse riveste lo studio della rigenerazione tramite appunto un sistema a microonde. Nel contesto della presente annualità sono stati definiti i requisiti progettuali definitivi, che hanno costituito la base per la procedura di ordine del sistema customizzato di rigenerazione a microonde. È stato inoltre individuato il rivestimento superficiale da applicare a filtri catalitici che saranno testati con il sistema di rigenerazione a microonde, quale barriera tra le pareti esterne dei filtri (che sono porose e quindi permetterebbero ai fumi di uscire dal filtro) e l'ambiente. Purtroppo non è stato possibile provare il sistema di rigenerazione a microonde nel contesto della presente annualità. Questo inconveniente è stato superato effettuando una campagna di test sperimentali sui filtri catalitici, nei quali la rigenerazione è ottenuta tramite un riscaldamento con resistenza elettrica localizzato intorno al filtro catalitico, e il banco prova esistente presso la Hall Tecnologica THEXAS del CR ENEA di Saluggia è stato modificato per ottenere migliori condizioni sperimentali, in termini di ripetibilità e stabilità delle variabili operative. Dal punto di vista dell'analisi dei fumi emessi dalla caldaia, la misura del particolato fine tramite lo strumento Pegasor ha consentito di analizzare real-time la concentrazione del particolato a monte del filtro.

Durante la campagna sperimentale sono stati analizzati filtri con una carica di catalizzatore pari al 20% in peso (tale valore è stato individuato nel corso delle precedenti annualità quale giusto compromesso tra l'efficienza di rimozione del particolato e le proprietà meccaniche dei filtri), e con differenti caratteristiche in termini di lunghezza e porosità. Nello specifico sono stati provati filtri di lunghezza pari a 125 mm (analogamente alle precedenti annualità) e 60 mm, e con porosità standard (diametro medio dei pori pari a 11  $\mu\text{m}$ ) e maggiorata (diametro medio pari a 17  $\mu\text{m}$ , in entrambi i casi con una carica del catalizzatore pari al 20%).

I filtri analizzati sono stati sottoposti a test della durata di due giorni (con orario indicativamente dalle ore 10 alle ore 16), ad eccezione del filtro a lunghezza ridotta, che è stato provato per tre giorni.

La rigenerazione su tali filtri è stata effettuata attraverso un riscaldatore elettrico a fascia ceramica resistente alle alte temperature (fino a 750°C). La strategia di rigenerazione, definita con i primi test, prevede che la temperatura di controllo del riscaldatore sia portata da 180°C a 300°C per 5 minuti, poi a 400°C per altri 5 minuti, quindi incrementata fino a 500°C a step di 50°C ogni 5 minuti, a cui segue un periodo di mantenimento della durata di 10 minuti. Nel corso di diverse prove si è riscontrato che mantenere temperature di rigenerazione superiori a 550°C per periodi prolungati non porta a significativi benefici in termini di riduzione delle perdite di carico.

Gli esperimenti effettuati hanno fatto emergere come la rigenerazione tenda a peggiorare in modo sensibile con il tempo (soprattutto dopo il terzo ciclo), e come la durata di un ciclo di occlusione/rigenerazione del filtro vada nel contempo diminuendo, da massimo 3 ore a meno di 1 ora.

Si è altresì notato come i filtri tendano ad aumentare più rapidamente le perdite di carico per valori di caduta di pressione variabili tra i 600 e i 700 Pa (transizione dalla depth filtration alla cake filtration).

Nelle prove svolte è emersa una relazione tra l'inizio della rigenerazione e la temperatura dei fumi in uscita dal filtro, a valori compresi tra i 220-280°C. È da sottolineare come questa temperatura abbia raggiunto i 300 °C nei filtri di lunghezza minore, probabilmente a causa di un più accentuato fenomeno di quenching dei fumi su tale tipologia di filtro.

Le prove sui filtri a lunghezza ridotta hanno fatto altresì emergere un legame tra la rigenerazione e la portata dei fumi: infatti con una portata di fumi pari a 7,6 NI/min (pari a quella imposta anche per i filtri a lunghezza doppia) la rigenerazione è meno efficace e avviene con maggiore difficoltà nei filtri a lunghezza ridotta.

Il confronto tra le prove sperimentali dei due filtri aventi le stesse caratteristiche (porosità maggiorata, lunghezza pari a 125 mm) mostra prestazioni simili e una soddisfacente ripetibilità dei risultati, nonostante con il secondo filtro la prova nella prima giornata sia durata più a lungo (compensata da una minore durata della prova nella seconda giornata). Negli ultimi test svolti su questo tipo di filtro, è stato possibile misurare l'assorbimento elettrico del rigeneratore, pari a 0,3 kWh per ogni ciclo, tramite un dispositivo conta-energia.

Dal confronto tra i filtri a porosità standard e quelli a porosità maggiorata è emerso che i secondi tendano a raggiungere valori di caduta di pressione post rigenerazione inferiori rispetto ai primi. La maggior parte dei filtri provati è in grado di sostenere fino a 5 cicli, oltre i quali l'esigenza di rigenerazione diventa troppo frequente e la sua efficacia sia insufficiente. Indipendentemente dalla porosità dei filtri, si ha una diminuzione dell'efficienza di rigenerazione del filtro da valori molto alti (il 90% nel caso del filtro a porosità standard, il 70% per il filtro a porosità maggiorata) a valori inferiori del 50% .

In definitiva, le prove hanno confermato l'elevata efficienza di abbattimento del particolato dei filtri catalitici wall-flow, già riscontrata nelle precedenti annualità. D'altro canto le frequenti rigenerazioni (mediamente ogni 1-2 ore), e la limitata vita operativa dei filtri (non più di due giorni) richiedono un'ulteriore fase progettuale per l'affinamento delle proprietà dei filtri, con particolare attenzione alle elevate emissioni di particolato nei fumi prodotti dalla combustione di biomassa. Dal punto di vista sperimentale, la campagna di prove condotta nella presente annualità ha fornito utili indicazioni per una più approfondita conoscenza del comportamento dei filtri catalitici wall-flow per l'abbattimento del particolato fine da biomassa. Tali indicazioni vanno supportate e verificate da ulteriori test, finalizzati in particolare all'aumento della vita operativa dei filtri stessi e al contenimento dei consumi elettrici richiesti dalla fase di rigenerazione.

## 1 Introduzione

Il Piano di Realizzazione Annuale 2014 dell'Accordo di Programma ENEA-MiSE per la Ricerca sul Sistema Elettrico, con riferimento all'area tematica "Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente", nell'ambito del progetto B.1.1 "Sviluppo di sistemi per la produzione di energia elettrica da biomasse e l'upgrading dei biocombustibili" prevede l'obiettivo C.3 "Sistemi di filtrazione ceramici per la rimozione del particolato fine (< 10 micron) nelle emissioni gassose".

L'attività di ricerca consiste nell'analisi sperimentale di filtri catalitici con matrice in carburo di silicio (SiC) e catalizzatore in ferrite di rame ( $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ ) per l'abbattimento del particolato carbonioso emesso dai generatori di calore a biomassa solida. I filtri sono forniti dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Salerno (Di.I.In.), che collabora con ENEA nell'ambito della presente attività di ricerca.

Il principale obiettivo della presente annualità è la verifica sperimentale della rigenerazione dei filtri, necessaria per garantire una soddisfacente vita operativa e adeguate prestazioni dei filtri stessi. Tra i possibili sistemi di rigenerazione, vi sono il riscaldamento a resistenza elettrica e il riscaldamento a microonde. Relativamente a quest'ultimo, sono stati definiti i requisiti progettuali definitivi, che hanno costituito la base per la procedura di ordine del sistema.

Purtroppo, non è stato possibile provare il sistema di rigenerazione a microonde nel corso della presente annualità. Questo inconveniente è stato superato effettuando una campagna di test sperimentali sui filtri catalitici, nei quali la rigenerazione è ottenuta tramite un riscaldamento con resistenza elettrica. Rispetto alle prove delle precedenti annualità, il forno elettrico è sostituito da una resistenza elettrica a fascia in materiale ceramico di dimensioni molto inferiori, in modo da simulare in modo realistico la dinamica di rigenerazione che prevedibilmente si avrà con un sistema a microonde.

La campagna sperimentale ha permesso di analizzare nel dettaglio le prestazioni e la durata di diverse tipologie di filtri, in termini di dimensioni e porosità della matrice. Ha inoltre consentito di stimare la durata di ciascun ciclo operativo tra due rigenerazioni e di determinare la corrispondente efficienza di rigenerazione.

Le prove sono state effettuate utilizzando una tecnica di misura in continuo del particolato fine, che offre il vantaggio di seguire in tempo reale la dinamica di emissione del particolato emesso dalla caldaia e in ingresso nel filtro catalitico, a differenza di un sistema discreto con impattore inerziale.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Definizione del sistema di rigenerazione a microonde

I materiali che costituiscono la matrice e il catalizzatore dei filtri in oggetto assorbono le microonde a 2,45 GHz (tipiche dei comuni forni a microonde domestici), per questo motivo è di particolare interesse verificare sperimentalmente le prestazioni di un sistema di rigenerazione a microonde.

I principali vantaggi della rigenerazione a microonde sono:

- rapidità;
- selettività, in funzione delle proprietà dielettriche dei materiali.
- attivabile e disattivabile istantaneamente;
- consente risparmi energetici, poiché viene riscaldato direttamente il filtro.

Nella prima parte dell'annualità sono state definite le caratteristiche progettuali del sistema di rigenerazione a microonde, le quali sono state alla base per la procedura dell'ordine di fornitura.

Il sistema di rigenerazione a microonde in scala da laboratorio è finalizzato a valutare l'efficienza e l'efficacia della rigenerazione di filtri catalitici di tipo wall flow utilizzati per l'abbattimento delle emissioni di particolato prodotto da una caldaia a biomassa. Tale sistema sarà installato nella linea di campionamento fumi derivata sulla canna fumaria, ed è idoneo a testare filtri con diametro nominale di 30 mm e lunghezza massima pari a 125 mm.

L'alloggiamento dei filtri nel rigeneratore deve essere ermetico e a tenuta d'aria, oltre a permettere una facile sostituzione dei filtri al termine delle prove. I filtri sono posti all'interno di una cavità in cui confluiscono, tramite opportune guide d'onda, le microonde prodotte da un magnetron. La cavità deve essere realizzata in modo da riflettere le microonde verso il filtro di prova, e deve essere in grado di resistere alle alte temperature tipiche della fase di rigenerazione. La cavità è equipaggiata con una finestra di osservazione, in modo da permettere il monitoraggio della temperatura del porta filtro tramite una termocamera radiometrica IR, confinando nel contempo le microonde all'interno della cavità ed evitando dispersioni verso l'esterno per motivi di sicurezza.

Il magnetron è il generatore delle microonde, prodotte a una frequenza nominale pari a 2,45 GHz. Sulla base delle indicazioni avute dal fornitore in fase di ordine, il magnetron da installare nella linea di campionamento fumi in scala di laboratorio ha una potenza nominale di circa 2 kW ed è raffreddato ad acqua. Le microonde raggiungono la cavità tramite un'opportuna guida d'onda corredata da un sistema di raffreddamento ad acqua che ha la funzione di assorbire le microonde riflesse indietro verso il magnetron, onde ridurre le sollecitazioni sul magnetron stesso allungandone la vita operativa e migliorandone le prestazioni. La generazione di microonde da parte del magnetron sarà controllata da un sistema di alimentazione installato in un apposito rack e gestito tramite applicativo sviluppato in ambiente Labview®.

L'intero sistema deve essere robusto ed affidabile e deve essere realizzato in modo da garantire la sicurezza degli operatori, in termini di fughe trascurabili di microonde verso l'esterno.

I filtri da testare sono caratterizzati da una matrice in carburo di silicio con una porosità dell'ordine della decina di micrometri, per permettere ai fumi di attraversare le pareti interne favorendo l'intrappolamento del particolato (da qui il termine wall-flow per indicare la tipologia dei filtri). Al fine di minimizzare eventuali fughe dei fumi dalle pareti laterali esterne dei filtri (in caso di sovrappressione) oppure ingressi di aria esterna nel filtro (in condizioni di

depressione), sono stati valutati diversi tipi di rivestimenti superficiali. Il coating deve essere in grado di:

- aderire a superfici in SiC della matrice del filtro;
- resistere a temperature fino a 800°C;
- presentare buona tenuta ai gas;
- essere di facile applicabilità sulla superficie del filtro;
- avere un comportamento alle microonde neutro (assorbimento trascurabile) oppure confrontabile con il materiale del filtro catalitico, in modo da non perturbare il comportamento del filtro alle microonde.

Il rivestimento individuato, a base dello stesso materiale che costituisce i filtri, risulta idoneo ai suddetti requisiti, come verificato preliminarmente in test svolti su campioni dello stesso riscaldati in un forno a microonde e in muffola, oltre che da test di tenuta all'aria in leggera sovrappressione.

## 2.2 L'apparato sperimentale

Durante le prove si sono utilizzati gli strumenti di analisi e la linea di campionamento fumi allestiti presso la Hall Tecnologica THEXAS del centro ENEA di Saluggia. I principali strumenti sono di seguito descritti.

### 2.2.1 Generatore di calore

Il generatore di calore utilizzato è una caldaia a biomassa di potenza nominale pari a 30 kW, con alimentazione a pellet o cippato, di marca KWB e modello Multifire USV V 30, dotata di un serbatoio di stoccaggio del combustibile collegato al corpo caldaia con capacità di circa 1000 litri. La camera di combustione della caldaia è realizzata in acciaio speciale ed è composta da un piatto di combustione inferiore girevole a forma circolare, da un anello di combustione secondaria e da un sensore di livello delle braci. La coclea di alimentazione trasporta il combustibile dal serbatoio di stoccaggio al piatto di combustione inferiore, alimentando la camera di combustione dal basso. Nelle prove sperimentali è stato usato pellet certificato.

### 2.2.2 Analizzatori delle concentrazioni di CO e CO<sub>2</sub> infrarossi (NDIR)

Le concentrazioni di anidride carbonica e monossido di carbonio sono misurate attraverso degli analizzatori ad infrarossi il cui funzionamento si basa sull'assorbimento delle radiazioni infrarosse. La radiazione prodotta da una sorgente a infrarossi viene modulata e attraversa la camera dove è presente il campione da analizzare per poi giungere a un rilevatore di infrarossi. Parallelamente, è presente un'altra camera con un gas di riferimento (azoto). Il gas nella camera di misura assorbe specifiche lunghezze d'onda; l'attenuazione di queste lunghezze d'onda è misurata dal rilevatore che, contemporaneamente, misura la radiazione del fascio di luce passante nell'altra camera. La concentrazione del gas sarà quindi proporzionale alla differenza dei due segnali e lo strumento produrrà un segnale in uscita proporzionale a tale concentrazione.

### 2.2.3 Analizzatore di ossigeno paramagnetico

La concentrazioni di ossigeno nei fumi sono misurate attraverso analizzatori paramagnetici. L'analizzatore di ossigeno paramagnetico sfrutta la proprietà paramagnetica dell'ossigeno. Lo strumento presenta due coppie di magneti permanenti che creano un campo magnetico focalizzato; in questo modo qualsiasi particella di ossigeno presente verrà attratta dalla parte più forte del campo magnetico. All'interno del campo vengono installate due sfere di vetro piene di azoto su di una sospensione rotante. Nella parte centrale della sospensione viene

fissato uno specchio su cui viene proiettata una luce che riflessa viene diretta su una coppia di fotocellule. L'ossigeno attratto dal campo magnetico sposta le sfere piene di azoto, causando la rotazione della sospensione. Le fotocellule rilevano il movimento e generano un segnale che viene trasferito ad un sistema a controreazione. Il sistema a controreazione trasferisce la corrente attorno ad un cavo fissato alla sospensione e ciò determina un effetto motore che mantiene la sospensione nella sua posizione originale. La corrente che fluisce attorno al cavo è direttamente proporzionale alla concentrazione di ossigeno nella miscela di gas.

#### 2.2.4 Strumento di misura della concentrazione di particolato

Per la misure della concentrazione di particolato nei fumi si è utilizzato uno strumento di analisi in continuo, il Pegasor Particle Sensor. Questo strumento ha il vantaggio di :

- produrre misure in tempo reale;
- operare in continuo per misurare la concentrazione di particolato;
- misurare la concentrazione a differenti condizioni di pressione, velocità e temperature dei fumi.

Il principio di funzionamento dello strumento si basa sulla carica di particelle e sulla rilevamento delle particelle cariche. Una corona alimentata ad alto voltaggio permette la produzione di ioni dall'aria compresso in ingresso nello strumento. Gli ioni caricano il particolato contenuto nei fumi in ingresso nello strumento e vengono catturati da una trappola ionica, permettendo quindi la loro lettura attraverso un sensore. Lo strumento misura le particelle dalle dimensioni di pochi nanometri fino a 2,5  $\mu\text{m}$ , nel campo di concentrazioni da 1 a 500  $\text{mg}/\text{m}^3$ .

#### 2.2.5 Analizzatore dei composti organici totali

In laboratorio è presente un analizzatore di composti organici totali a ionizzazione di fiamma (FID). Per il funzionamento dello strumento si adoperava un generatore di idrogeno puro che ha lo scopo di generare il combustibile che alimenta la fiamma dello strumento. Infatti, la fiamma risultante dalla combustione di idrogeno in aria pirolizza i composti organici producendo atomi caricati positivamente (cationi) ed elettroni. Al fine di determinare tali ioni, due elettrodi sono disposti lungo il percorso della fiamma; il primo, caricato positivamente, è posto all'uscita del bruciatore mentre l'altro, caricato negativamente, è posizionato lungo la fiamma. I cationi prodotti dall'elevato calore della fiamma vengono attratti dall'elettrodo negativo ricco di elettroni. Nel momento dell'incontro del catione con l'elettrodo negativo, avviene un trasferimento di elettroni mancanti che genera una debole corrente tra i due elettrodi. Attraverso questa corrente è possibile determinare la presenza di composti organici nel gas.

#### 2.2.6 Trasduttore di pressione

Le cadute di pressione ai capi del filtro sono misurate in continuo tramite un trasduttore di pressione piezoresistivo. Tale strumento sfrutta la proprietà di un sensore ceramico di cambiare la propria resistenza elettrica in maniera proporzionale alla differenza di pressione applicatagli. Attraverso la variazione di resistenza è possibile leggere la variazione di corrente e quindi legare le variazioni di pressione a un segnale elettrico.

#### 2.2.7 Riscaldatore elettrico

Per raggiungere la temperatura di rigenerazione nel filtro, si è utilizzato uno scaldatore elettrico a fibre ceramiche. Tale riscaldatore integra una resistenza di ferro-cromo-alluminio che può raggiungere elevate temperature a un isolamento in fibra ceramica e permette di

raggiungere una temperatura massima di 750°C. Il riscaldatore elettrico è comandato da un sistema di controllo e regolazione a catena chiusa, composto da un termoregolatore PID con logica a microprocessore, che riceve come segnale di controllo la temperatura esterna del portafiltro misurata da una termocoppia di tipo K. Il riscaldatore ha le seguenti dimensioni: diametro interno 42,5 mm; lunghezza 110 mm, e viene applicato intorno al porta filtro metallico installato nella linea di campionamento fumi.

#### 2.2.8 Termocamera a infrarossi

Per monitorare le temperature nella linea sperimentale si è utilizzata oltre alle termocoppie di tipo K una termocamera radiometrica. Tale strumento utilizza termometri a infrarossi, ossia sensori optoelettronici che calcolano la temperatura della superficie di un oggetto in base alla radiazione infrarossa emessa da esso. La caratteristica più importante dei termometri a infrarossi è che consentono di misurare la temperatura degli oggetti senza che sia necessario il contatto fisico fra lo strumento e l'oggetto di cui si intende misurare la temperatura.

### 2.3 Il banco prova filtri

L'attività sperimentale si svolge nella Hall Tecnologica "THEXAS" del centro ENEA di Saluggia ha avuto come principale obiettivo quello di testare alcuni prototipi, in scala di laboratorio, di filtri di tipo wall-flow per l'abbattimento delle emissioni di particolato da una caldaia a biomassa. In particolare, durante le prove si è analizzato l'effetto della rigenerazione su tale tipologia di filtri utilizzati per la riduzione delle emissioni inquinanti prodotte da impianti di combustione di biomassa solida.

I filtri testati per l'abbattimento delle emissioni di particolato sono dei filtri wall flow, forniti dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Salerno (Di.I.In.), che collabora con ENEA nell'ambito della presente attività di ricerca.

La linea di campionamento è composta dal generatore di calore di 30 kW alimentato a pellet e da una linea di derivazione dal canale di fumo utilizzata per il campionamento delle emissioni gassose e del particolato (Figura 1). Nella linea di derivazione è inserito il prototipo di filtro da testare; i fumi, raffreddati a valle della linea, sono aspirati tramite una pompa volumetrica.

