

## Gas inquinanti dei motori Diesel nella costruzione di gallerie

### Bolletino 2: Filtro per particelle

#### 1. Situazione di partenza e obiettivo

Sulla base di risultati ottenuti da studi [1] tossicologici a livello mondiale, le emissioni dei motori Diesel sono già state classificate nel 1988 come „probabilmente cancerogene“. A livello nazionale sono quindi stati fissati dei valori limite d'immissione con riferimento al tenore complessivo di carbonio del particolato (EMD). La concentrazione EMD massima ammissibile sul posto di lavoro (valore medio di 8 - 10 ore) si situa p. es. in Svizzera a  $0,2 \text{ mg/m}^3$  [2]. La RTSP 554 in Germania esige „provvedimenti supplementari per la protezione dei lavoratori“ già a partire da  $0,1 \text{ mg/m}^3$  [3].

#### Editoriale

La concentrazione di particolato dei motori Diesel deve essere ridotta a meno di  $0,2 \text{ mg}$  per metro cubo di aria respirabile. Nei motori in uso ciò è possibile solo procedendo alla filtrazione del particolato.

Nel quadro di VERT sono stati scelti 6 filtri tipici e esaminati su due motori di macchine edili. Tutti i filtri hanno raggiunto un rendimento superiore al 90 %. Le perdite di pressione sono rimaste entro limiti accettabili. La dimensione di quasi tutti i filtri è tale da poter essere impiegata per l'installazione in un secondo tempo. Il loro costo è accettabile.

L'affidabilità nell'uso pratico e la praticità dei procedimenti per la pulizia regolare dei filtri (rigenerazione) sono attualmente all'esame nell'impiego pratico. Su ciò si informerà in uno dei prossimi bollettini.

Anche se mancano ancora esperienze su larga scala nell'uso della tecnologia dei filtri per fuliggine, è stato raggiunto, secondo il nostro punto di vista, uno stato della tecnica che sembra essere idoneo per risolvere i problemi legati alle emissioni nella costruzione di gallerie.

AUVA, INSAI, TBG

VERT significa „Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tunnelbau“ (Riduzione delle emissioni prodotte da macchinari già in dotazione nella costruzione di gallerie). Si intendono qui i motori esistenti sui cantieri e non quelli in fase di futuro sviluppo. Il bollettino VERT n.1, giugno 1995, informa sui motivi e obiettivi del progetto VERT.



Figura 1: fuliggine da Diesel, emessa come particolato fine e agglomerato su una fibra ceramica del diametro di  $10 \mu$ .

Sulla base dell'inventario [2] svizzero delle emissioni, per le macchine in dotazione sono da attendersi emissioni di particolato di circa  $1,5 \text{ g/KWh}$ . Tenendo conto di un consumo di aria di un motore Diesel, pari a  $6 \text{ m}^3/\text{KWh}$  ( $\lambda = 2$ ), risulta un'emissione di particolato di circa  $250 \text{ mg}$  per metro cubo di aria comburente.

Per poter ottenere il livello d'immissione citato di  $<0,1 \text{ mg/m}^3$ , grazie alla sola diluizione sul posto di lavoro, sarebbe pertanto necessario un volume d'aerazione per lo meno di 2'500 volte l'aria comburente. Nonostante ciò la qualità dell'aria non sarebbe garantita in tutti i posti di lavoro a causa dell'incompleto rimescolamento e rimarrebbe invariata la quantità complessiva di sostanze dannose che con l'aria di scarico del tunnel raggiunge l'ambiente. I costi della necessaria ventilazione aumenterebbero in modo insopportabile.

Per tenere conto di questa situazione insoddisfacente si deve abbandonare l'idea della diluizione. Non deve essere limitata solo l'emissione media di sostanze dannose (immissione) ma anche l'emissione di sostanze dannose di ogni motore Diesel.

In considerazione dell'importanza dell'emissione di particolato, che nei motori esistenti può essere ridotta in modo efficiente solo con il trattamento dei gas di scarico

ossia con il filtraggio, nel progetto VERT si è posta l'importanza sulla valutazione di questi equipaggiamenti (filtri) in un secondo tempo. Qui di seguito si espongono i risultati intermedi dopo gli esami al banco motore. Sul risultato delle prove in cantiere si informerà in un secondo tempo.