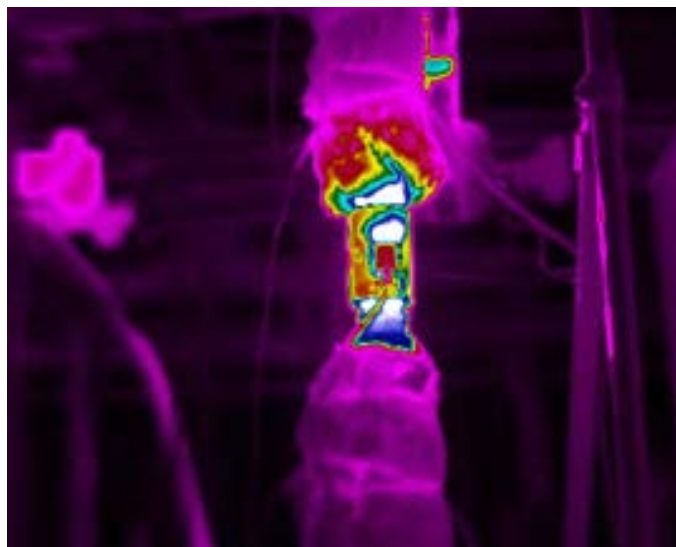
La rigenerazione è ottenuta, come detto, con un riscaldatore per alte temperature a fascia in materiale ceramico installato intorno al portafiltro (Figura 2). A differenza del forno elettrico utilizzato nelle precedenti annualità, questa soluzione presenta transitori più brevi, meglio confrontabili con il sistema di rigenerazione a microonde, in quanto il volume riscaldato è notevolmente inferiore e il riscaldamento è prevalentemente per conduzione. Inoltre, la zona di riscaldamento è limitata al tratto della linea di campionamento dove è alloggiato il filtro.



Figura 1. Vista della linea di prova sperimentale presso la Hall Tecnologica THEXAS a Saluggia



Figura 2. Particolare della linea di campionamento fumi, con il riscaldatore elettrico a fascia ceramica e la coibentazione in lana minerale per alte temperature a monte e a valle del riscaldatore



**Figura 3. Immagine con termocamera IR del riscaldatore elettrico attivo (immagine ottenuta con una scala delle temperature da 20°C a 250°C)**

Lungo la linea sperimentale si trovano punti di prelievo per l'analisi in continuo dei fumi. In particolare, a monte del filtro (nella canna fumaria), sono monitorate le concentrazioni nei fumi di ossigeno, anidride carbonica, monossido di carbonio, composti organici volatili e del particolato fine (<2,5  $\mu\text{m}$ ). A valle del filtro invece sono monitorate le concentrazioni di ossigeno e di anidride carbonica. La scelta delle specie chimiche da analizzare a monte e valle è legata a vincoli di tipo strumentale. Sono inoltre monitorate in continuo la caduta di pressione attraverso il filtro e il tiraggio nella canna fumaria. Le temperature significative dei fumi sono misurate con l'utilizzo di termocoppie di tipo K: in uscita dalla caldaia, in ingresso e in uscita dal filtro e all'uscita del tratto verticale della linea di aspirazione. Tutte queste grandezze sono acquisite in continuo e analizzate attraverso un programma software realizzato appositamente per la presente campagna di test. Per aver un migliore controllo sulla dinamica del processo, le temperature superficiali in vari tratti della linea sono monitorate tramite una termocamera a raggi infrarossi ( Figura 3).

Relativamente al circuito idraulico, sono monitorate le portate e le temperature di ingresso ed uscita dell'acqua in caldaia e nel circuito idraulico della Hall. Per la campagna di prove sperimentali nell'ambito del presente PAR è stato appositamente installato un sistema idraulico di disaccoppiamento tra l'acqua calda che circola in caldaia e l'acqua del circuito idraulico della Hall tecnologica, in modo da ridurre i transitori di avviamento della caldaia, allungare la durata delle prove e migliorare l'operatività della caldaia stessa. In tal modo, è stato possibile ottenere caratteristiche stabili dei fumi a monte dei filtri di prova, con conseguente migliore ripetibilità delle misure e capacità di analisi della fase di rigenerazione con sistema a microonde. L'intervento è consistito nel disaccoppiamento per mezzo di un separatore idraulico della caldaia dal circuito idronico esistente, caratterizzato da lunghe tubazioni di diametro interno 1"  $\frac{1}{4}$  e da un elevato contenuto di acqua, che comporta eccessivi transitori di messa a regime dell'impianto per le specifiche prove di rigenerazione sui filtri catalitici,

Figura 4. Le prove sui filtri sono avviate solo a transitorio concluso, quando la temperatura dei fumi ha raggiunto i valori stabili e accettabili.



**Figura 4. Sistema di disaccoppiamento idraulico della caldaia di prova dal circuito idraulico della Hall Tecnologica**

I filtri di tipo wall-flow provati nei test sperimentali (

Figura 5) sono costituiti da monoliti ceramici porosi con geometria a canali, in cui le sezioni di ingresso ed uscita di ogni singolo canale vengono ostruite alternativamente con l'obiettivo di forzare il moto dei fumi attraverso l'elemento filtrante permettendo così la rimozione meccanica delle particelle. I filtri catalitici utilizzati in fase di prova sono a base di carburo di silicio (SiC) aventi come catalizzatore ferrite di rame ( $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ ), con una concentrazione pari al 20% in massa la quale è risultata nelle precedenti annualità come il migliore compromesso tra prestazioni di filtrazione e caratteristiche meccaniche del filtro. I prototipi utilizzati nelle prove sperimentali presentano due diverse porosità: una standard e una maggiorata. I filtri a porosità standard hanno un diametro iniziale dei pori di  $17 \mu\text{m}$ , che con l'aggiunta del 20% in massa del catalizzatore si riduce a  $11 \mu\text{m}$ . Il filtro a porosità maggiorata invece presenta un diametro iniziale dei pori pari a  $24 \mu\text{m}$  e con il 20% di catalizzatore in massa si riduce a  $17,5 \mu\text{m}$ .

Durante l'attività sperimentale si sono utilizzati filtri di diametro nominale 26 mm, con diverse lunghezze e porosità:

- Porosità standard e lunghezza 125 mm;
- Porosità maggiorata e lunghezza 125 mm;
- Porosità maggiorata e lunghezza 61 mm.

Le prove svolte sono state effettuate in condizioni stazionarie di funzionamento della caldaia. A tal fine si è definita una procedura operativa di gestione delle prove.

Attraverso le prove effettuate è stato possibile analizzare il comportamento dei filtri e la successiva fase di rigenerazione. Come è possibile osservare in Figura 6 (tratta da una prova in laboratorio) in generale per ogni filtro si è riscontrato sperimentalmente, nei primi minuti, un rapido incremento della caduta di pressione, fino a raggiungere un valore oltre il quale diminuisce sensibilmente la pendenza della curva (caduta di pressione iniziale stabilizzata). In questa fase, dominata dal fenomeno della *depth filtration*, il rapido incremento della caduta di pressione è causato dalla riduzione della porosità delle pareti.

Dopo questo primo rapido aumento della caduta di pressione è possibile riconoscere quattro fasi. In una prima fase il particolato di dimensione maggiore rispetto ai pori inizia a depositarsi sulle pareti del filtro e il particolato di dimensioni minori si disperde in profondità nei pori, causando un ulteriore aumento della caduta di pressione.

Superata questa fase, lo stesso particolato depositato inizia ad agire come un filtro. Da questo punto in poi si evidenzia una seconda fase in cui domina il fenomeno della *cake filtration* e si osserva un incremento nella pendenza della curva delle perdite di carico che continuano finché non avviene la rigenerazione.



**Figura 5. Filtro utilizzato nelle prove sperimentali**

Durante la rigenerazione si possono riconoscere ulteriori due fasi, prendendo come riferimento la caduta di pressione: la prima in cui si ha una rapida diminuzione delle perdite di carico, la seconda in cui le perdite di carico diminuiscono più lentamente. L'insieme di queste quattro fasi può essere visto come un ciclo operativo del filtro che comprende la sua occlusione e la sua rigenerazione. Queste fasi prima descritte possono essere approssimate con andamenti pressappoco lineari, in questo modo è possibile attraverso la costruzione di una linea di tendenza determinarne il coefficiente lineare e avere visione di come la caduta di pressione varia diversamente nel tempo a seconda della fase studiata.

Dall'analisi della caduta di pressione del filtro a fine rigenerazione si è definita l'efficienza di rigenerazione come rapporto fra la caduta di pressione raggiunta a fine rigenerazione ( $\Delta p_{fr}$ ) e la caduta di pressione iniziale stabilizzata ( $\Delta p_{is}$ ):

$$\eta_{rig} = \frac{\Delta p_{fr}}{\Delta p_{is}}$$

In ogni prova è stato effettuato lo studio dei cicli del filtro e sono state analizzate le emissioni prodotte dalla caldaia.

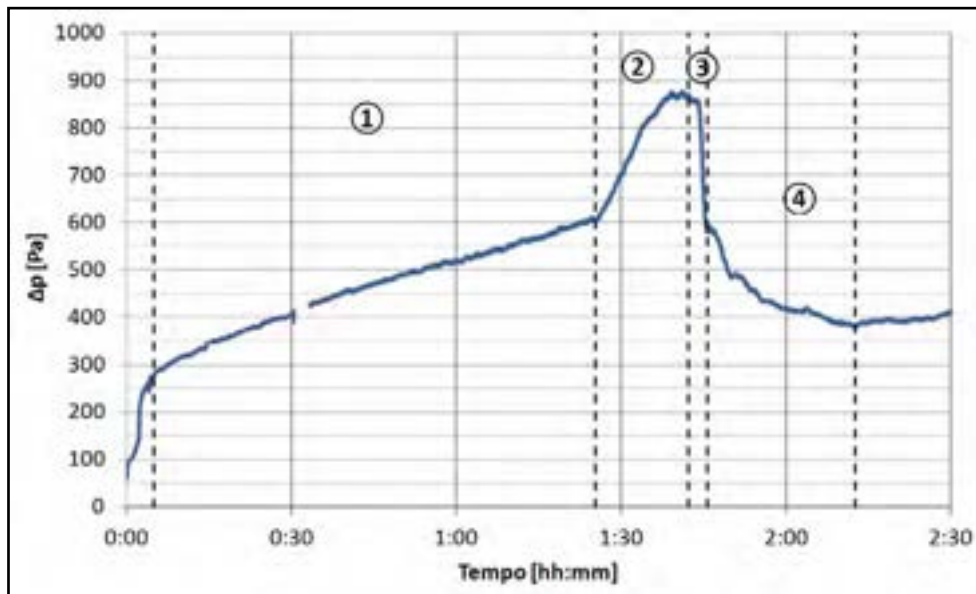


Figura 6. Andamento tipico della caduta di pressione nel filtro

#### 2.4 Descrizione delle prove svolte

Per rendere più comprensibile l'analisi dei dati raccolti si è deciso di denominare i principali filtri testati e per i quali sono stati ottenuti risultati significativi, secondo la denominazione presentata in Tabella 1. I dati ricavati da ogni prova saranno ricollegabili a tale filtro attraverso la nomenclatura: lettera\_filtro.giorno\_prova. Per esempio i dati ricavati dal primo giorno di prova del filtro a porosità standard lungo 125 saranno riconoscibili attraverso la sigla A1. Laddove non diversamente specificato, le prove sono condotte con una portata volumetrica dei fumi aspirati pari a 7,6 NL/min, in modo da ottenere un campionamento pressoché isocinetico dei fumi in corrispondenza dell'ugello di aspirazione.

**Tabella 1. Tabella di denominazione dei filtri testati**

Filtro analizzato	Lettera di riconoscimento
Filtro a porosità standard lungo 125 mm	A
Primo filtro a porosità maggiorata lungo 125 mm	B
Filtro a porosità maggiorata lungo 61 mm	C
Secondo filtro a porosità maggiorata lungo 125 mm	D

**2.4.1 Prove con filtro a porosità standard e lunghezza 125 mm**

Il filtro A è stato il primo filtro ad essere testato ed il relativo periodo di prove è durato due giorni.

Nella prima giornata di prove, lo scopo principale è stato l'analisi del comportamento del filtro e dei parametri di funzionamento in condizioni dinamiche. La temperatura del riscaldatore elettrico durante la fase di normale funzionamento è impostata a 250°C.

**Tabella 2. Tabella riassuntiva della prova A1**

Prova A1			
Ora inizio prova [hh:mm]	10:28		
Durata prova [hh:mm:ss]	05:51:41		
Pressione ambiente [mbar]	985,4		
Temperatura ambiente [°C]	28,7		
Parametri	Min	Med	Max
Temperatura dei fumi in canna fumaria [°C]	116,2	127,4	140,0
Temperatura dei fumi all'ingresso filtro [°C]	92,7	135,2	169,9
Temperatura dei fumi in uscita dal filtro [°C]	86,8	259,9	391,0
Temperatura dei fumi in uscita dalla linea di campionamento [°C]	26,4	122,6	175,9
Portata d'acqua [l/h]	2382	2522	2641
Temperatura dell'acqua in ingresso alla caldaia [°C]	48,8	62,9	70,5
Temperatura dell'acqua in uscita dalla caldaia [°C]	59,0	71,7	75,7
O <sub>2</sub> a monte del filtro [%]	7,1	8,6	10,4
CO <sub>2</sub> a monte del filtro [%]	11,0	11,7	12,4
CO a monte del filtro [%]	0,04	0,23	0,73
PM a monte del filtro [mg/Nm <sup>3</sup> ]	28,3	68,2	107,5
COT a monte del filtro [mg/Nm <sup>3</sup> ]	4,7	46,4	99,5
O <sub>2</sub> a valle del filtro [%]	6,2	7,4	9,0
CO <sub>2</sub> a valle del filtro [%]	11,7	13,1	14,2
Potenza utile caldaia [kW]	14,1	25,9	31,8
Rendimento medio caldaia [%]	87,2%		
Δp filtro [Pa]	115	537	902

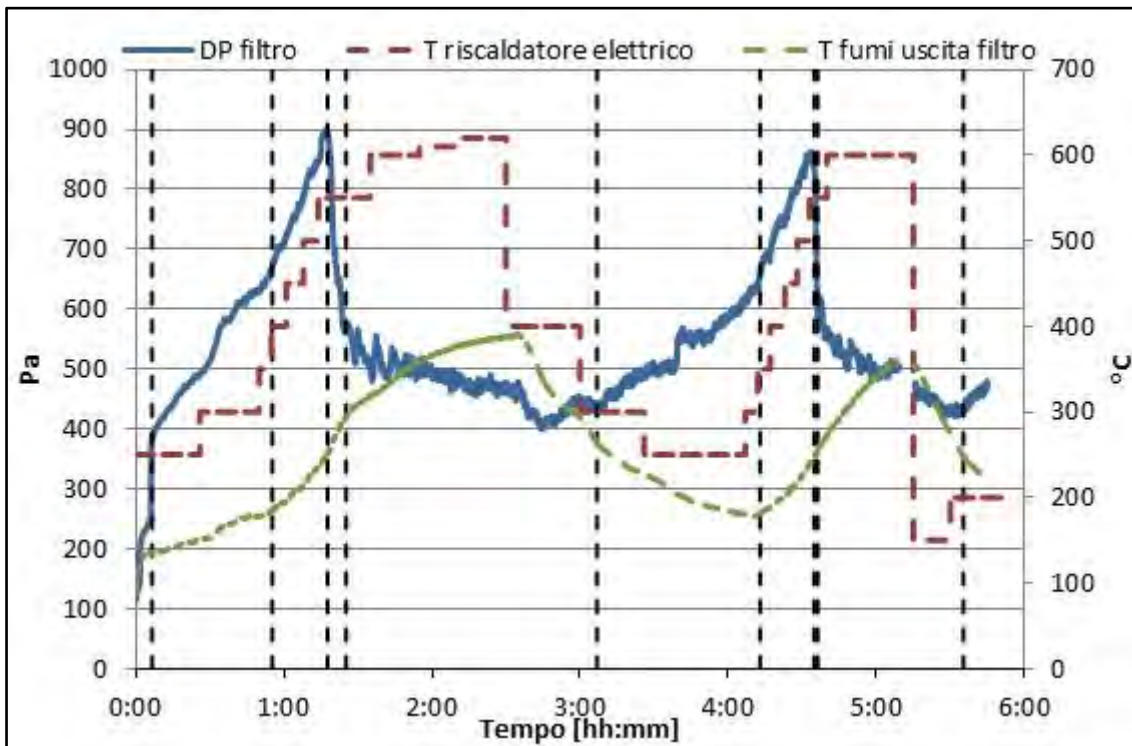


Figura 7. Andamento della caduta di pressione nel filtro nella prova A1

Come è possibile osservare in Figura 7, durante la prova il filtro ha subito due rigenerazioni. L'anomalo aumento della caduta di pressione dopo 3 ore e 38 minuti è dovuto a una regolazione della pompa di aspirazione, mentre nel periodo intercorrente tra i minuti 05:08 e 05:13 i valori non sono stati considerati dal momento che la pompa aveva smesso di aspirare a causa di una interruzione dell'alimentazione elettrica. Sono facilmente osservabili le fasi di rigenerazione utilizzate durante questa prova e il grafico illustra il comportamento del filtro in termini di caduta di pressione.

Nel primo ciclo è stata usata una procedura di rigenerazione molto graduale: la temperatura impostata nel riscaldatore elettrico è aumentata di 50°C circa ogni 5 minuti, mantenendo, inoltre, il valore massimo di temperatura (620°C) per circa trenta minuti per osservare se ciò potesse comportare un vantaggio in termini di recupero della caduta di pressione. Nel secondo ciclo di rigenerazione una volta ottenuta la rigenerazione si è diminuita istantaneamente la temperatura impostata nel riscaldatore elettrico. Come è possibile notare, mantenere un'elevata temperatura del filtro per più di trenta minuti dopo la rigenerazione non porta a benefici visibili, giacché si può notare come nella quarta fase del primo ciclo la caduta di pressione anche con una temperatura più alta non sortisce alcun beneficio. Infatti nel secondo ciclo in cui si è utilizzata una procedura di rigenerazione diversa, impiegando in questo modo per meno tempo il riscaldatore elettrico, si sono raggiunti valori molto simili dell'efficienza di rigenerazione (Tabella 3). Da queste osservazioni si può dedurre che:

- Temperature troppo elevate del riscaldatore ( $>500^{\circ}\text{C}$ ) non sembrano portare benefici visibili alla rigenerazione del filtro;
- Mantenere per più tempo una temperatura elevata dopo la fase di rigenerazione non porta vantaggi rilevanti;
- Il secondo ciclo di rigenerazione ha ancora un'alta efficienza, poiché si raggiungono valori finali di caduta di pressione molto simili a quelli del primo ciclo.

Nei primi minuti della prova si può osservare la fase iniziale di occlusione del filtro e come si può rilevare in Tabella 4 si passa da un valore della caduta di pressione di 127 Pa a 372 Pa in circa 6 minuti.

Analizzando i dati raccolti è possibile notare come il cambio di pendenza della curva dell'andamento della caduta di pressione avviene a valori molto simili (Figura 9). Inoltre si può riscontrare una certa ricorrenza nei valori di temperatura dei fumi in uscita dal filtro nel momento di inizio e fine della rigenerazione (Tabella 6). Questo parametro è un indicatore della temperatura raggiunta dal filtro, che permette l'attivazione del catalizzatore. Nel caso in esame la temperatura media per cui si ha l'inizio e la fine della rigenerazione è pari a 252 °C.

**Tabella 3. Recupero della pressione iniziale e tempo di utilizzo del riscaldatore elettrico per i due cicli della prova A1**

	Efficienza di rigenerazione [%]	Tempo di utilizzo del riscaldatore elettrico [%]
Ciclo 1	90,4	87,4
Ciclo2	89,4	59,8

**Tabella 4. Caratteristiche della prima fase di deposizione del particolato nel filtro nella prova A1**

$\Delta P_{\min}$ [Pa]	$\Delta P_{\max}$ [Pa]	$\Delta P$ [Pa]	Durata [hh:mm]
127	372	245	00:06

**Tabella 5. Valori per cui si ha il passaggio da un meccanismo misto di depth filtration e cake filtration a un meccanismo prevalente di cake filtration nella prova A1**

Ciclo 1	Ciclo 2
668	658

**Tabella 6. Temperatura dei fumi in uscita dal filtro all'inizio e alla fine della rigenerazione nella prova A1**

Temperatura fumi in uscita dal filtro [°C]			
Ciclo 1		Ciclo 2	
Inizio rigenerazione	Fine Rigenerazione	Inizio Rigenerazione	Fine Rigenerazione
252	264	249	248

In Figura 8 sono rappresentate le emissioni di particolato e monossido di carbonio: a monte del filtro si ha in media 0,228% di CO, mentre l'emissione di particolato risulta mediamente pari a 68,2 mg/Nm<sup>3</sup>.

In Figura 9, la potenza non ha un andamento costante a causa di alcune variazioni della portata di acqua nel circuito idraulico operate per valutare l'influenza su alcuni parametri della prova. Queste variazioni hanno determinato anomalie nei valori calcolati della potenza utile e del rendimento termico, principalmente legati ai transitori termici per via dell'inerzia della caldaia e delle tubazioni che determinano una variazione più lenta della temperatura dell'acqua di

mandata, mentre nella realtà la caldaia lavora in condizioni stazionarie. Tali anomalie nei valori di potenza e di rendimento sono quindi non reali, e come tali non vanno considerati.

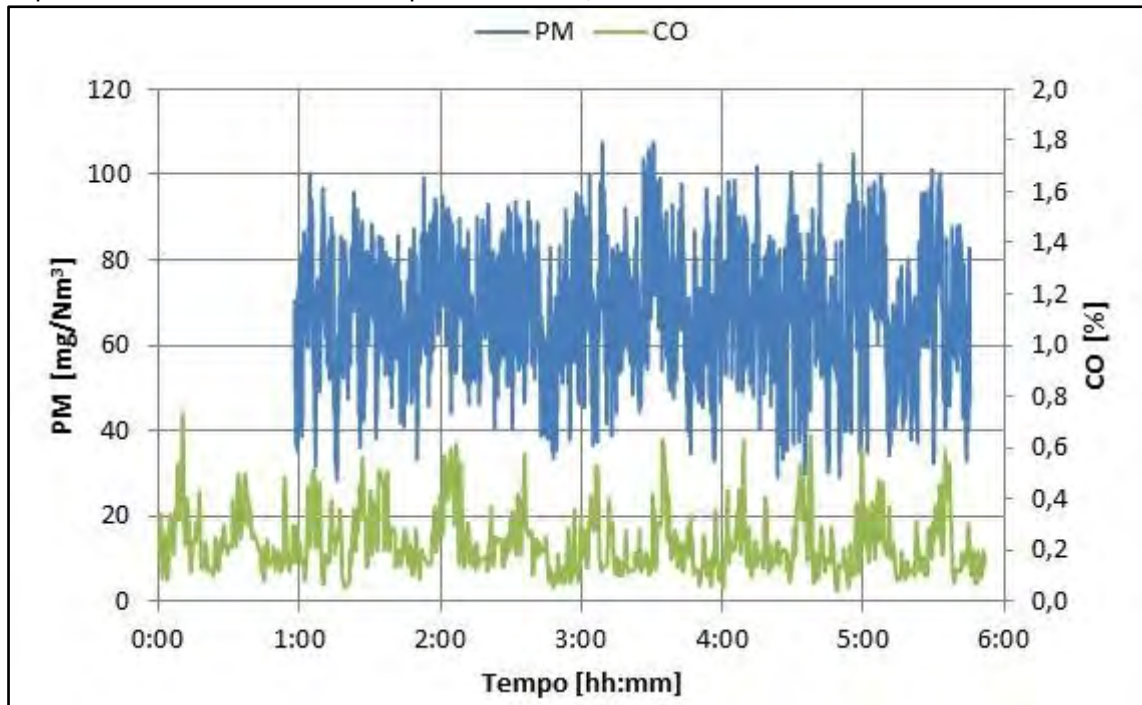


Figura 8. Andamento delle emissioni di PM e CO durante la prova A1

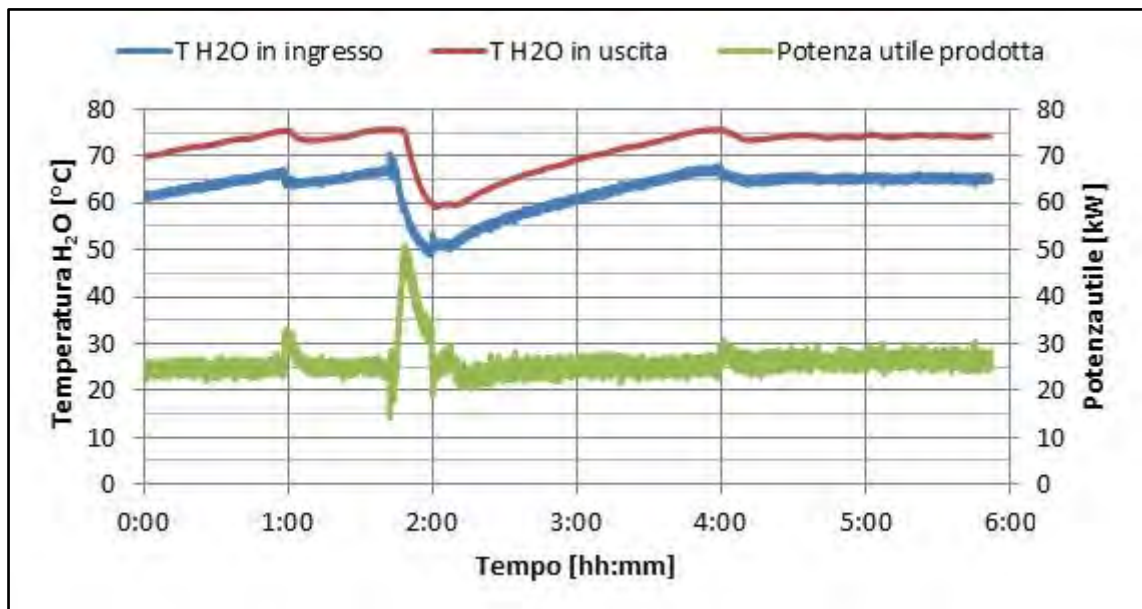


Figura 9. Andamento della potenza utile e della temperatura dell'acqua in entrata ed uscita dalla caldaia durante la prova A1

La prova sullo stesso filtro viene ripresa il giorno successivo e l'analisi si concentra sull'esame del numero massimo di cicli ottenibile dal prototipo e sullo studio del recupero della pressione iniziale nel filtro termine di ogni ciclo.

La temperatura del riscaldatore elettrico durante la fase di normale funzionamento è stata impostata sui 200°C.

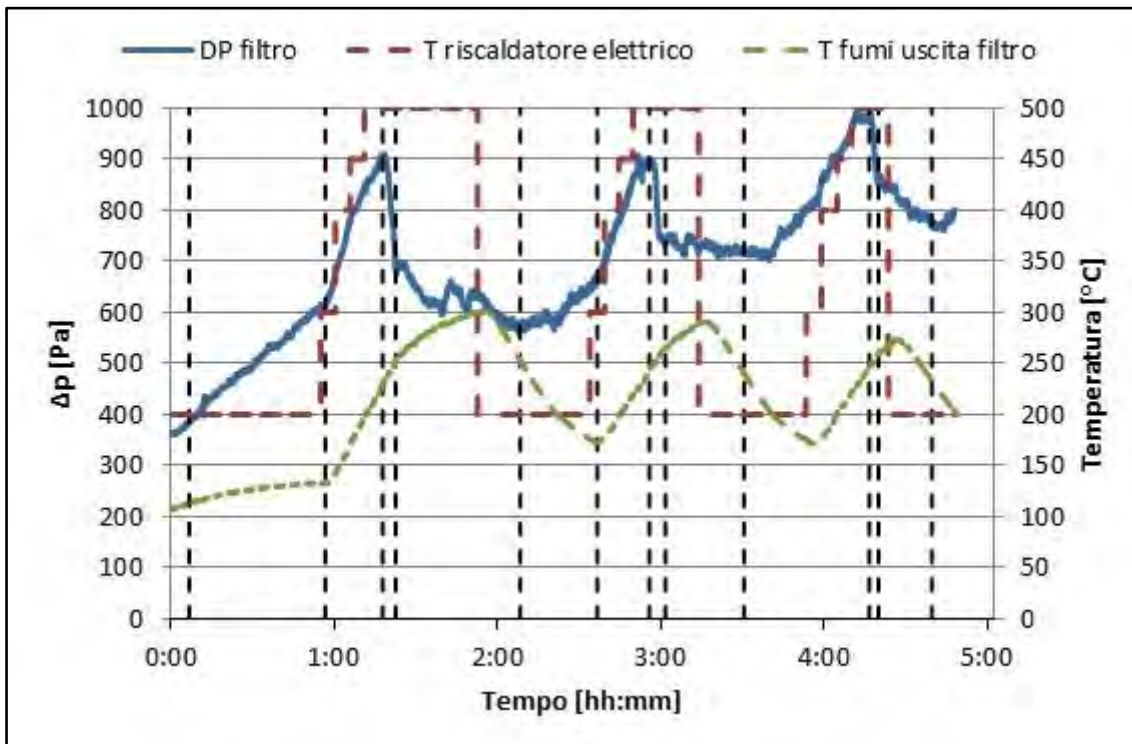
In seguito all'analisi della prima prova si è deciso di adottare una strategia di rigenerazione che prevedesse, una volta superato un certo valore di caduta di pressione nel filtro (600 Pa per il primo ciclo, 650 Pa per il secondo e 800 Pa per il terzo), la variazione della temperatura del riscaldatore elettrico ogni cinque minuti secondo i seguenti intervalli:

- Da 200 a 300°C ;
- Da 300 a 400°C;
- Da 400 a 450°C;
- Da 450 a 500°C.

Una volta incominciata la rigenerazione, la temperatura del riscaldatore è mantenuta a 500°C per un intervallo di tempo variabile da ciclo a ciclo. In questo modo si è inteso affinare la strategia di rigenerazione.

**Tabella 7. Tabella riassuntiva della prova A2**

Prova A2			
Ora inizio prova [hh:mm]	10:28		
Durata prova [hh:mm:ss]	04:48:58		
Pressione ambiente [mbar]	988,3		
Temperatura ambiente [°C]	26,1		
Parametri	Min	Med	Max
Temperatura dei fumi in canna fumaria [°C]	114,2	126,0	136,6
Temperatura dei fumi all'ingresso filtro [°C]	96,0	123,4	140,8
Temperatura dei fumi in uscita dal filtro [°C]	106,7	212,2	302,0
Temperatura dei fumi in uscita dalla linea di campionamento [°C]	30,0	99,8	129,9
Portata d'acqua in caldaia [l/h]	2479	2512	2539
Temperatura dell'acqua in ingresso alla caldaia [°C]	57,6	60,7	62,7
Temperatura dell'acqua in uscita dalla caldaia [°C]	67,2	69,6	71,2
O <sub>2</sub> a monte del filtro [%]	7,3	8,8	10,9
CO <sub>2</sub> a monte del filtro [%]	10,9	11,6	12,2
CO a monte del filtro [%]	0,04	0,21	0,57
PM a monte del filtro [mg/Nm <sup>3</sup> ]	21,5	57,2	117,3
COT a monte del filtro [mg/Nm <sup>3</sup> ]	1,8	41,4	99,4
O <sub>2</sub> a valle del filtro [%]	6,9	8,1	10,9
CO <sub>2</sub> a valle del filtro [%]	11,6	12,6	13,5
Potenza utile caldaia [kW]	20,9	25,9	33,6
Rendimento medio caldaia [%]	87,2		
Δp filtro [Pa]	361	690	997



**Figura 10. Andamento della caduta di pressione ai capi del filtro in funzione del tempo di prova nella prova A2**

Come è possibile osservare in Figura 10, sono stati effettuati altri tre cicli sul filtro a porosità standard arrivando a un numero complessivo di cinque cicli nelle due prove, dato che alla fine del quinto ciclo la caduta di pressione è risultata troppo elevata per continuare i test.

A differenza della prova precedente si può notare come il filtro abbia subito un rapido peggioramento delle prestazioni, raggiungendo dopo la rigenerazione valori della caduta di pressione sempre più alti. Si può notare come all'inizio del ciclo il filtro funzioni solo attraverso il meccanismo della *cake filtration* a riprova che oramai i pori della matrice sono quasi completamente ostruiti. Anche in questa prova si nota come mantenere per più tempo alte temperature del riscaldatore elettrico (e quindi del filtro) non abbia portato sostanziali vantaggi alla pressione minima raggiunta, poiché dopo essere diminuita la caduta di pressione ha presentato un graduale appiattimento. Nel primo ciclo infatti si è mantenuta una temperatura di 500°C per 30 minuti, nel secondo per 15 minuti e nel terzo per soli 5 minuti. Dalle prove è emerso che mantenere una temperatura di 500°C del riscaldatore elettrico per 10 minuti rappresenti il miglior compromesso fra un uso limitato del riscaldatore elettrico in fase di rigenerazione e il raggiungimento di un valore minimo di caduta di pressione dopo ogni ciclo.

In Tabella 8 sono riportati i valori in base ai quali avviene il cambio di pendenza durante le due prove; come già detto, durante il quinto ciclo, si è notato che la filtrazione sia prevalentemente dovuta al meccanismo della *cake filtration*.

Per quanto concerne la temperatura dei fumi, le temperature di inizio e fine rigenerazione sono molto simili a quelle della prova precedente, si può infatti notare in Tabella 9 come il processi di rigenerazione inizi o termini in un intervallo di temperatura compreso tra i 230°C e i 250°C.



**Tabella 8. Valori per cui si ha il passaggio da un meccanismo misto di depth filtration e cake filtration a un meccanismo prevalente di cake filtration nella prova A2**

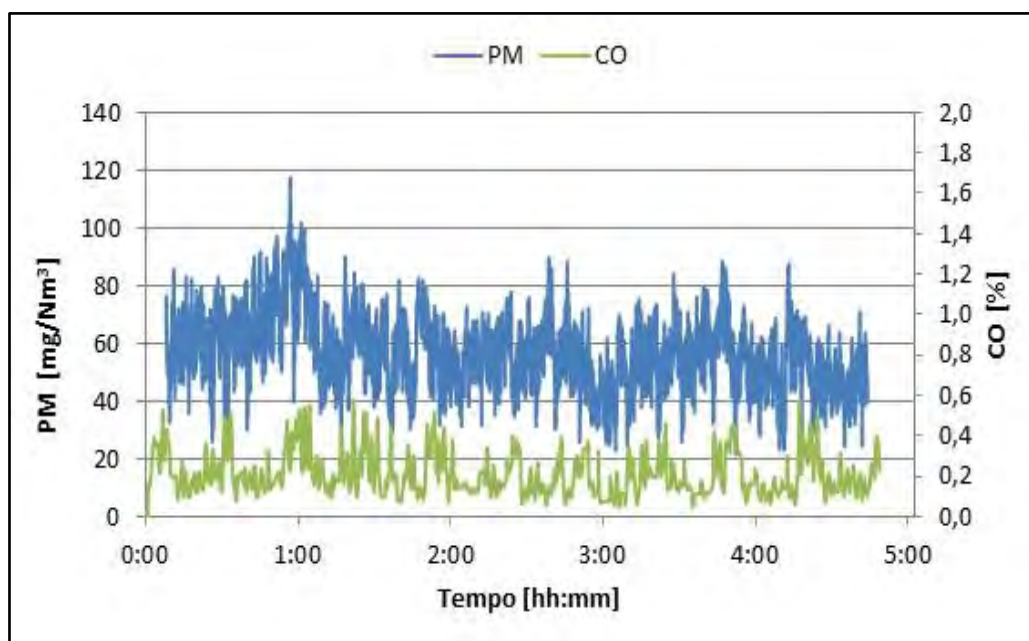
Ciclo 3	Ciclo 4
613,2	666,0

**Tabella 9. Temperatura dei fumi in uscita dal filtro all'inizio e alla fine della rigenerazione nella prova A2**

Temperatura fumi in uscita dal filtro [°C]					
Ciclo 3		Ciclo 4		Ciclo 5	
Inizio rigenerazione	Fine Rigenerazione	Inizio Rigenerazione	Fine Rigenerazione	Inizio Rigenerazione	Fine Rigenerazione
229,4	252,7	242,4	240,1	246,6	233,6

**Le emissioni di CO e PM durante sono riportate in**

Figura 11. Durante questa prova si sono riscontrate per entrambi i parametri dei valori medi minori rispetto la prova precedente, benché risulti difficile trarre conclusioni di carattere generale o fare confronti di maggiore dettaglio.



**Figura 11. Andamento delle emissioni di PM e CO durante la prova A2**

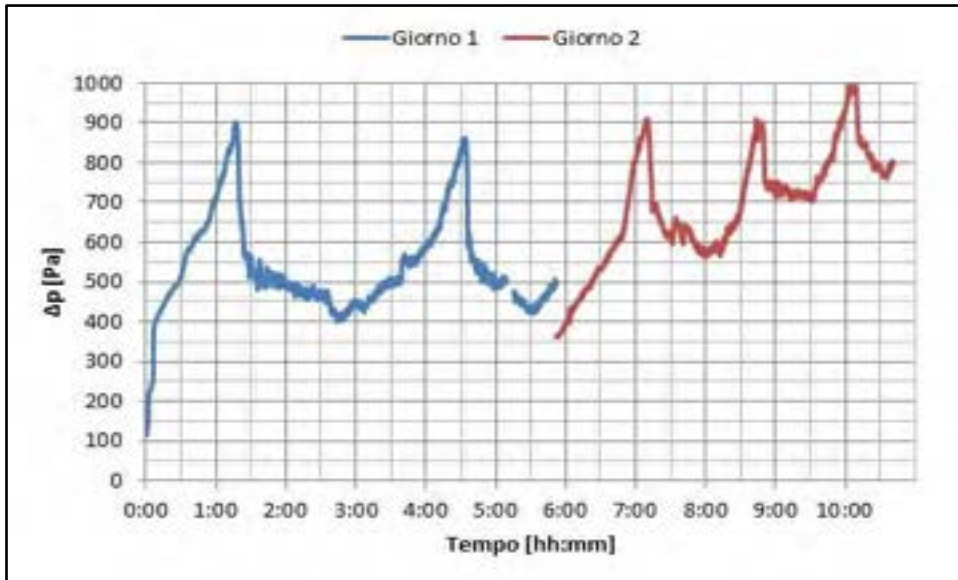


Figura 12. Andamento della caduta di pressione ai capi del filtro a porosità standard

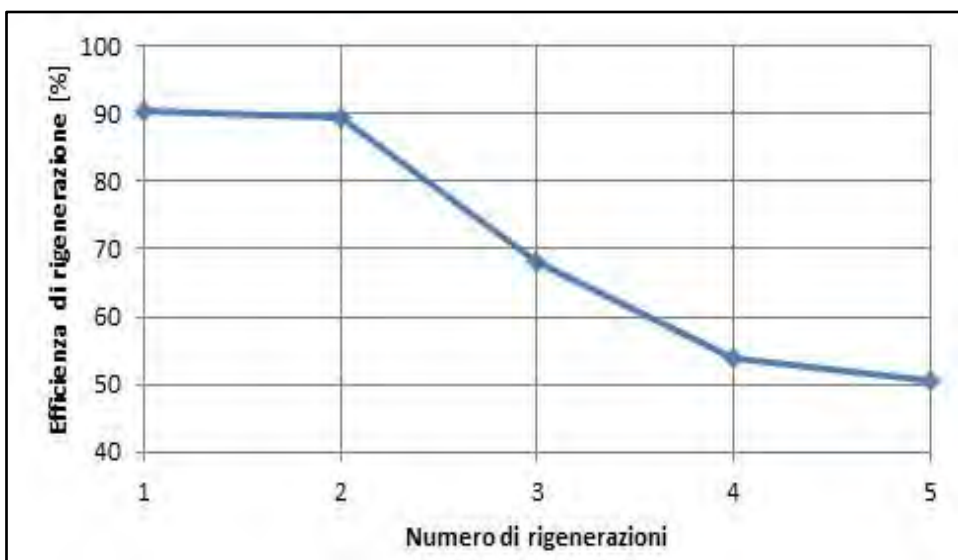


Figura 13. Efficienza di rigenerazione in funzione del numero di rigenerazioni

Raggruppando i risultati ottenuti nelle due prove sul filtro a porosità standard e lunghezza 125 mm, è possibile osservare come si sia verificato un progressivo peggioramento delle prestazioni del filtro dopo ogni ciclo di rigenerazione, tanto più accentuato con l'avanzare del tempo (Figura 12): se infatti per il secondo ciclo del filtro risulta ancora un'alta efficienza di rigenerazione a partire dal terzo ciclo in poi si osserva una netta diminuzione da un valore di 90,6 % del primo ciclo al 50% dell'ultimo ciclo (Figura 13). Analizzando i dati di Tabella 12 si può constatare come il filtro al termine della quinta rigenerazione assuma un valore quasi doppio della caduta di pressione stabilizzata iniziale del filtro.

Esaminando, invece, il cambiamento di pendenza caratteristico del passaggio della fase 1 e della fase 2 di ogni ciclo si può notare come esso avveniva intorno i 660 Pa (Tabella 10). Questa informazione risulta molto utile anche per le successive prove, atteso che il processo di aumento di temperatura per ottenere la rigenerazione del filtro sia avviato contestualmente all'inizio della *cake filtration*, in modo tale da non far raggiungere ai capi del filtro cadute di

pressione troppo elevate. Alla luce di questa prima analisi appare, quindi, evidente che il valore di 600 Pa risulti un buon valore di soglia per l'avvio del riscaldamento del filtro per la rigenerazione.

Per quanto concerne la temperatura dei fumi in uscita dal filtro le temperature di inizio e fine rigenerazione sono molto simili fra loro (Tabella 11) e infatti, si può infatti notare in come il processi di rigenerazione inizi o termini sempre in un range di temperatura compreso tra i 230 °C e i 250°C.