## 2. Caratteristiche del particolato Diesel

In presenza di una preparazione insufficiente della miscela e di un'insufficienza di aria, si ha la formazione, soprattutto nella prima fase della combustione nei motori Diesel, di particelle dalla struttura simile alla grafite delle quali molte bruciano di nuovo. Durante la fase d'espansione le particelle residue si riuniscono in cosiddette particelle primarie del diametro di 10 - 20 nm (1 nm = 0,001 µm) ed escono dal motore. Durante il trasporto fino all'uscita del tubo di scappamento si ha la formazione di agglomerati che possono superare i 300 nm; il fumo Diesel diventa quindi visibile.

Sulla base della loro formazione, le particelle di fuliggine sono delle strutture semplici e ricche di superfici. La loro densità si situa tra i 0,02 e 0,06 g/cm<sup>3</sup>; la superficie specifica risulta tra 50 e 150 m<sup>2</sup>/g [4].

Si osserva in genere una distribuzione trimodale. La grandezza media, intorno ai 50 - 150 nm, è la più importante per quanto concerne l'effetto tossico sugli alveoli. La figura 2 presenta la distribuzione tipica di un motore da macchina edile.

Le particelle di tali dimensioni non sono visibili, entrano profondamente nei polmoni e, in considerazione della loro grandezza, composizione di sostanze e grande superficie specifica, costituiscono un elevato rischio tossico.

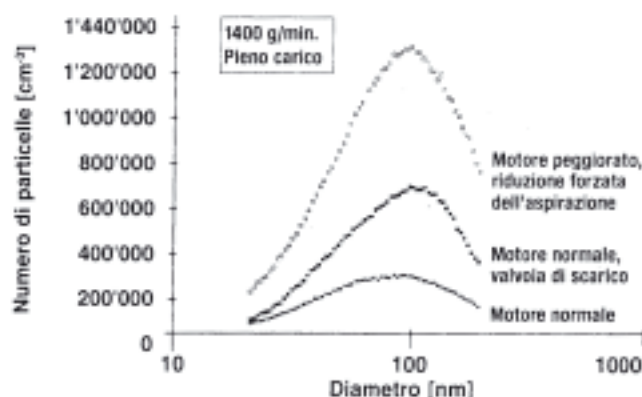


Figura 2: distribuzione delle particelle nel gas di scarico di un motore Diesel DI (potenza nominale 100 kW) con eccedenza elevata, media e lieve di aria nonché peggioramento della combustione a causa dello spostamento dell'inizio del trasporto.

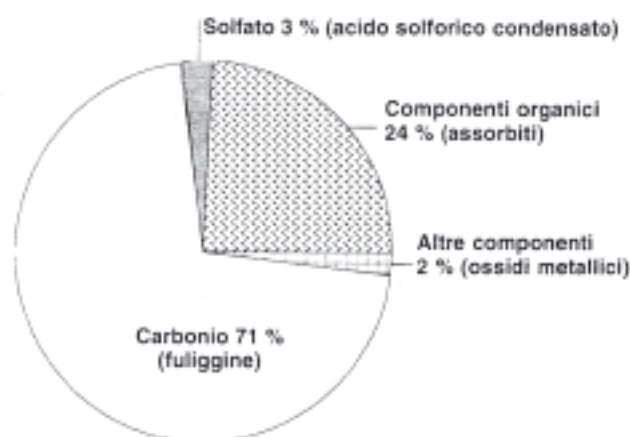


Figura 3: composizione tipica di particolato Diesel nei motori di autovetture; misurazioni della Volkswagen AG [5].

Nonostante il fatto che il particolato Diesel è composto essenzialmente da sostanze combustibili, a causa dell'insufficiente permanenza e delle basse temperature non è di regola possibile provocare nel tubo di scappamento fino al suo orifizio una reazione secondaria importante.