**Tabella 10. Valori per cui si ha il passaggio da un meccanismo misto di depth filtration e cake filtration a un meccanismo prevalente di cake filtration nel filtro a porosità standard lungo 125 mm**

Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4
668	658	613	666

**Tabella 11. Temperatura dei fumi in uscita dal filtro durante l'inizio e la fine del processo di rigenerazione nel filtro a porosità standard lungo 125 mm**

	Temperatura fumi in uscita dal filtro [°C]	
	Inizio rigenerazione	Fine Rigenerazione
Ciclo 1	252,1	264,2
Ciclo 2	248,6	248,4
Ciclo 3	229,4	252,7
Ciclo 4	242,4	240,1
Ciclo 5	246,6	233,6

**Tabella 12. Analisi dei cicli del filtro tipo A. In verde sono evidenziate le fasi in cui si ha una diminuzione della caduta di pressione, in azzurro le fasi in cui la caduta di pressione aumenta.**

	Fase	$\Delta P_{\min}$ [Pa]	$\Delta P_{\max}$ [Pa]	$\Delta P$ [Pa]	Durata fase [hh:mm]	Coefficiente lineare [Pa/s]	Durata Totale [hh:mm]	Durata ciclo [hh:mm]	Efficienza di rigenerazione [%]
Ciclo 1	1	387	668	281	0:48	0,10	1:11	3:00	90,6%
	2	670	891	221	0:22	0,17			
	3	574	891	317	0:07	-0,79	1:49		
	4	427	574	147	1:41	-0,02			
Ciclo 2	1	418	658	240	1:26	0,04	1:48	2:48	89,4%
	2	657	837	180	0:21	0,15			
	3	588	836	248	0:01	-3,66	1:00		
	4	433	585	152	0:59	-0,05			
Ciclo 3	1	363	613	251	0:56	0,08	1:17	2:08	68,0%
	2	613	904	291	0:21	0,24			
	3	688	904	216	0:04	-0,77	0:50		
	4	569	686	117	0:45	-0,34			
Ciclo 4	1	568	666	98	0:28	0,05	0:47	1:22	54,0%
	2	666	899	233	0:19	0,22			
	3	738	900	162	0:05	-0,63	0:34		
	4	716	738	22	0:28	-0,01			
Ciclo 5	2	714	994	279	0:46	0,11	0:46	1:09	50,5%
	3	849	995	147	0:03	-0,87	0:22		
	4	767	849	82	0:19	-0,07			

#### 2.4.2 Primo set di prove con filtro porosità maggiorata e lunghezza 125 mm

Sulla base delle prove effettuate con il filtro A, si è affinata la strategia di rigenerazione riportata in Figura 14. La temperatura di base del riscaldatore, durante la fase di normale funzionamento del filtro, è stata impostata a 180°C per mantenere in temperatura la linea di prova evitando la condensa dei fumi campionati. Una volta superata la caduta di pressione nel filtro caratteristica del passaggio dalla depth filtration alla cake filtration (indicativamente 600 Pa) la temperatura del riscaldatore elettrico è stata impostata a 300°C, e successivamente viene variata ogni cinque minuti secondo i seguenti intervalli:

- Da 300 a 400 °C;
- Da 400 a 450 °C;
- Da 450 a 500 °C.

Una volta iniziata la rigenerazione nel filtro la temperatura di 500°C è mantenuta per dieci minuti, alla fine dei quali viene impostata nuovamente la temperatura di 180°C. Tale procedura è stata utilizzata anche per le successive prove.

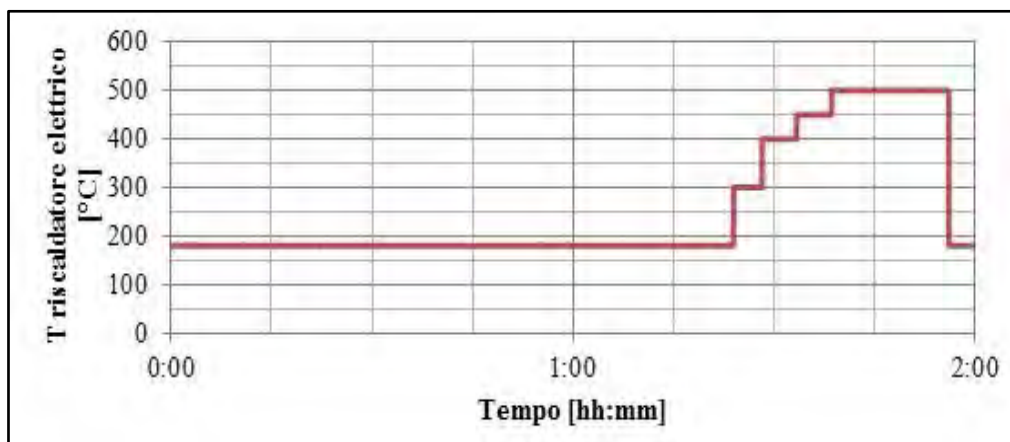


Figura 14. Strategia di rigenerazione adottata durante la prova

Dall'esame della

Figura 15 si può notare come durante la prima giornata di prova il filtro abbia effettuato tre cicli completi. Inoltre dal secondo ciclo si nota una perdita di efficienza che però sembra rimanere la stessa nel terzo ciclo della prova. È possibile osservare come durante la prima fase di impaccamento si raggiunga un valore di caduta di pressione minore rispetto ai 372 Pa del filtro a porosità standard (Tabella 14), mentre la variazione di pendenza nel filtro avviene a valori molto simili in questa prova (intorno i 600 Pa), confermando quindi la bontà del valore scelto per l'inizio della procedura di rigenerazione (Tabella 15). La temperatura dei fumi di uscita dal filtro invece assume valori compresi tra i 220°C e i 240°C (Tabella 16).

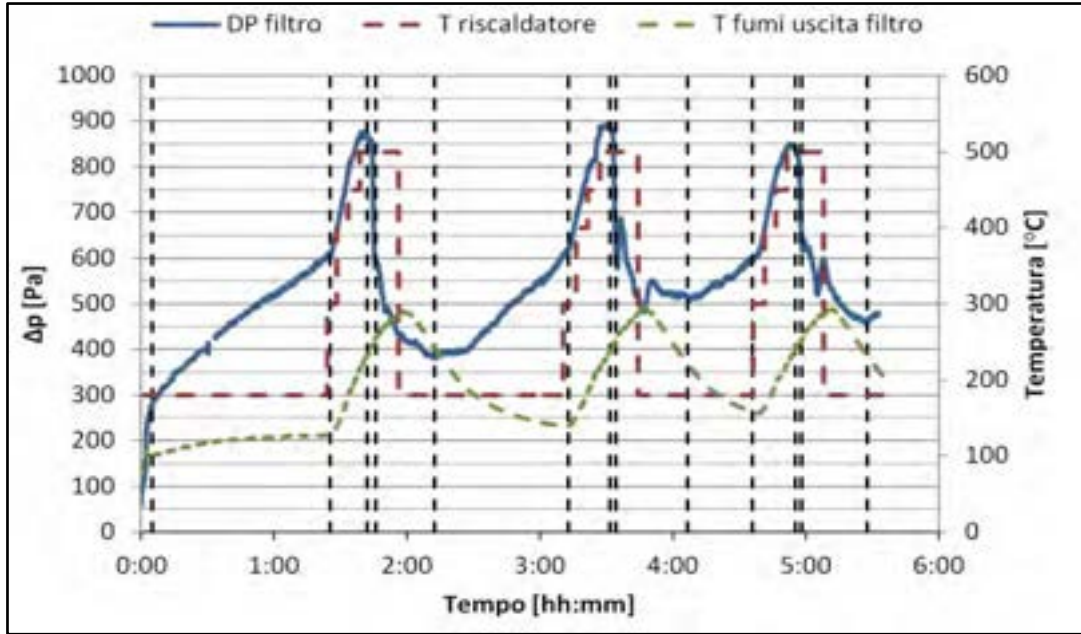


Figura 15. Andamento della caduta di pressione nel filtro nella prova B1

Tabella 13. Tabella riassuntiva della prova B1

Prova B1			
Ora inizio prova [hh:mm]	10:28		
Durata prova [hh:mm:ss]	05:37:59		
Pressione ambiente [mbar]	992,8		
Temperatura ambiente [°C]	24,8		
Parametri	Min	Med	Max
Temperatura dei fumi in canna fumaria [°C]	110,9	124,2	135,4
Temperatura dei fumi all'ingresso filtro [°C]	59,0	105,4	126,2
Temperatura dei fumi in uscita dal filtro [°C]	74,7	190,3	294,9
Temperatura dei fumi in uscita dalla linea di campionamento [°C]	49,7	131,2	216,7
Portata d'acqua in caldaia [l/h]	2500	2533	2572
Temperatura dell'acqua in ingresso alla caldaia [°C]	55,2	62,3	65,6
Temperatura dell'acqua in uscita dalla caldaia [°C]	63,9	70,9	73,5
O <sub>2</sub> a monte del filtro [%]	7,0	8,9	10,6
CO <sub>2</sub> a monte del filtro [%]	10,2	11,3	12,2
CO a monte del filtro [%]	0,04	0,18	0,63
PM a monte del filtro [mg/Nm <sup>3</sup> ]	21,5	61,1	120,6
COT a monte del filtro [mg/Nm <sup>3</sup> ]	3,1	39,0	99,5
O <sub>2</sub> a valle del filtro [%]	11,4	12,6	14,0
CO <sub>2</sub> a valle del filtro [%]	6,8	8,3	9,8
Potenza utile caldaia [kW]	21,3	25,2	31,5
Rendimento medio caldaia [%]	84,8%		
Δp filtro [Pa]	60	541	895

**Tabella 14. Caratteristiche della prima fase di deposizione del particolato nel filtro nella prova B1**

$\Delta P_{\min}$ [Pa]	$\Delta P_{\max}$ [Pa]	$\Delta P$ [ Pa]	Durata [hh:mm]
59	275	215	00:04:54

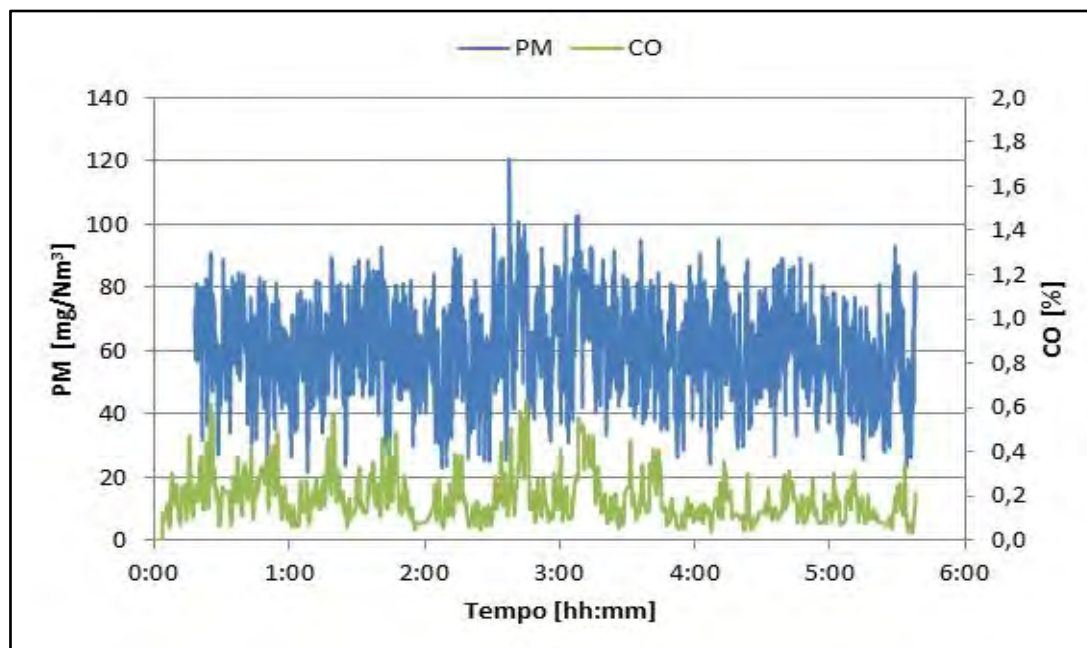
**Tabella 15. Valori per cui si ha il passaggio da un meccanismo misto di depth filtration e cake filtration a un meccanismo prevalente di cake filtration nella prova B1**

Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
605,8	617,7	600,8

**Tabella 16. Temperatura dei fumi in uscita dal filtro all'inizio e alla fine della rigenerazione nella prova B1**

Temperatura fumi in uscita dal filtro [°C]					
Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3	
Inizio rigenerazione	Fine Rigenerazione	Inizio Rigenerazione	Fine Rigenerazione	Inizio Rigenerazione	Fine Rigenerazione
233,5	241,6	238,5	220,5	240,7	231,2

Le emissioni di particolato e di monossido di carbonio sono presentate in Figura 16, da cui si ricava che durante la prova le emissioni medie di CO della caldaia sono state minori rispetto alle prove precedenti. Per quanto riguarda il funzionamento della caldaia si può notare come la potenza subisca una brusca variazione a causa di una regolazione idraulica (Figura 17). Analoga variazione si ha anche per quanto riguarda il rendimento che, mediamente, in questa prova, risulta più basso che nelle prove precedenti.



**Figura 16. Andamento delle emissioni di PM e CO durante la prova B1**

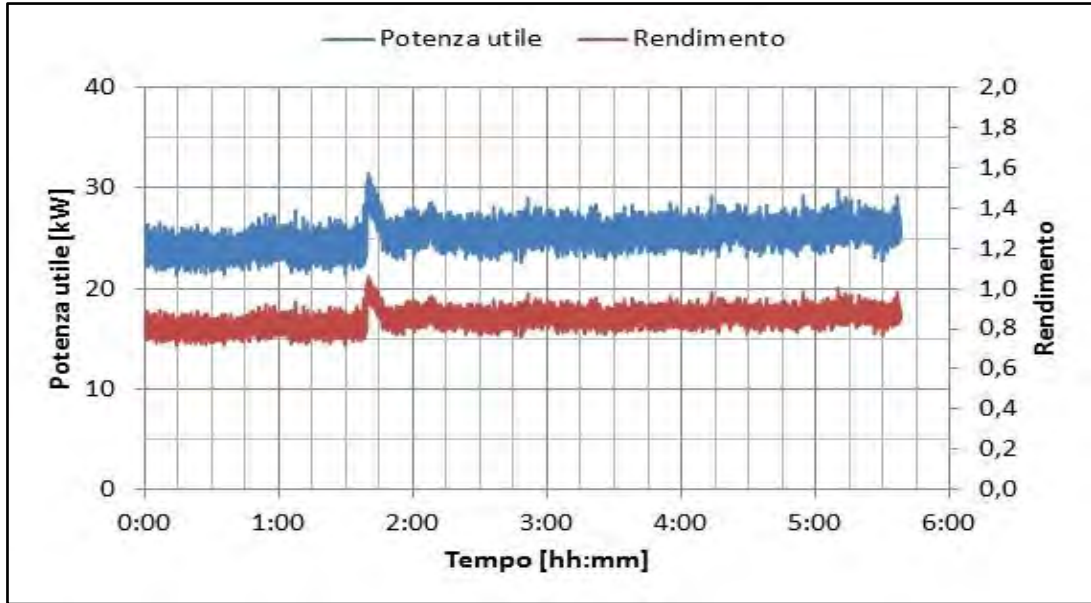
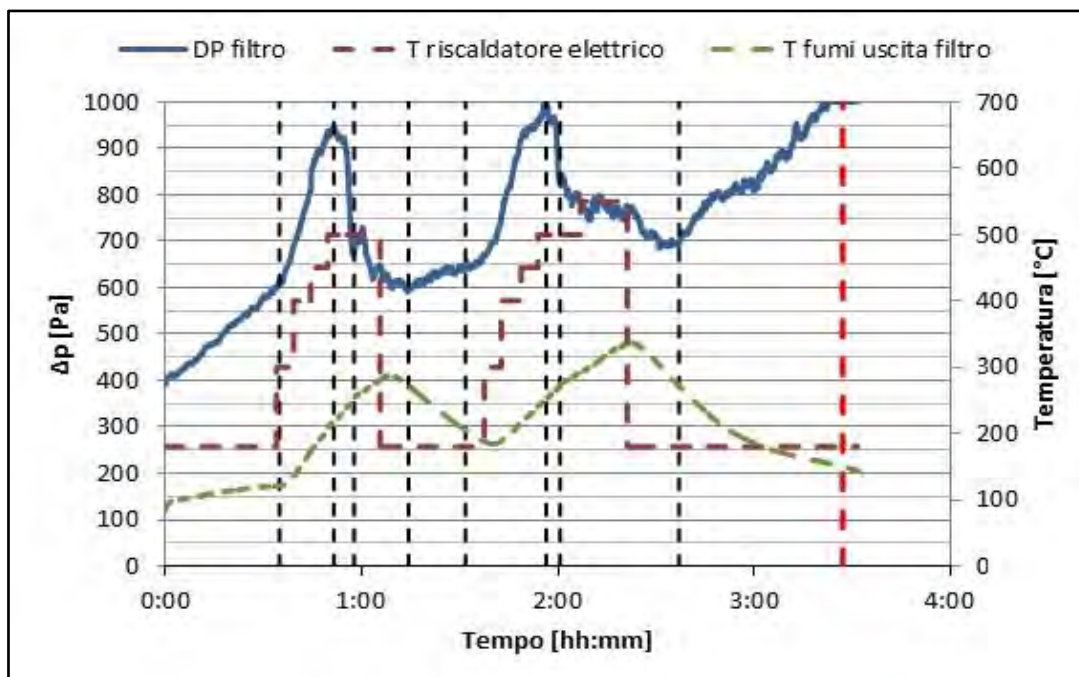


Figura 17. Andamento della potenza e del rendimento durante la prova B1

La seconda prova effettuata sul filtro B il giorno successivo ha avuto lo scopo di studiare il numero di massimo cicli e di fornire un quadro completo del filtro.

Tabella 17. Tabella riassuntiva della prova B2

Prova B2			
Ora inizio prova [hh:mm]	10:28		
Durata prova [hh:mm:ss]	03:31:34		
Pressione ambiente [mbar]	993,6		
Temperatura ambiente [°C]	23,6		
Parametri	Min	Med	Max
Temperatura dei fumi in canna fumaria [°C]	118,0	126,4	134,6
Temperatura dei fumi all'ingresso filtro [°C]	74,0	113,8	133,3
Temperatura dei fumi in uscita dal filtro [°C]	85,5	210,1	337,8
Temperatura dei fumi in uscita dalla linea di campionamento [°C]	106,2	125,1	145,8
Portata d'acqua in caldaia [l/h]	2473	2507	2556
Temperatura dell'acqua in ingresso alla caldaia [°C]	63,0	64,0	65,0
Temperatura dell'acqua in uscita dalla caldaia [°C]	72,4	72,8	73,5
O <sub>2</sub> a monte del filtro [%]	7,2	8,6	10,1
CO <sub>2</sub> a monte del filtro [%]	11,2	11,9	12,4
CO a monte del filtro [%]	0,03	0,21	0,61
PM a monte del filtro [mg/Nm <sup>3</sup> ]	12,4	38,9	92,1
COT a monte del filtro [mg/Nm <sup>3</sup> ]	3,4	44,6	99,5
O <sub>2</sub> a valle del filtro [%]	5,3	7,1	12,2
CO <sub>2</sub> a valle del filtro [%]	11,0	13,5	15,2
Potenza utile caldaia [kW]	22,9	25,7	28,8
Rendimento medio caldaia [%]	86,4%		
Δp filtro [Pa]	392	738	1000



**Figura 18. Andamento della caduta di pressione nel filtro della prova B2.**

La linea tratteggiata rossa indica l'istante in cui la portata della pompa è aumentata a 18 NL/min

In Figura 18 è possibile osservare l'andamento della caduta di pressione durante la prova che ha avuto una durata minore rispetto alle prove precedenti a causa dell'elevato aumento delle perdite di carico, non più recuperate dalle fasi di rigenerazione. Durante l'ultimo ciclo ci si è discostati dalla procedura standard di rigenerazione aumentando la temperatura del riscaldatore elettrico a 550°C per verificare se in presenza di cadute di pressione più elevate un ulteriore aumento di temperatura del riscaldatore potesse portare dei benefici. Tali benefici non si sono riscontrati ed inoltre, alla fine del quinto ciclo, si è deciso di far continuare la crescita della caduta di pressione, come è possibile notare dal raggiungimento del fondo scala dei trasduttori di pressione, e di provare ad un certo punto ad aumentare la portata della pompa a 18 NL/min (come indicato dalla linea rossa in Figura 18) per verificare se una maggior portata favorisse una pulizia del filtro dal particolato depositato, tuttavia con esito negativo.

**Tabella 18. Valori per cui si ha il passaggio da un meccanismo misto di depth filtration e cake filtration a un meccanismo prevalente di cake filtration nella prova B2**

Ciclo 1	Ciclo 2
614,0	646,0

**Tabella 19. Temperatura dei fumi in uscita dal filtro all'inizio e alla fine della rigenerazione nella prova B2**

Temperatura fumi in uscita dal filtro [°C]			
Ciclo 1		Ciclo 2	
Inizio rigenerazione	Fine Rigenerazione	Inizio Rigenerazione	Fine Rigenerazione
218,9	272,5	252,3	271,6

Analizzando i due cicli, che sono rispettivamente il quarto e il quinto per questo filtro, si può osservare come il cambio di pendenza nell'ultimo ciclo avvenga a qualche Pa in più rispetto al precedente, poiché la rigenerazione sembra aver perso di efficacia (Tabella 18). Le temperature dei fumi di inizio/fine rigenerazione sono riportate in Tabella 19.

Le emissioni di PM e CO risultano nella media delle altre prove (Figura 19), mentre si può notare un comportamento abbastanza stabile della potenza termica prodotta dalla caldaia e del rendimento (Figura 20).

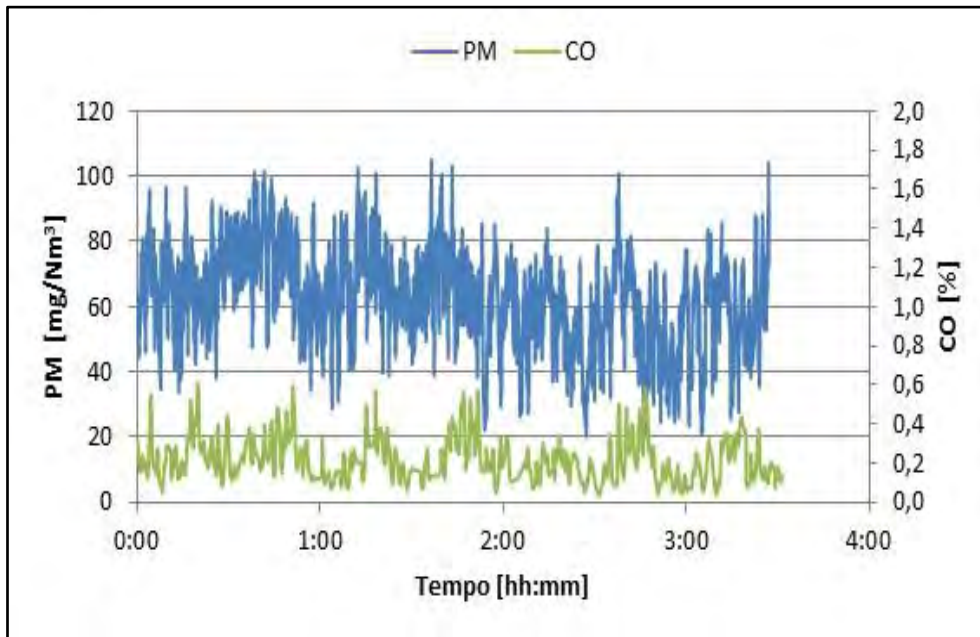


Figura 19. Andamento delle emissioni di PM e CO durante la prova B2

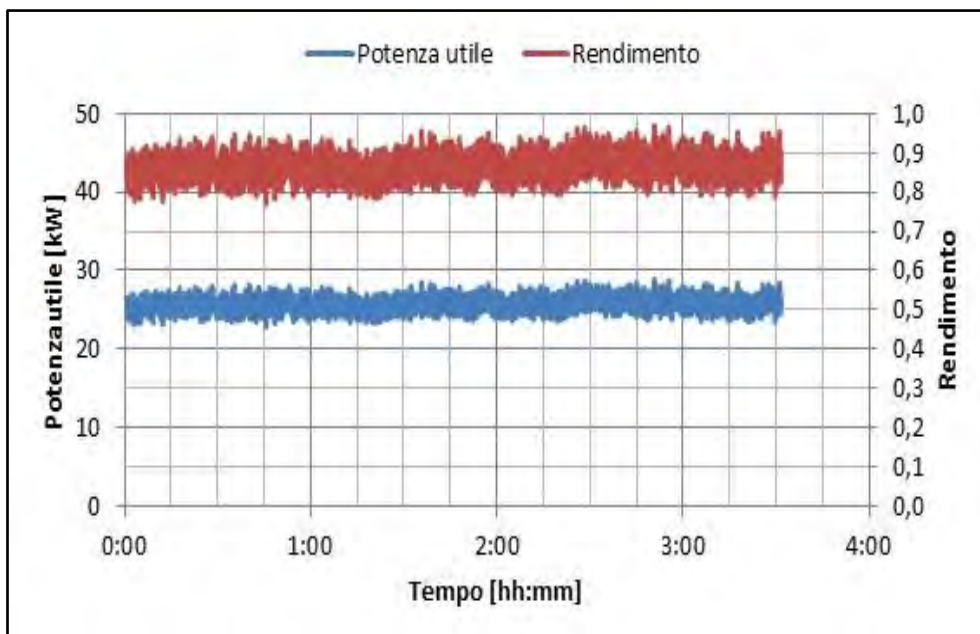


Figura 20. Andamento della potenza e del rendimento durante la prova B2

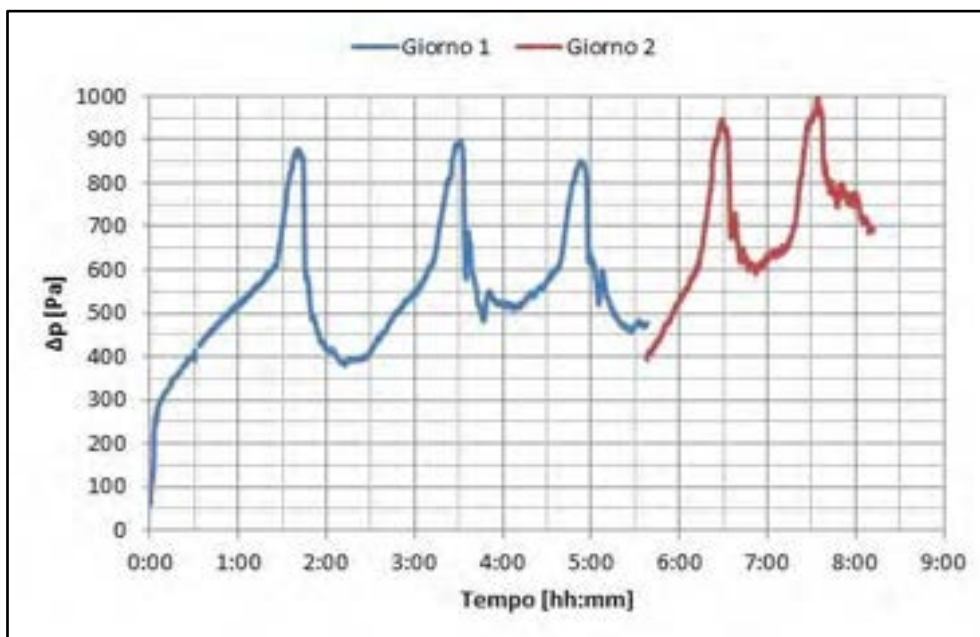


Figura 21. Andamento della caduta di pressione ai capi del filtro di tipo B

In Figura 21 si può osservare il numero di cicli totali compiuti dal filtro analizzato. Data l'uniformità della tecnica di rigenerazione utilizzata fino al quarto ciclo è stato possibile confrontare la durata di ogni ciclo e il tempo percentuale di utilizzo del riscaldatore elettrico. In tal modo si è potuto verificare che la durata dei cicli dopo ogni rigenerazione tende a diminuire, con la conseguenza che i tempi richiesti per la rigenerazione hanno un impatto sempre maggiore sul singolo ciclo operativo (Figura 22).



Figura 22. Confronto tra la durata di ogni ciclo e il tempo percentuale di utilizzo del riscaldatore per la rigenerazione per il filtro tipo B

Infatti come si può notare in Tabella 20, dove sono riportati i dati di tutti i cicli, la durata della fase di normale operatività dei filtri tende a diminuire e ciò è chiaramente legato alla perdita di

efficienza che fa partire il ciclo successivo da un valore di caduta di pressione sempre più elevato.

Confrontando i filtri a porosità diverse, è emerso come il filtro a porosità standard abbia un'efficienza di rigenerazione maggiore rispetto a quello a porosità maggiorata al termine di ogni ciclo di rigenerazione (Figura 23). Inoltre sembrerebbe che il filtro a porosità standard riesca a mantenere un'alta efficienza di rigenerazione fino al secondo ciclo, a differenza del filtro a porosità maggiorata che presenta fin dal secondo ciclo una maggiore perdita di efficienza di rigenerazione.

Se però si analizzano le cadute di pressione alla fine di ogni ciclo nei due filtri si può constatare come il filtro a porosità maggiorata abbia dei valori assoluti di caduta di pressione minori rispetto all'altro filtro (Figura 24).

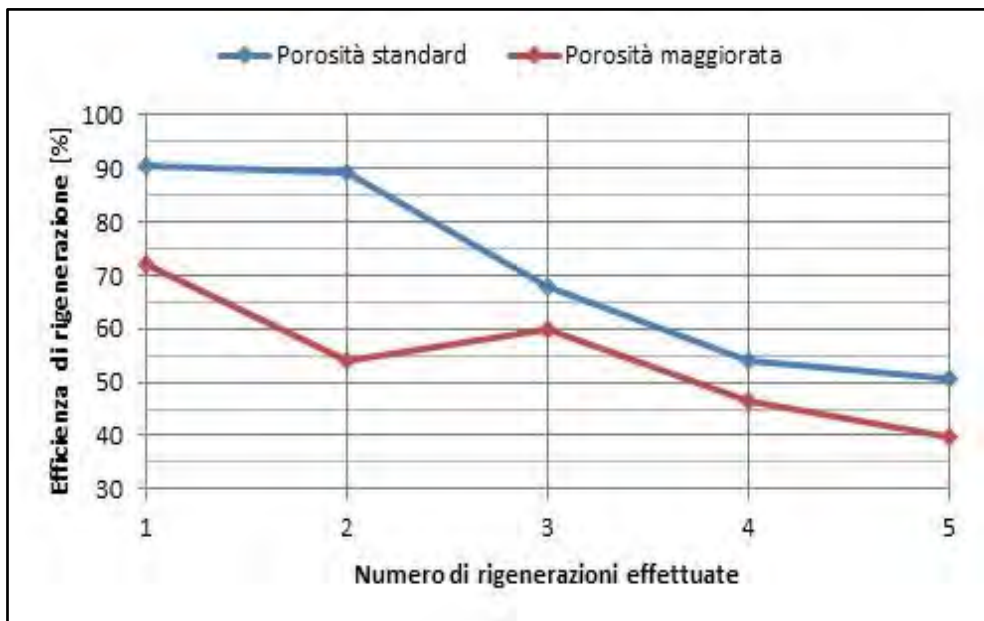
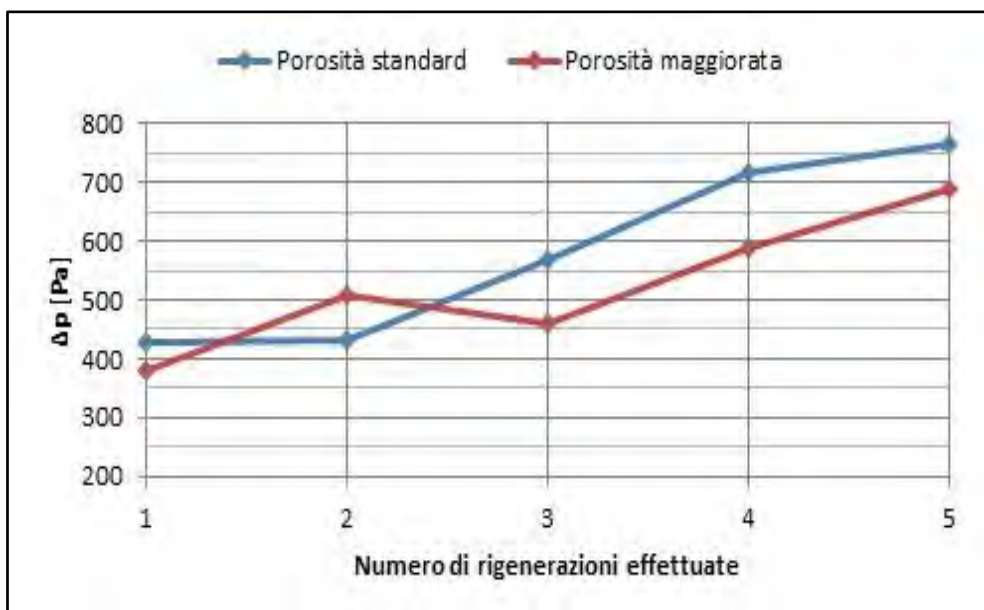


Figura 23. Confronto dell'efficienza di rigenerazione tra i filtri tipo A e B a porosità diverse



**Figura 24. Confronto della caduta di pressione a fine rigenerazione tra i filtri tipo A e B**

**Tabella 20. Analisi dei cicli del filtro tipo B. In verde sono evidenziate le fasi in cui si ha una diminuzione della caduta di pressione, in azzurro le fasi in cui la caduta di pressione aumenta**

	Fase	$\Delta P_{\min}$ [Pa]	$\Delta P_{\max}$ [Pa]	$\Delta P$ [Pa]	Durata fase [hh:mm]	Coefficiente lineare [Pa/s]	Durata Totale [hh:mm]	Durata ciclo [hh:mm]	Efficienza di rigenerazione [%]	Tempo di utilizzo del riscaldatore elettrico [%]
Ciclo 1	1	275	606	330	1:20	0,06	1:42	2:12	72%	28%
	2	607	868	261	0:16	0,30				
	3	579	868	289	0:03	-1,43	0:30			
	4	381	580	199	0:26	-0,06				
Ciclo 2	1	381	618	237	1:00	0,08	1:19	1:54	54%	31%
	2	616	895	279	0:18	0,24				
	3	596	895	300	0:02	-1,96	0:35			
	4	509	592	83	0:32	-0,05				
Ciclo 3	1	509	600	92	0:29	0,05	0:48	1:20	60%	38%
	2	601	841	240	0:19	0,31				
	3	645	841	197	0:02	-0,27	0:32			
	4	460	642	182	0:29	-0,10				
Ciclo 4	1	392	614	222	0:34	0,06	0:51	1:14	47%	48%
	2	614	946	333	0:16	0,30				
	3	673	945	273	0:06	-1,43	0:22			
	4	590	673	83	0:16	-0,06				
Ciclo 5	1	592	646	54	0:17	0,08	0:42	1:22	40%	58%
	2	648	1000	352	0:24	0,24				
	3	820	1000	180	0:04	-1,96	0:40			
	4	691	820	129	0:36	-0,05				

### 2.4.3 Prove filtro porosità maggiorata e lunghezza 60 mm

Con l'obiettivo di valutare l'influenza della lunghezza del filtro sulle prestazioni di filtrazione e sulla rigenerazione si è testato un filtro di lunghezza minore (60 mm).

Lo scopo della prima giornata di prova è stato di testare il campione C nelle stesse condizioni di prova dei precedenti filtri a lunghezza maggiore. Per questo motivo la portata impostata nella pompa a valle della linea di aspirazione pari a 5,6 NL/min, per un totale di 7,6 NL/min di fumi che fluiscono nel filtro e la tecnica di rigenerazione utilizzata nell'impostare il riscaldatore elettrico è stata la stessa utilizzata nelle prove precedenti.

**Tabella 21. Tabella riassuntiva della prova C1**

Prova C1			
Ora inizio prova [hh:mm]	10:28		
Durata prova [hh:mm:ss]	05:35:43		
Pressione ambiente [mbar]	984,2		
Temperatura ambiente [°C]	24,0		
<b>Parametri</b>	<b>Min</b>	<b>Med</b>	<b>Max</b>
Temperatura dei fumi in canna fumaria [°C]	115,6	126,5	134,6
Temperatura dei fumi all'ingresso filtro [°C]	84,8	118,4	137,3
Temperatura dei fumi in uscita dal filtro [°C]	132,4	187,2	312,4
Temperatura dei fumi in uscita dalla linea di campionamento [°C]	54,9	111,9	126,1
Portata d'acqua in caldaia [l/h]	2209	2519	2560
Temperatura dell'acqua in ingresso alla caldaia [°C]	57,5	63,5	65,1
Temperatura dell'acqua in uscita dalla caldaia [°C]	66,2	72,1	73,5
O <sub>2</sub> a monte del filtro [%]	7,2	8,7	10,4
CO <sub>2</sub> a monte del filtro [%]	11,0	11,6	12,1
CO a monte del filtro [%]	0,04	0,28	0,95
COT a monte del filtro [mg/Nm <sup>3</sup> ]	5,0	52,4	99,5
O <sub>2</sub> a valle del filtro [%]	5,3	6,6	8,3
CO <sub>2</sub> a valle del filtro [%]	12,1	13,6	14,8
Potenza utile caldaia [kW]	20,0	25,4	29,5
Rendimento medio caldaia [%]	85,3%		
Δp filtro [Pa]	143	527	1000

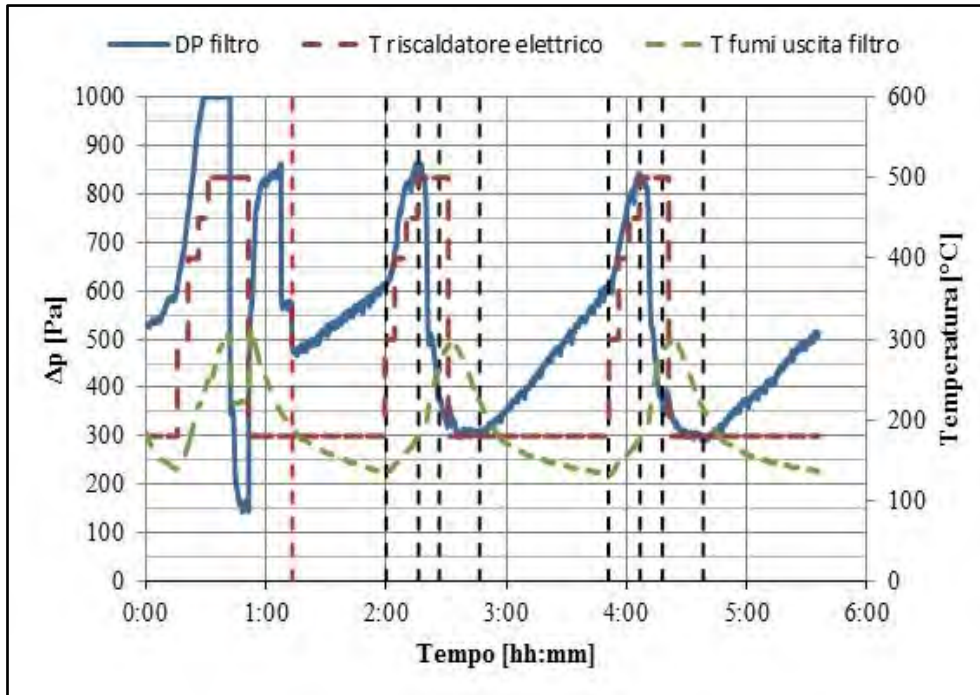


Figura 25. Andamento della caduta di pressione nel filtro nella prova C1.

La linea rossa indica il momento in cui è stata abbassata la portata di aspirazione della pompa

In Figura 25 è mostrato l'andamento della caduta di pressione durante la prova. Le cadute di pressione iniziali sono più marcate che nelle prove con i due precedenti tipi di filtro. Ne consegue che la rigenerazione è ostacolata. Riducendo la portata dei fumi a 2 NL/min, la rigenerazione viene favorita e la perdita di carico nel filtro si riduce drasticamente.

Sulla base di questa esperienza si è deciso di verificare un eventuale legame tra la rigenerazione del filtro e la portata dei fumi come già evidenziato da altri studi (V. Palma, 2013). Si è quindi deciso di impostare dall'istante 01:13 una portata minore della pompa (2 NL/min) per avere una portata di fumi minore rispetto a prima, pari a circa la metà (4 NL/min). La minore quantità di particolato che impatta il filtro permette una aumento della caduta di pressione più graduale. Con una portata di 4 NL/min la rigenerazione avviene senza problemi e l'andamento della caduta di pressione è paragonabile a quello dei filtri della lunghezza di 125 mm. Si rileva, poi, che, a causa della minore portata e della minore quantità di particolato, la caduta di pressione massima e minima di ogni ciclo risulta più bassa rispetto ai filtri con una lunghezza di 125 mm. Inoltre, il filtro sembra non perdere di efficienza di rigenerazione ed infatti si raggiungono pressoché gli stessi valori nei due cicli con portata dei fumi pari a 4NL/min. Ciò è dovuto sia alla minore portata di particolato che impatta il filtro, sia anche al minore effetto di quenching legato alla minore portata che fluisce nel filtro. Tale effetto è riscontrabile anche nell'andamento della temperatura dei fumi in uscita dal filtro, che ad inizio rigenerazione subisce un brusco incremento dovuto probabilmente anche al calore prodotto dalle reazioni esotermiche durante la rigenerazione (Figura 26).

La durata dei due cicli è molto simile fra loro e il riscaldatore viene tenuto acceso in fase di rigenerazione per un tempo percentuale intorno al 30% (Tabella 22).

La temperatura dei fumi in uscita dal filtro a inizio della rigenerazione è inferiore rispetto ai filtri precedenti, data la minore lunghezza del filtro. Il cambio di pendenza è invece simile essendo sempre intono ai 600 Pa (Figura 26).

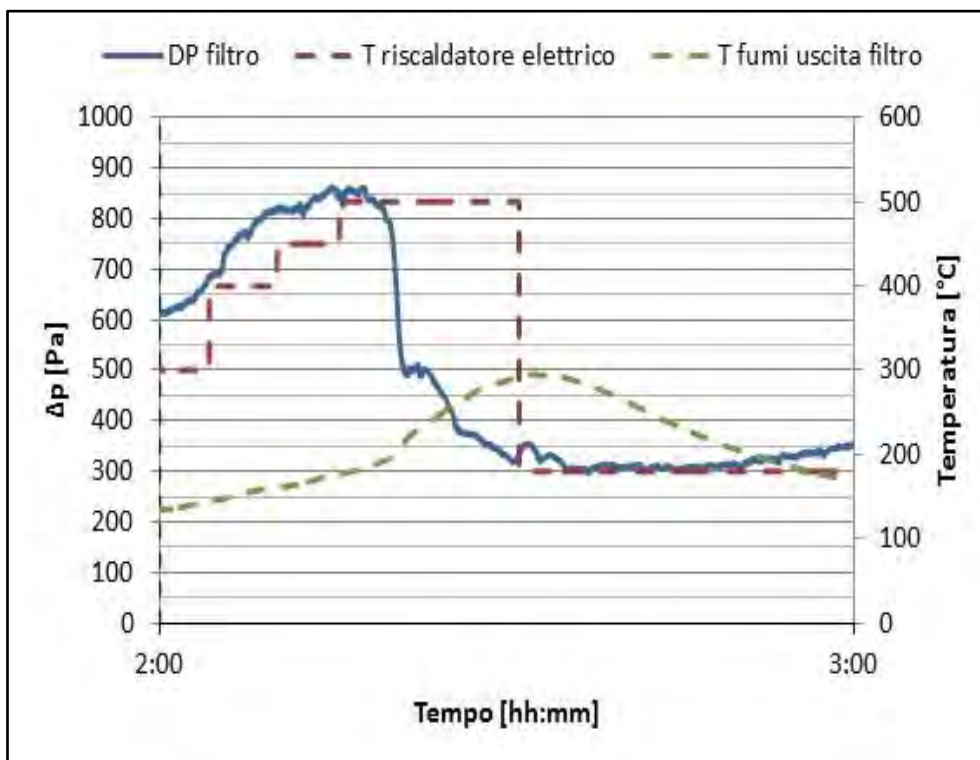


Figura 26. Particolare della prima rigenerazione nella prova C1

Tabella 22. Temperatura dei fumi in uscita dal filtro all'inizio e alla fine della rigenerazione nella prova C1

Temperatura fumi in uscita dal filtro [°C]			
Ciclo 1		Ciclo 2	
Inizio rigenerazione	Fine Rigenerazione	Inizio Rigenerazione	Fine Rigenerazione
178,3	222,8	177,0	214,2

Tabella 23. Valori per cui si ha il passaggio da un meccanismo misto di depth filtration e cake filtration a un meccanismo prevalente di cake filtration nella prova C1

Ciclo 1	Ciclo 2
609,8	609,3

L'obiettivo della seconda giornata di test sul filtro C è di verificare ulteriormente il filtro con la portata di 4 NL/min e l'efficienza di rigenerazione all'aumentare dei cicli di funzionamento.

Tabella 24: Analisi dei cicli della prova C1

	Fase	$\Delta P_{\min}$ [Pa]	$\Delta P_{\max}$ [Pa]	Durata fase [hh:mm]	Coefficiente lineare [Pa/s]	Durata Totale [hh:mm]	Durata ciclo [hh:mm]	Tempo di utilizzo del riscaldatore elettrico [%]
Ciclo 1	1	488	610	0:46	0,06	1:08	1:38	32%
	2	610	856	0:16	0,30			
	3	375	856	0:10	-1,43	0:30		
	4	304	375	0:20	-0,06			
Ciclo 2	1	304	609	1:04	0,08	1:20	1:51	27%
	2	610	837	0:15	0,24			
	3	366	838	0:11	-1,96	0:31		
	4	292	364	0:20	-0,05			

**Tabella 25. Tabella riassuntiva della prova C2**

Prova C2			
Orario inizio prova [hh:mm]	10:28		
Durata prova [hh:mm:ss]	06:14:12		
Pressione ambiente [mbar]	987,8		
Temperatura ambiente [°C]	23,0		
Parametri	Min	Med	Max
Temperatura dei fumi in canna fumaria [°C]	116,8	135,6	299,6
Temperatura dei fumi all'ingresso filtro [°C]	42,5	115,6	139,9
Temperatura dei fumi in uscita dal filtro [°C]	34,8	168,0	293,9
Temperatura dei fumi in uscita dalla linea di campionamento [°C]	110,0	116,6	129,0
Portata d'acqua in caldaia [L/h]	2191	2399	2700
Temperatura dell'acqua in ingresso alla caldaia [°C]	58,9	63,3	65,6
Temperatura dell'acqua in uscita dalla caldaia [°C]	68,4	72,5	73,2
O <sub>2</sub> a monte del filtro [%]	6,8	8,5	10,1
CO <sub>2</sub> a monte del filtro [%]	10,8	11,7	12,2
CO a monte del filtro [%]	0,01	0,25	0,80
PM a monte del filtro [mg/Nm <sup>3</sup> ]	12,4	38,9	92,1
COT a monte del filtro [mg/Nm <sup>3</sup> ]	3,8	45,6	99,5
O <sub>2</sub> a valle del filtro [%]	5,3	6,9	17,3
CO <sub>2</sub> a valle del filtro [%]	5,1	13,3	14,7
Potenza utile caldaia [kW]	21,2	25,3	29,2
Rendimento medio caldaia [%]	85,2%		
Δp filtro [Pa]	290	470	814

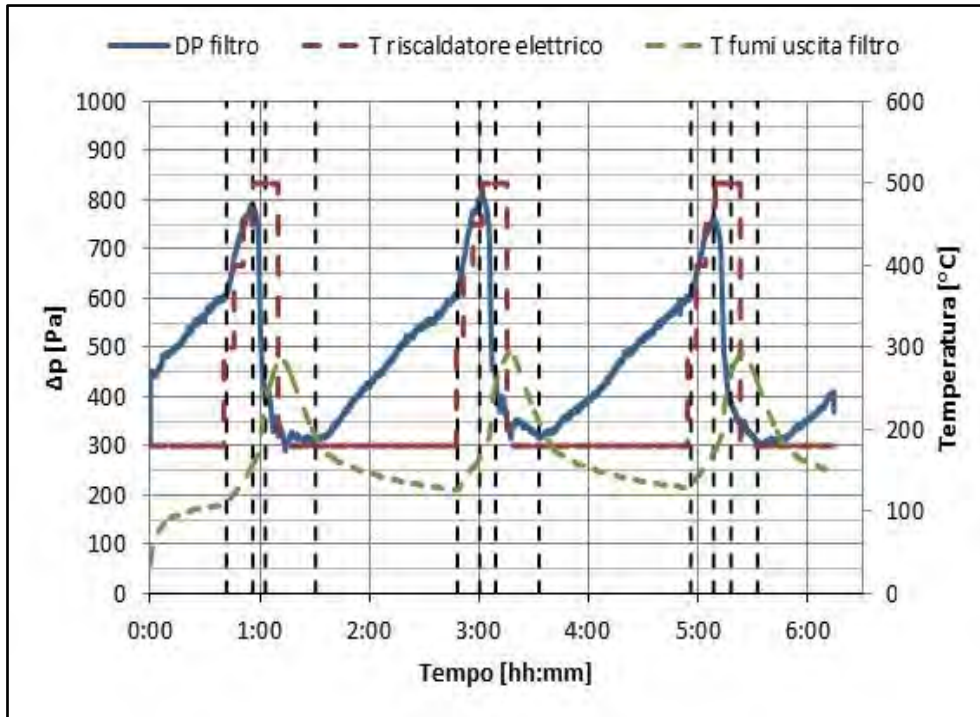


Figura 27. Andamento della caduta di pressione nel filtro nella prova C2

La prova ha avuto una durata di circa sei ore e sono stati registrati tre cicli completi compiuti dalla caduta di pressione. È possibile osservare in Figura 27 una più marcata variazione di pendenza dalla depth alla cake filtration. La caduta di pressione al termine di ogni ciclo è intorno ai 300 Pa. Nella seconda fase, in cui sia ha una diminuzione della caduta di pressione più graduale, la durata della rigenerazione è molto breve con valori di caduta di pressione alla fine di ogni ciclo abbastanza simili (300 Pa), Tabella 26.

Analogamente ai casi precedenti, la pendenza della curva delle perdite di carico durante la fase di occlusione del filtro cambia per valori intorno ai 600 Pa (Tabella 27).

Le temperature di uscita dei fumi all'inizio della rigenerazione sono simili alla prova precedente, mentre le temperature al termine della rigenerazione sono un po' diverse. È possibile comunque notare il brusco incremento della temperatura dei fumi in uscita dal filtro come nella prova precedente.

Si ricava quindi da un punto di vista quantitativo che la minore portata dei fumi, e quindi di particolato, comporti un evidente miglioramento delle prestazioni del filtro per quanto riguarda la rigenerazione.

**Tabella 26. Analisi dei cicli della prova C2**

	Fase	$\Delta P_{\min}$ [Pa]	$\Delta P_{\max}$ [Pa]	Durata fase [hh:mm]	Coefficiente lineare [Pa/s]	Durata Totale [hh:mm]	Durata ciclo [hh:mm]	Tempo di utilizzo del riscaldatore elettrico [%]
Ciclo 1	1	306	605	0:41	0,07	0:56	1:30	42%
	2	605	791	0:14	0,22			
	3	388	792	0:06	-1,19	0:34		
	4	309	386	0:27	0,00			
Ciclo 2	1	310	602	1:17	0,07	1:29	2:02	23%
	2	602	803	0:12	0,27			
	3	446	804	0:08	-0,88	0:32		
	4	319	446	0:23	-0,05			
Ciclo 3	1	319	604	1:23	0,06	1:35	1:59	23%
	2	605	764	0:12	0,23			
	3	388	765	0:09	-0,86	0:24		
	4	307	387	0:14	-0,08			

**Tabella 27. Valori per cui si ha il passaggio da un meccanismo misto di depth filtration e cake filtration a un meccanismo prevalente di cake filtration nella prova C2**

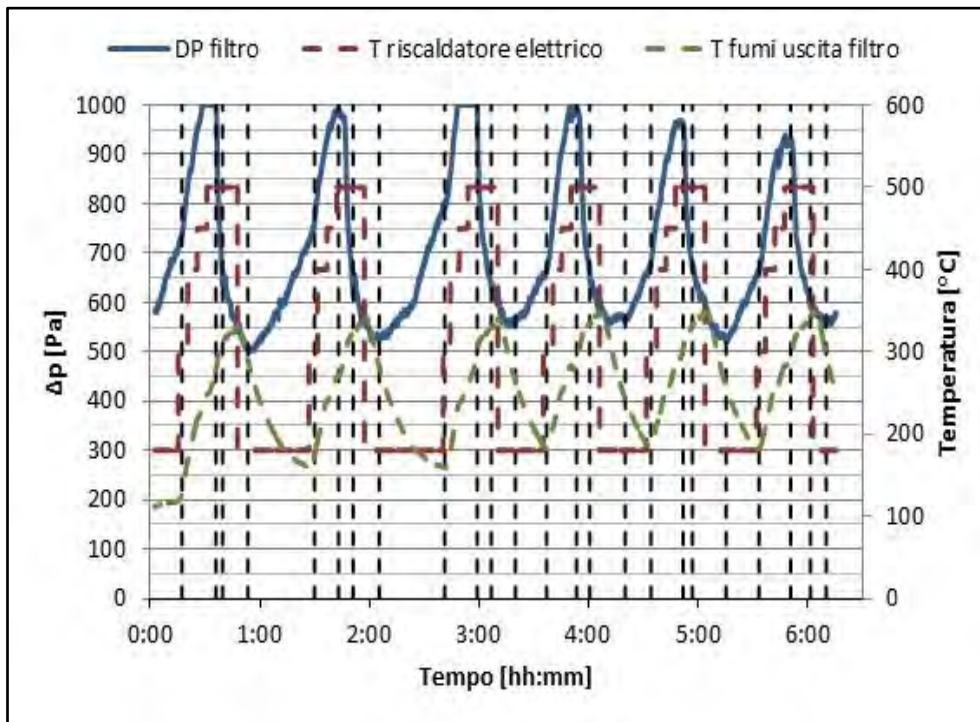
Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
604,9	602,2	605,0

**Tabella 28. Temperatura dei fumi in uscita dal filtro all'inizio e alla fine della rigenerazione nella prova C2**

Temperatura fumi in uscita dal filtro [°C]					
Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3	
Inizio rigenerazione	Fine Rigenerazione	Inizio Rigenerazione	Fine Rigenerazione	Inizio Rigenerazione	Fine Rigenerazione
157.3	192.0	166.2	209.1	171.7	257.5

**Tabella 29. Tabella riassuntiva della prova C3**

Prova C3			
Ora inizio prova [hh:mm]	10:28		
Durata prova [hh:mm:ss]	06:18:04		
Pressione ambiente [mbar]	987,8		
Temperatura ambiente [°C]	21,3		
Parametri	Min	Med	Max
Temperatura dei fumi in canna fumaria [°C]	41,1	119,8	132,6
Temperatura dei fumi all'ingresso filtro [°C]	97,4	142,2	155,7
Temperatura dei fumi in uscita dal filtro [°C]	111,3	249,8	349,6
Temperatura dei fumi in uscita dalla linea di campionamento [°C]	106,2	113,2	119,2
Portata d'acqua in caldaia [l/h]	1789	2244	2300
Temperatura dell'acqua in ingresso alla caldaia [°C]	55,1	62,1	63,8
Temperatura dell'acqua in uscita dalla caldaia [°C]	64,7	71,7	72,9
O <sub>2</sub> a monte del filtro [%]	6,5	8,2	10,1
CO <sub>2</sub> a monte del filtro [%]	11,3	11,9	12,6
CO a monte del filtro [%]	0,04	0,29	0,84
PM a monte del filtro [mg/Nm <sup>3</sup> ]	21,2	60,3	120,7
COT a monte del filtro [mg/Nm <sup>3</sup> ]	4,7	49,7	99,5
O <sub>2</sub> a valle del filtro [%]	5,4	6,8	9,0
CO <sub>2</sub> a valle del filtro [%]	14,4	14,9	15,7
Potenza utile caldaia [kW]	19,5	25,1	28,5
Rendimento medio caldaia [%]	84,4%		
Δp filtro [Pa]	500	700	1000



**Figura 28. Andamento della caduta di pressione nel filtro e nella prova C3**

Lo scopo della terza prova sul filtro C è di testare il filtro con una portata maggiore di fumi (6 NL/min) per verificare la rigenerazione e la dinamica di funzionamento del filtro in tali condizioni.

Come è possibile notare in Figura 28 durante questa prova sono osservabili sei cicli completi del filtro. Rispetto alla prova precedente si può osservare come l'aumento della portata che fluisce nel filtro comporti un aumento più repentino della caduta di pressione, soprattutto nella prima fase di occlusione dove si registra una pendenza maggiore della curva ma a differenza della prova precedente il cambio di pendenza della curva non è così marcato. Ciò quindi comporta una riduzione della durata di ogni ciclo che, mediamente, in questa prova dura un'ora.

Per quanto detto prima aumenta anche la durata percentuale dell'utilizzo del riscaldatore elettrico per la rigenerazione che viene utilizzato per circa metà del tempo di ogni ciclo in questa modalità. Il filtro però mantiene una buona efficienza di rigenerazione per ogni ciclo: i valori di caduta di pressione alla fine di ogni rigenerazione sono sempre compresi tra i 500 e i 550 Pa. Da questo punto di vista il filtro lungo 60 mm sembra comportarsi come nella prova precedente, anche se chiaramente il valore di caduta di pressione risulta più alto a causa della maggiore portata impostata.

La rigenerazione in questa prova, come si può notare anche dalle alte temperature raggiunte dai fumi in uscita dal filtro, è ostacolata dall'effetto di quenching dovuto alla portata più alta che investe il filtro. Rispetto alle prove precedenti è presente un aumento della temperatura dei fumi in uscita dal filtro all'inizio e alla fine della rigenerazione, con temperature che superano i 300°C (Tabella 31).

Come era presumibile, all'aumento della portata corrispondono valori maggiori di caduta di pressione a cui si ha il passaggio da depth a cake filtration (Tabella 32).

Tabella 30. Analisi dei cicli del filtro della prova C3

	Fase	$\Delta P_{\min}$ [Pa]	$\Delta P_{\max}$ [Pa]	Durata fase [hh:mm]	Coefficiente lineare [Pa/s]	Durata Totale [hh:mm]	Durata ciclo [hh:mm]	Tempo di utilizzo del riscaldatore elettrico [%]
Ciclo 1	1	584	735	0:14	0,18	0:38	0:55	69%
	2	734	1000	0:18	0,24			
	3	636	1000	0:03	-1,66	0:17		
	4	509	635	0:13	-0,18			
Ciclo 2	1	510	760	0:36	0,12	0:49	1:11	45%
	2	759	994	0:13	0,28			
	3	616	994	0:07	-0,92	0:22		
	4	526	615	0:14	-0,14			
Ciclo 3	1	522	798	0:35	0,13	0:53	1:14	41%
	2	795	1000	0:17	0,19			
	3	633	1000	0:07	-0,59	0:20		
	4	554	631	0:13	-0,11			
Ciclo 4	1	555	660	0:17	0,11	0:33	1:00	55%
	2	661	993	0:16	0,37			
	3	653	993	0:07	-0,95	0:26		
	4	561	650	0:19	-0,06			
Ciclo 5	1	560	678	0:14	0,14	0:31	0:55	56%
	2	680	964	0:17	0,28			
	3	670	964	0:05	-1,03	0:23		
	4	522	670	0:18	-0,13			
Ciclo 6	1	522	654	0:18	0,14	0:35	0:53	52%
	2	655	935	0:17	0,27			
	3	590	933	0:10	-0,52	0:18		
	4	552	590	0:07	-0,10			

**Tabella 31. Temperatura dei fumi in uscita dal filtro all'inizio e alla fine della rigenerazione nella prova C3**

Temperatura fumi in uscita dal filtro [°C]					
Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3	
Inizio rigenerazione	Fine Rigenerazione	Inizio Rigenerazione	Fine Rigenerazione	Inizio Rigenerazione	Fine Rigenerazione
277,0	290,0	270,8	282,2	298,3	263,9
Ciclo 4		Ciclo 5		Ciclo 6	
Inizio rigenerazione	Fine Rigenerazione	Inizio Rigenerazione	Fine Rigenerazione	Inizio Rigenerazione	Fine Rigenerazione
288,4	242,3	302,3	257,7	294,0	310,6

**Tabella 32: Valori per cui si ha il passaggio da un meccanismo misto di depth filtration e cake filtration a un meccanismo prevalente di cake filtration nella prova C3**

Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
735,0	760,2	794,8
Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6
660,6	680,0	655,0

#### 2.4.4 Secondo set di prove filtro porosità maggiorata e lunghezza 125 mm

Al fine di avere un confronto sperimentale tra due filtri con le stesse caratteristiche, si è testato un secondo filtro a porosità maggiorata e lunghezza 125 mm (filtro D) e le relative prove sono durate due giorni. I dati acquisiti sono serviti per un confronto con il filtro già misurato e per verificare la ripetibilità delle prove, durante le quali, peraltro, è stato possibile misurare anche il consumo elettrico del riscaldatore a fascia ceramica durante la fase di rigenerazione.

**Tabella 33. Tabella riassuntiva della prova D1**

Prova D1			
Ora inizio prova [hh:mm]	10:28		
Durata prova [hh:mm:ss]	07:35:00		
Pressione ambiente [mbar]	986,0		
Temperatura ambiente [°C]	22,3		
Parametri	Min	Med	Max
Temperatura dei fumi in canna fumaria [°C]	110,1	127,3	139,3
Temperatura dei fumi all'ingresso filtro [°C]	85,8	129,5	150,3
Temperatura dei fumi in uscita dal filtro [°C]	63,7	212,8	315,6
Temperatura dei fumi in uscita dalla linea di campionamento [°C]	103,1	126,4	175,1
Portata d'acqua in caldaia [l/h]	1847	2360	2447
Temperatura dell'acqua in ingresso alla caldaia [°C]	46,9	60,0	66,0
Temperatura dell'acqua in uscita dalla caldaia [°C]	55,8	69,2	74,8
O <sub>2</sub> a monte del filtro [%]	6,6	8,3	10,2
CO <sub>2</sub> a monte del filtro [%]	11,0	12,1	13,0
CO a monte del filtro [%]	0,04	0,24	0,87
PM a monte del filtro [mg/Nm <sup>3</sup> ]	25,2	74,9	124,0
COT a monte del filtro [mg/Nm <sup>3</sup> ]	3,4	31,3	99,5
O <sub>2</sub> a valle del filtro [%]	6,4	7,8	9,4
CO <sub>2</sub> a valle del filtro [%]	10,7	12,1	13,4
Potenza utile caldaia [kW]	20,1	25,2	32,6
Rendimento medio caldaia [%]	84,9%		

$\Delta p$ filtro [Pa]	22	587	915
------------------------	----	-----	-----

Lo scopo della prova nella prima giornata è di comprendere se la perdita di efficienza degli ultimi cicli fosse legata anche al fatto che detti cicli erano stati provati in giorni diversi rispetto ai precedenti. Per questa ragione che la prova ha avuto una durata maggiore rispetto alle prove precedenti (7 ore e 35 minuti).

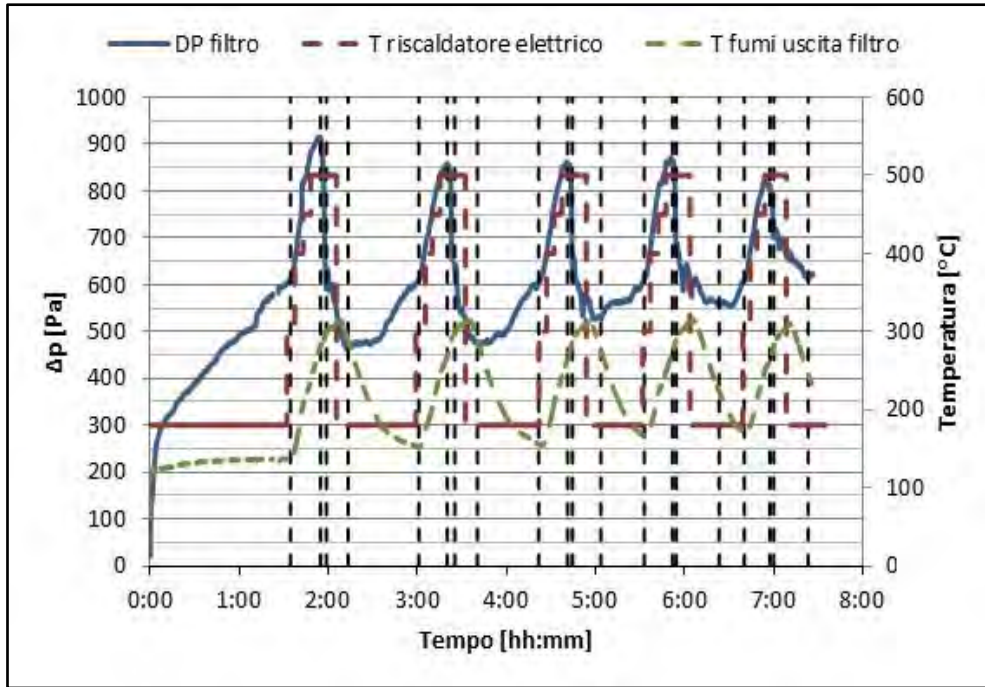


Figura 29. Andamento della caduta di pressione nel filtro nella prova D1

Durante la prova sono stati effettuati cinque cicli di rigenerazione. Come è possibile osservare in Figura 29, analogamente agli altri filtri testati, si è verificata una graduale perdita dell'efficienza di rigenerazione. Inoltre, si nota come nei primi minuti la fase di occlusione del filtro (Tabella 34) sia molto simile al prototipo dello stesso tipo testato in precedenza.

La temperature dei fumi in uscita dal filtro sono come nelle prove precedenti molto simili fra di loro (

Tabella 35) ed i valori maggiori registrati durante la prova sono legati a una variante nella linea, infatti nelle prove effettuate sul filtro precedente la parte inferiore della linea era coibentata, mentre in questa prova è stata utilizzata una fascia scaldante per un miglior controllo della temperatura della parte inferiore della linea.

Il cambio di pendenza della caratteristica avviene sempre per valori intorno i 600-610 Pa (Tabella 36), come nel filtro testato in precedenza.

**Tabella 34. Caratteristiche della prima fase di deposizione del particolato nel filtro nella prova D1**

$\Delta P_{\min}$ [Pa]	$\Delta P_{\max}$ [Pa]	$\Delta P$ [Pa]	Durata [hh:mm]
22	277	255	0:05

**Tabella 35. Temperatura dei fumi in uscita dal filtro all'inizio e alla fine della rigenerazione nella prova D1**

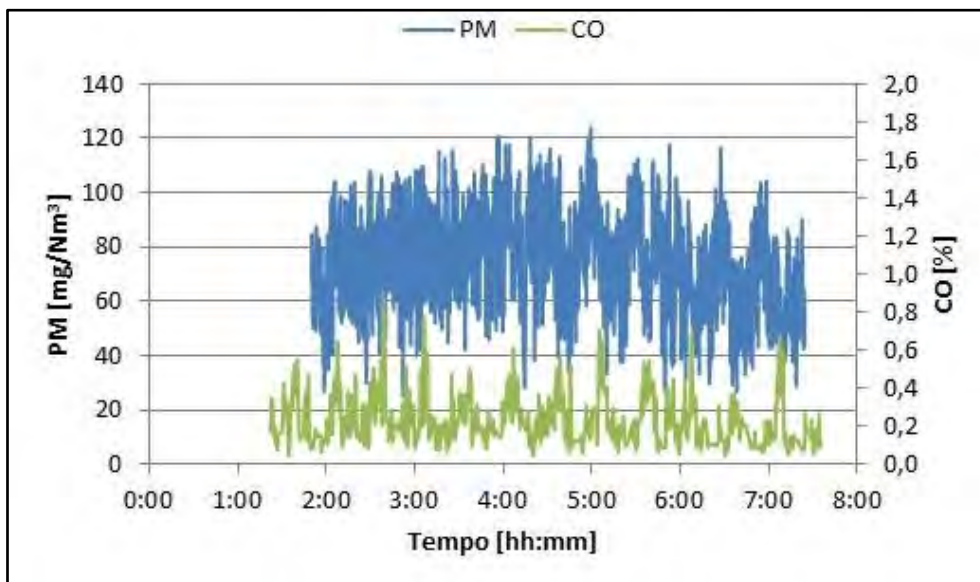
Temperatura fumi in uscita dal filtro [°C]					
Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3	
Inizio rigenerazione	Fine Rigenerazione	Inizio Rigenerazione	Fine Rigenerazione	Inizio Rigenerazione	Fine Rigenerazione
279,0	289,1	268,7	289,1	264,6	276,0
Ciclo 4		Ciclo 5			
Inizio rigenerazione	Fine Rigenerazione	Inizio Rigenerazione	Fine Rigenerazione		
271,8	223,1	263,7	245,1		

**Tabella 36. Valori per cui si ha il passaggio da un meccanismo misto di depth filtration e cake filtration a un meccanismo prevalente di cake filtration nella prova D1**

Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3
596,1	607,6	603,7
Ciclo 4	Ciclo 5	
610,5	608,8	

Nel corso della prova svolta è stato possibile registrare il consumo di energia elettrica assorbito dal riscaldatore durante la fase di rigenerazione, grazie a un apposito conta energia installato a monte dell'alimentazione elettrica. L'energia mediamente assorbita ad ogni ciclo di rigenerazione, della durata di circa trenta minuti, è pari a 0,3 kWh, per un totale di 1,5 kWh consumati nell'arco della giornata di prove.

Per quanto riguarda le emissioni è possibile osservare in Figura 30 l'andamento delle concentrazioni di particolato e di CO nei fumi e si può notare come la concentrazione media di PM è la più alta registrata nelle prove svolte. In Figura 31 sono altresì riportate le concentrazioni di anidride carbonica nei fumi a monte e a valle del filtro.



**Figura 30. Andamento delle emissioni di PM e CO durante la prova D1**

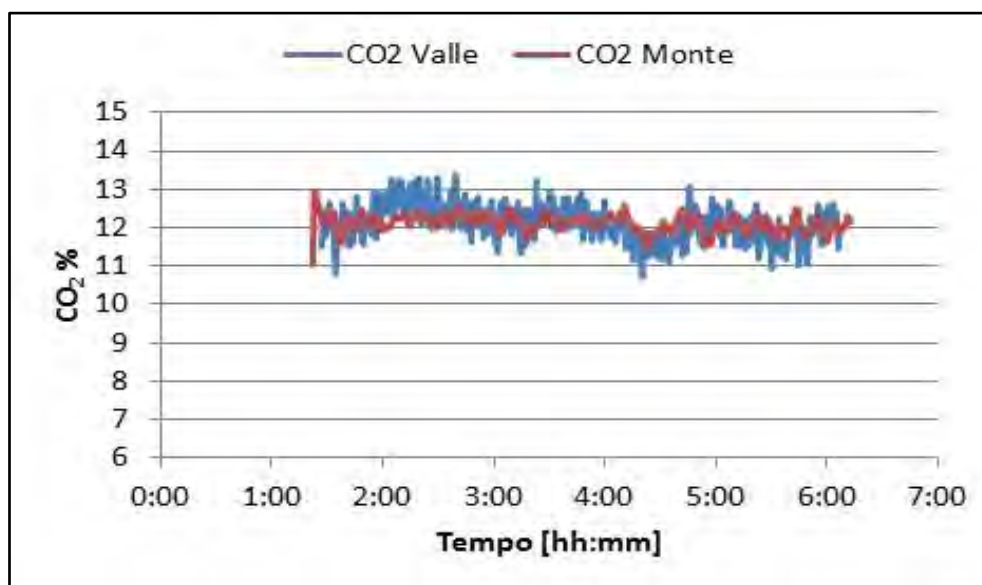


Figura 31. Andamento delle emissioni di CO<sub>2</sub> durante la prova D1

Durante la seconda prova sul filtro D, si è voluto verificare la prestazione di un sesto ciclo e l'effetto sulla rigenerazione di una portata minore di fumi. Purtroppo in questa prova, per problemi tecnici legati alla sonda di prelievo fumi, non è stato possibile effettuare affidabili misure degli inquinanti gassosi a monte del filtro.

Tabella 37. Tabella riassuntiva della prova D2

Prova D2			
Ora inizio prova [hh:mm]	10:28		
Durata prova [hh:mm:ss]	04:50:11		
Pressione ambiente [mbar]	984,6		
Temperatura ambiente [°C]	20,1		
Parametri	Min	Med	Max
Temperatura dei fumi in canna fumaria [°C]	112,7	119,5	126,7
Temperatura dei fumi all'ingresso filtro [°C]	86,9	140,0	153,0
Temperatura dei fumi in uscita dal filtro [°C]	122,2	228,5	311,6
Temperatura dei fumi in uscita della linea di campionamento [°C]	100,9	124,9	137,7
Portata d'acqua in caldaia [l/h]	1884	2274	2313
Temperatura dell'acqua in ingresso alla caldaia [°C]	51,3	58,0	60,2
Temperatura dell'acqua in uscita dalla caldaia [°C]	60,5	67,5	69,2
PM a monte del filtro [mg/Nm <sup>3</sup> ]	17,3	62,3	108,1
O <sub>2</sub> a valle del filtro [%]	7,0	8,4	17,0
CO <sub>2</sub> a valle del filtro [%]	3,5	11,6	12,8
Potenza utile caldaia [kW]	21,4	25,0	28,7
Rendimento medio caldaia [%]	84,1%		
Δp filtro [Pa]	323	727	1000

In Figura 32 è possibile osservare l'andamento della caduta di pressione ai capi del filtro. Il primo ciclo di questa prova corrisponde al sesto ciclo totale del filtro, non è chiaramente distinguibile il passaggio tra la *depth filtration* e la *cake filtration*: il particolato tende a depositarsi rapidamente sulle pareti del filtro incrementando velocemente le perdite di carico. La rigenerazione avviene ma in modo meno efficace raggiungendo al termine valori di caduta di pressione piuttosto elevati (741 Pa). Per questa ragione si è provato a realizzare una rigenerazione del filtro con una portata di fumi minore. Al tempo 00:55 della prova la portata è stata ridotta a 5 NL/min, e come si può vedere in Figura 32, anche in questo ciclo non si nota il tipico cambio di pendenza della curva durante il passaggio tra la *depth* e la *cake filtration*. La rigenerazione in questo caso sembra essere più efficiente ed inoltre si può notare, analogamente alle prove con il filtro C che la temperatura dei fumi in uscita dal filtro subisce un brusco incremento durante la rigenerazione.

Alla fine di questo ciclo, al fine di poter effettuare l'ultimo ciclo, la portata viene riportata a 7,6 NL/min per effettuare l'ultimo ciclo. La rigenerazione a portata minore sembra avere avuto un effetto utile, anche se minimo, dato che in quest'ultimo ciclo si può notare il passaggio tra il meccanismo della *depth* a quello della *cake filtration* anche se la rigenerazione non sembra migliorare alla portata di 7,6 NL/min, essendosi raggiunti ancora valori elevati e simili al ciclo precedente.

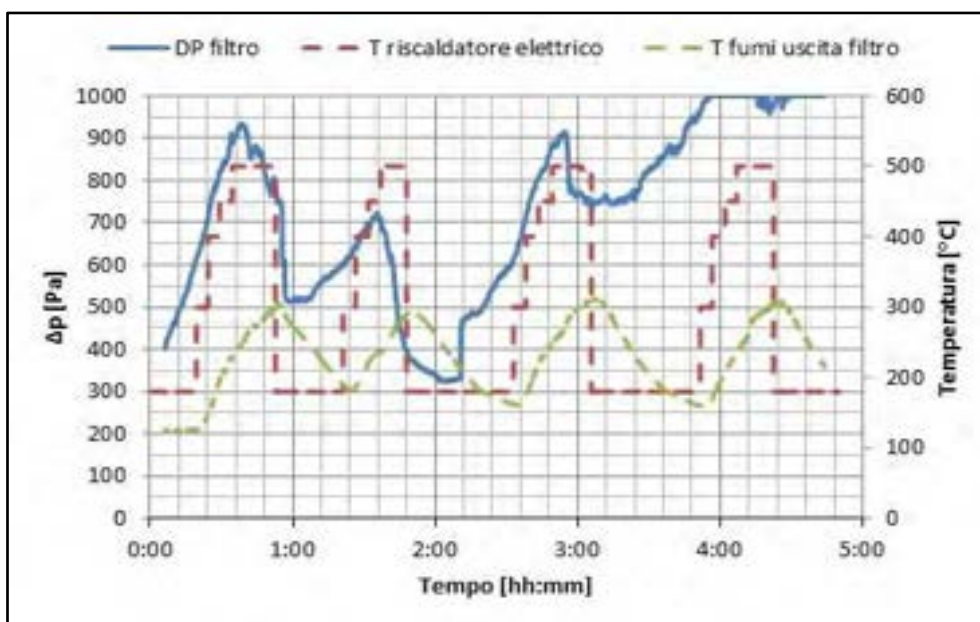


Figura 32. Andamento della caduta di pressione nel filtro della prova D2

In questa situazione il filtro è ormai inutilizzabile per le eccessive perdite di carico e si è, pertanto, deciso di testare un'ultima rigenerazione oltre i 1000 Pa. Tuttavia l'esito non è stato soddisfacente in quanto le letture del trasduttore di pressione sono rimaste oltre il valore di fondo scala.

Per quanto riguarda le emissioni, sono riportate in Figura 33 le emissioni di particolato della caldaia misurate a monte del filtro, mentre in Figura 34 è indicato l'andamento della potenza e del rendimento durante la prova.

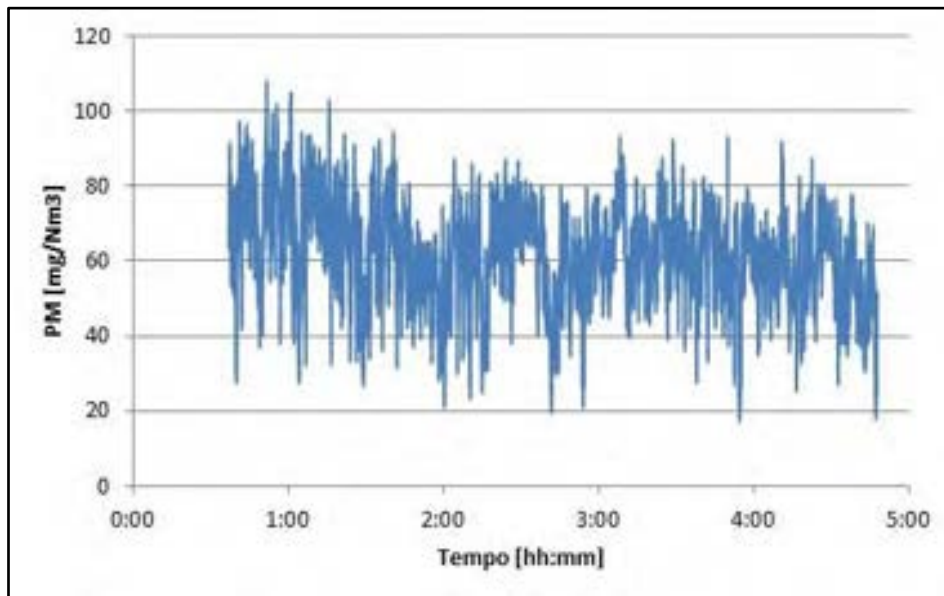


Figura 33. Andamento delle emissioni di PM durante la prova D2

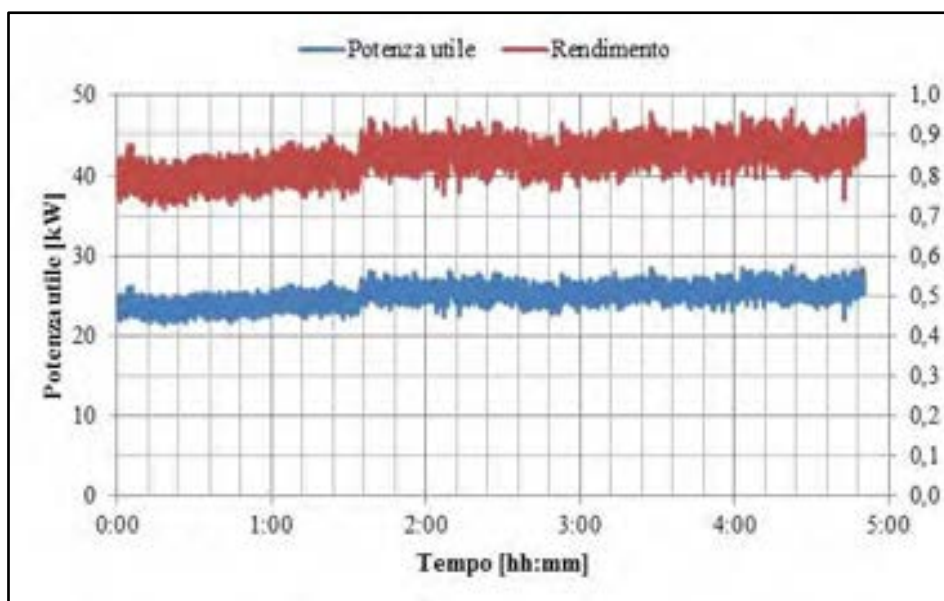


Figura 34. Andamento della potenza e del rendimento durante la prova D2

In Figura 35 sono riportati i sei cicli effettuati dal filtro consecutivamente e con una portata di 7,6 NL/min di fumi, si può notare quanto detto prima e come nel sesto ciclo i pori siano così ostruiti che la deposizione del particolato avvenga solo sulle pareti come si può notare dalla pendenza della curva dell'ultimo ciclo. Le caratteristiche e la durata di ogni ciclo sono riportate in

Tabella 38.

Come nel filtro precedentemente analizzato si può osservare come l'efficienza di rigenerazione tenda a diminuire dopo ogni ciclo (Figura 36), mentre si utilizza il riscaldatore per una durata sempre maggiore in ogni ciclo, raggiungendo il 61 % del tempo totale nel sesto ciclo (Figura 37). Il quinto ciclo rappresenta il limite di durata per i filtri provati nella presente campagna di test sperimentali, per una portata dei fumi di 7,6 NL/min.

**Tabella 38. Analisi dei cicli del filtro di tipo D. In verde sono evidenziate le fasi in cui si ha una diminuzione della caduta di pressione, in azzurro le fasi in cui la caduta di pressione aumenta**

	Fase	$\Delta P_{\min}$ [Pa]	$\Delta P_{\max}$ [Pa]	$\Delta P$ [Pa]	Durata fase [hh:mm]	Coefficiente lineare [Pa/s]	Durata Totale [hh:mm]	Durata ciclo [hh:mm]	Efficienza di rigenerazione [%]	Tempo di utilizzo del riscaldatore elettrico [%]
Ciclo 1	1	277	596	319	1:28	0,06	1:54	2:13	60%	26%
	2	603	911	308	0:20	0,29				
	3	590	912	322	0:03	-1,61	0:18			
	4	464	590	126	0:14	-0,21				
Ciclo 2	1	464	608	144	0:47	0,06	1:06	1:27	58%	38%
	2	608	858	250	0:19	0,24				
	3	632	859	227	0:05	-0,86	0:20			
	4	474	632	158	0:15	-0,16				
Ciclo 3	1	474	603	129	0:41	0,06	1:00	1:23	53%	39%
	2	604	860	256	0:19	0,26				
	3	614	859	245	0:03	-1,08	0:22			
	4	526	614	87	0:19	-0,10				
Ciclo 4	1	526	610	83	0:29	0,03	0:48	1:19	50%	40%
	2	610	866	256	0:18	0,25				
	3	668	867	199	0:02	-1,39	0:31			
	4	558	668	110	0:28	-0,06				
Ciclo 5	1	557	609	51	0:16	0,05	0:34	1:00	45%	50%
	2	609	813	204	0:17	0,23				
	3	700	814	114	0:02	-0,69	0:25			
	4	613	699	86	0:23	-0,07				
Ciclo 6	2	44	934	891	0:38	0,24	0:38	0:55	37%	61%
	3	852	935	83	0:04	-1,66	0:17			
	4	741	851	110	0:13	-0,18				

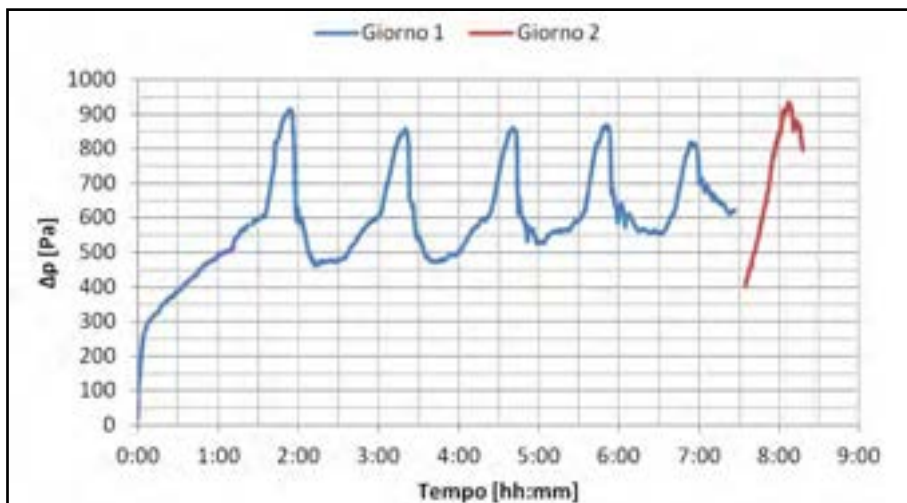


Figura 35. Andamento della caduta di pressione del filtro D nei due giorni di prova

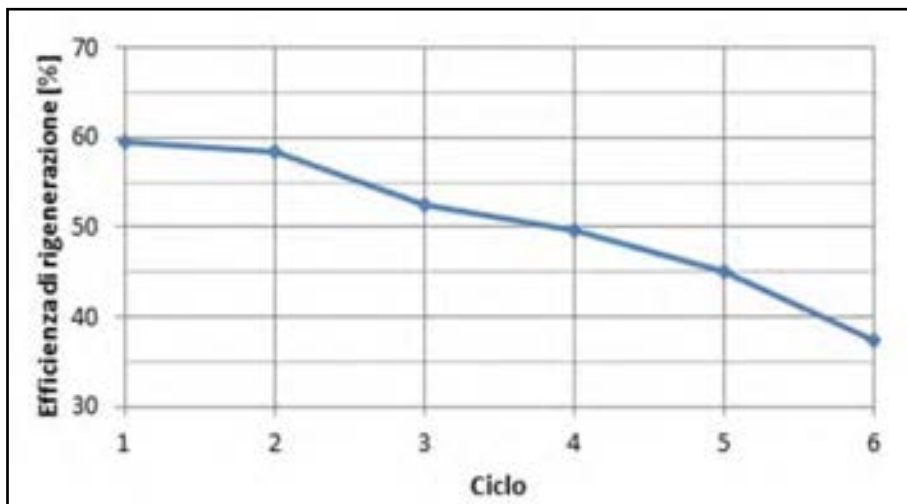


Figura 36. Efficienza di rigenerazione in funzione del numero di cicli del filtro D

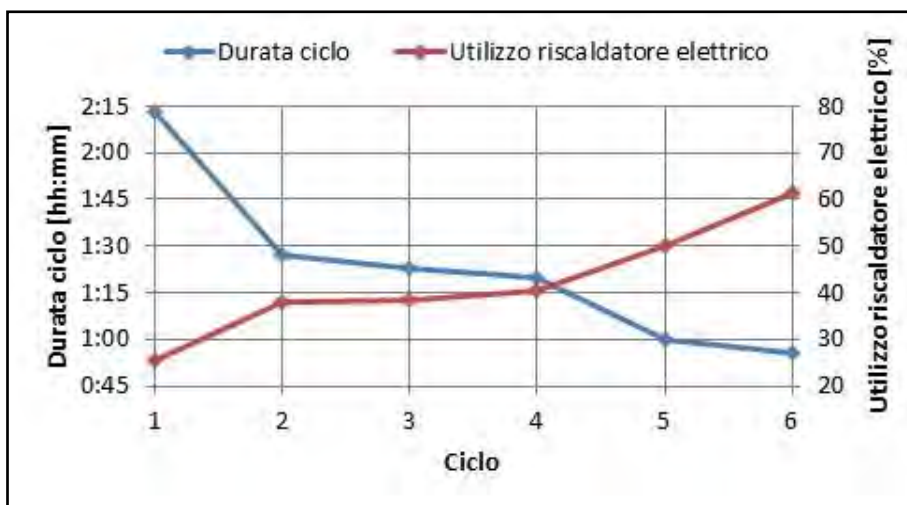


Figura 37. Confronto tra la durata di ogni ciclo e il tempo percentuale di utilizzo del riscaldatore per la rigenerazione nel filtro D

Confrontando in Figura 38 l'andamento della caduta di pressione per i due filtri a porosità maggiorata e lunghezza 125 mm si nota come l'andamento della caduta di pressione sia molto simile fra loro. Nel primo filtro testato infatti oltre a un secondo ciclo anomalo dove si è avuto una rigenerazione poco efficiente e molto lunga, gli altri cicli hanno valori molto simili, come durata e come comportamento. In entrambi i filtri, poi, nel quinto ciclo è molto meno evidente il passaggio dalla depth alla cake filtration.

Tenendo in considerazione che per il primo filtro provato il quarto e il quinto ciclo sono stati effettuati in un giorno diverso rispetto agli altri, si ricava che la perdita di efficienza di rigenerazione sia legata principalmente all'accumularsi del particolato nel filtro. Come osservato i due filtri sono comparabili per l'andamento della caduta di pressione, per la durata dei cicli, per il tempo di utilizzo del riscaldatore elettrico e per le cadute di pressione raggiunte alla fine di ogni ciclo (Figura 39, Figura 40, Figura 41).

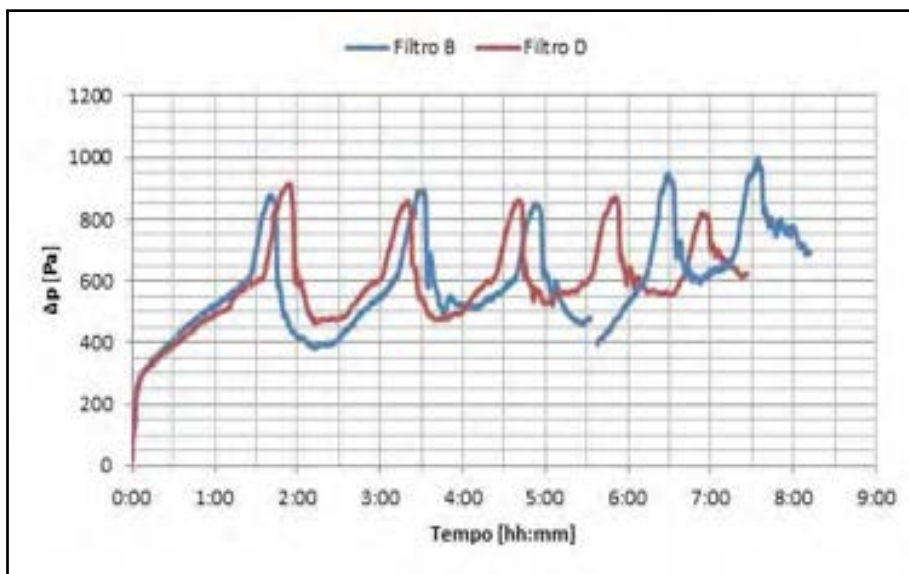


Figura 38. Confronto fra l'andamento della caduta di pressione dei filtri B e D

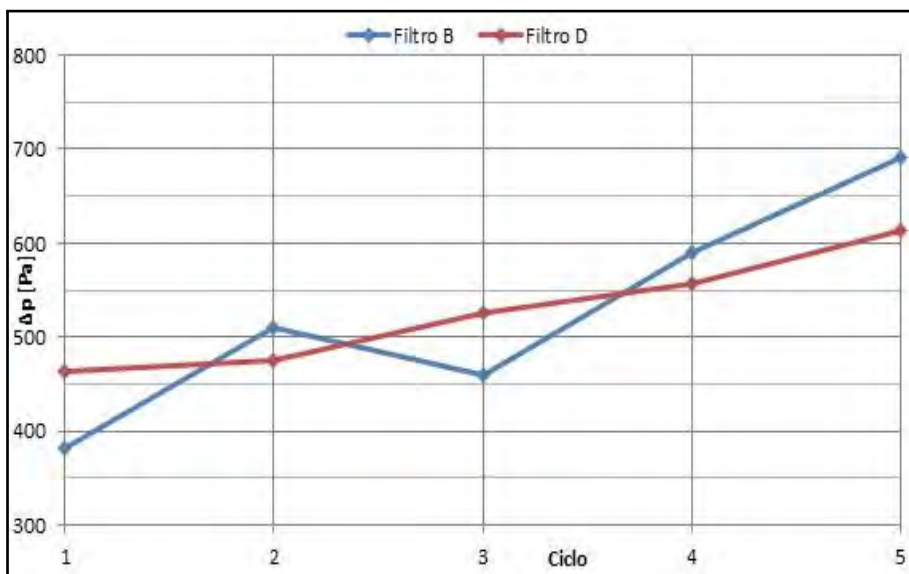


Figura 39. Confronto fra la caduta di pressione raggiunta dopo ogni rigenerazione dei filtri B e D

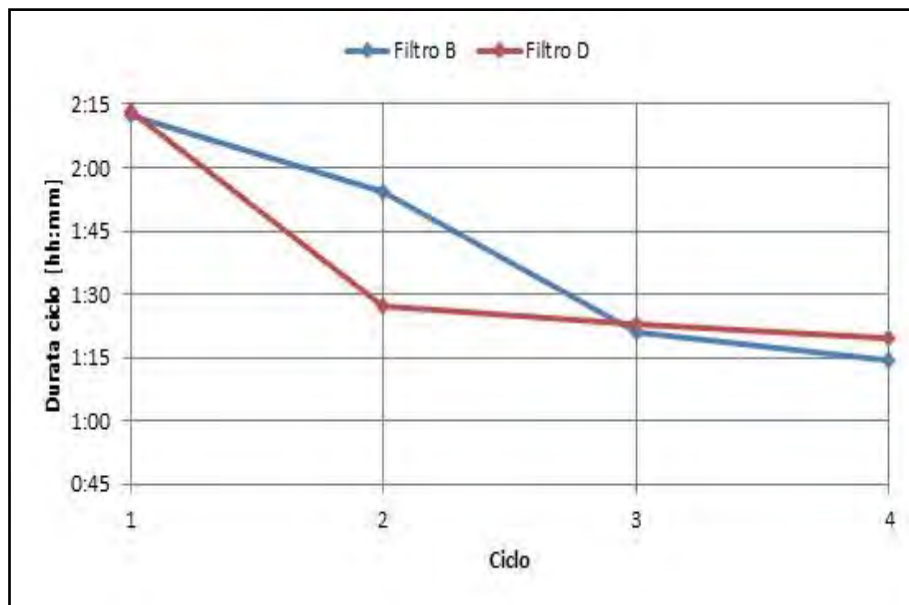


Figura 40: Confronto fra la durata dei cicli dei filtri B e D

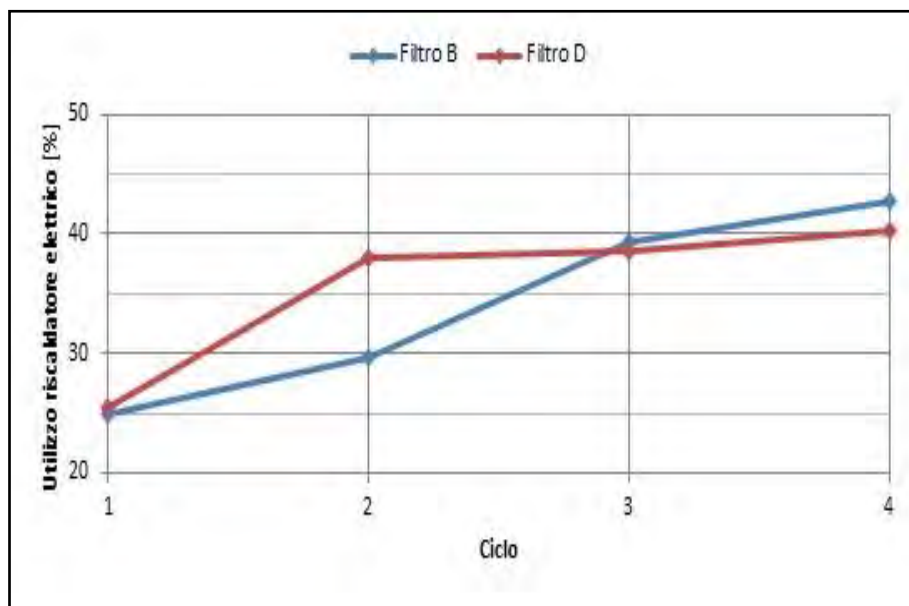


Figura 41: Confronto fra la durata della rigenerazione nei filtri B e D

Se si effettua il confronto anche con il filtro a porosità standard è possibile notare, come nella comparazione già attuata, come i filtri tendano tendenzialmente a mantenere una buona efficienza fino al secondo ciclo e come si abbia poi, soprattutto per il filtro a porosità standard, una brusca perdita di efficienza dal terzo ciclo in poi e ciò a causa dell'alta quantità di particolato accumulatosi (Figura 42). Anche in questo confronto è emerso come in valore assoluto il filtro a porosità maggiorata presenti valori assoluti di caduta di pressione post rigenerazione minori rispetto al filtro a porosità standard (Figura 43).

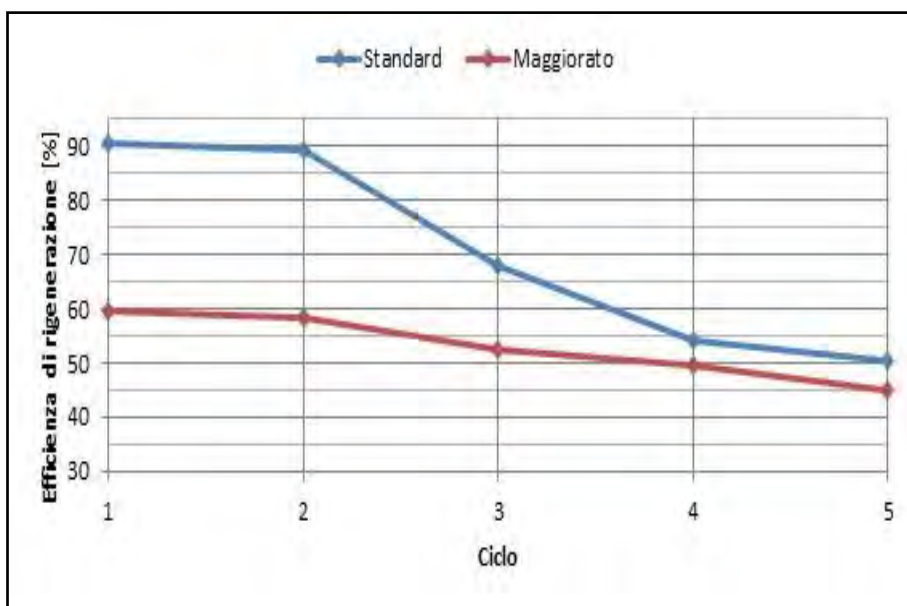


Figura 42. Confronto dell'efficienza di rigenerazione fra il filtro a porosità standard A e il filtro a porosità maggiorata D

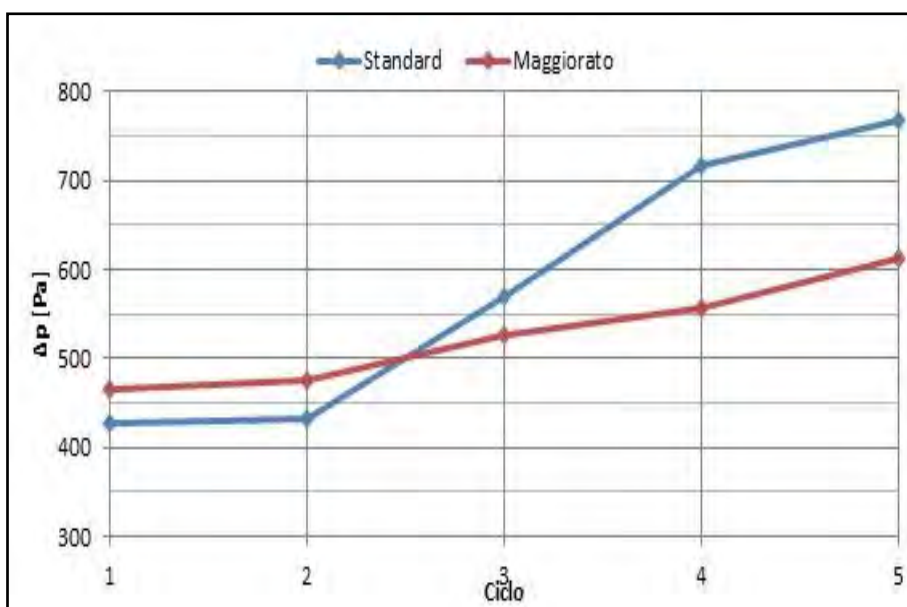


Figura 43. Confronto fra la caduta di pressione alla fine di ogni rigenerazione fra il filtro A il filtro D

La Figura 44 mostra le condizioni del filtro a ditale installato a monte della pompa di aspirazione dei fumi e a valle del filtro di prova (di tipo D nel caso della suddetta Figura). Il filtro appare annerito internamente, tuttavia non si notano depositi significativi di particolato, come hanno dimostrato anche le pesate con una bilancia di precisione. Analoghi comportamenti si sono riscontrati anche per gli altri filtri testati nella campagna sperimentale qui descritta. Si tratta quindi di una verifica, seppur qualitativa, dell'alta efficienza di abbattimento del particolato fine da parte dei filtri wall-flow testati, come risulta anche dalle prove condotte nelle precedenti annualità.

Per tutti i filtri provati, sono state effettuate pesate prima e dopo i test. I risultati sono riportati in Tabella 39.



Figura 44. Stato del filtro a ditale dopo due giorni di prove con il filtro D

Tabella 39. Quantità di particolato catturato da ogni filtro dopo una campagna di prove

Filtro	Particolato catturato dal filtro [mg]
A	277,1
B	289,8
C	202,0
D	291,5

### 3 Conclusioni

Le principali attività condotte nella presente annualità del PAR possono essere di seguito sintetizzate:

- ✓ Redazione delle specifiche tecniche definitive del sistema di rigenerazione a microonde e individuazione del rivestimento superficiale da applicare a filtri catalitici che saranno testati con il sistema di rigenerazione a microonde;
- ✓ Adattamento del circuito idraulico collegato alla caldaia, per migliorare la messa a regime della stessa e il controllo delle temperature di mandata e di ritorno dell'acqua, tramite un separatore idraulico con flussimetro elettronico e pompa di circolazione con inverter;
- ✓ Adattamento della linea di campionamento fumi e prova filtri con un nuovo sistema di rigenerazione a resistenza elettrica a fascia ceramica;
- ✓ Implementazione di un nuovo sistema automatico di acquisizione dati in continuo, con in particolare il monitoraggio automatico della pressione monte-valle del filtro;
- ✓ Definizione di una procedura di prova per l'analisi sperimentale delle prestazioni dei filtri e la rigenerazione;
- ✓ Campagna sperimentale su filtri con diversa porosità e caratteristiche dimensionali.

La campagna sperimentale ha permesso di analizzare nel dettaglio le prestazioni e la durata di diverse tipologie di filtri, in termini di dimensioni e porosità della matrice. Ha inoltre consentito di stimare la durata di ciascun ciclo operativo tra due rigenerazioni successive e di determinare la corrispondente efficienza di rigenerazione.

La misura in continuo del particolato fine ha consentito di analizzare real-time la concentrazione del particolato a monte del filtro. Tali dati sono stati utili al fine di stimare la quantità di particolato prodotto dalla caldaia e in ingresso nel filtro catalitico.

Le prove hanno confermato l'elevata efficienza di abbattimento del particolato dei filtri catalitici wall flow, già riscontrata nelle precedenti annualità. I risultati sperimentali hanno mostrato che il filtro con matrice a porosità maggiorata abbia tendenzialmente delle cadute di pressione alla fine di ogni ciclo minori rispetto al filtro a porosità standard. Un altro dato che è emerso dal corso delle prove è il numero massimo di cinque cicli prima che i filtri diventino inutilizzabili. Inoltre, mantenere alte temperature di rigenerazione per periodi prolungati non porta significativi benefici alla rigenerazione. Nelle prove fin qui svolte, il confronto fra prototipi di lunghezza diversa ha poi mostrato un legame fra la lunghezza del filtro e la portata la portata dei fumi che l'attraversa per ottenere rigenerazioni dalle prestazioni accettabili.

Dal punto di vista della rigenerazione, le maggiori criticità riscontrate risiedono nelle frequenti rigenerazioni (mediamente ogni ora), e nella limitata vita operativa dei filtri (non più di due giorni). Tali criticità non consentono ancora di considerare i filtri maturi per un utilizzo reale su generatori di calore alimentati a biomassa (peraltro caratterizzati da emissioni di particolato ben superiori rispetto ad altri tipi di combustibili liquidi e gassosi). Si ritiene ancora necessaria una fase progettuale di affinamento della struttura e della porosità dei filtri, che tenga in considerazione i risultati ottenuti nella presente campagna sperimentale.

La campagna sperimentale andrebbe ampliata per disporre di un numero di test sufficiente a garantire adeguata ripetibilità dei risultati. Vista anche la composizione della matrice e del catalizzatore dei filtri, si conferma importante la verifica sperimentale della rigenerazione tramite un sistema a microonde, che potrebbe essere più efficiente rispetto alla rigenerazione con riscaldatore elettrico a fascia utilizzato.

Tra gli altri risultati, le attività della presente linea di ricerca sono state alla base della tesi ENEA n. 1884 "Analisi di un sistema di filtrazione per l'abbattimento del particolato da apparecchi a biomassa" assegnata presso il Politecnico di Torino.

In ultima analisi, risultati ottenuti nelle prove sperimentali hanno consentito di migliorare la conoscenza sulle prestazioni dei filtri catalitici wall-flow nell'abbattimento del particolato emesso da generatori di calore a biomassa e di valutare le prestazioni ottenibili nell'intero ciclo di vita dei filtri soggetti a più rigenerazioni in condizioni analoghe a quelle reali. Come possibili sviluppi all'attività, alcuni aspetti evidenziati nel corso delle prove sperimentali andrebbero verificati con ulteriori test. Tra questi si

ricordano: l'effetto cumulativo dei cicli di rigenerazione sulle prestazioni dei filtri, la temperatura dei fumi in uscita dai filtri, le portate ottimali dei fumi e l'effetto della lunghezza dei filtri sulle perdite di carico, oltre al sistema di rigenerazione a microonde, le cui prestazioni saranno da confrontare con il sistema di riscaldamento a resistenza elettrica fin qui utilizzato.