## 3. Metodi di filtrazione

Per impedire che il particolato Diesel, dannoso alla salute, entri nell'aria respirabile dei lavoratori rimane pertanto solo la possibilità della filtrazione. In considerazione della sua dimensione esigua esso si sottrae all'effetto di molti procedimenti tecnici di depolverizzazione. Dalla figura 4 risulta che cicloni, lavatori, Venturi e filtri elettrici usuali non hanno praticamente nessun effetto su queste particelle fini.

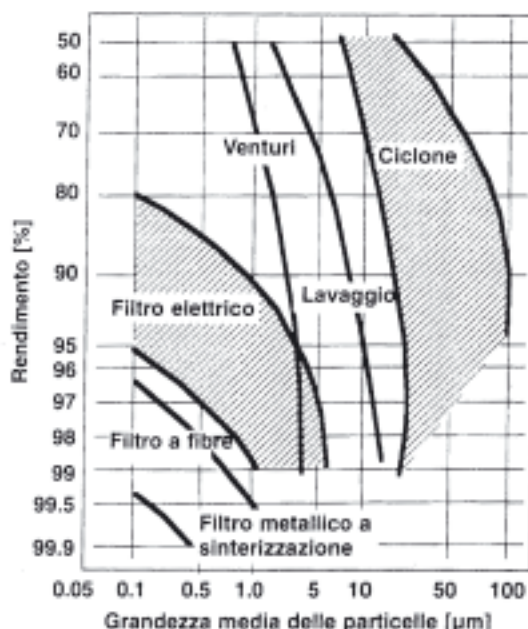


Figura 4: Grado di separazione in funzione della dimensione del particolato per sistemi tecnici di filtraggio (secondo Zievers, CERAMIC-Bulletin 1/1991).

Oltre a carbonio, le particelle contengono anche idrocarburi aggregati, acido solforico condensato, parti di cenere, p. es. da olio di lubrificazione e da materiale di abrasione del motore. La figura 3 presenta una composizione tipica per motori di automobili, risultante da misurazioni effettuate dalla Volkswagen AG [5]. La composizione è variabile; a causa del carico medio più elevato dei motori di veicoli industriali è tipico l'aumento delle parti di carbonio e inferiore il contenuto in idrocarburi.

Visto che durante la combustione della fuliggine possono presentarsi localmente delle temperature superiori ai 1000°C, vengono utilizzati sovente materiali ceramici, che si trovano sul mercato, con strutture ricche di superfici,



monolitici, a pori aperti o sotto forma di microfibre. Sul mercato si trovano però pure delle strutture metalliche altamente porose che grazie alla loro capacità di conduzione del calore attenuano il problema del surriscaldamento.

I filtri per particolato Diesel possono oggi essere suddivisi, sulla base della loro costruzione, in due categorie con caratteristiche distinte, ossia in cosiddetti filtri a superficie e filtri in profondità [6].

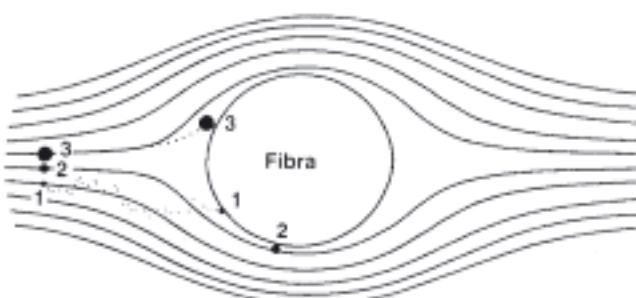
I filtri a superficie agiscono come un colino a causa del loro effetto barriera, ossia la loro porosità dev'essere inferiore alla grandezza del particolato da filtrare. La porosità usuale di pareti filtranti ceramiche ( $10-30\mu$ ) di regola non è capace di trattenere sostanze delle dimensioni del particolato Diesel. Deve dapprima formarsi una focaccia di fuliggine che con l'aumentare dello spessore diventerà sempre più efficiente e riterrà particelle sempre più piccole.

Un rappresentante tipico di questo genere di filtro è il cosiddetto filtro alveolare monolitico ceramico (figura 5), molto diffuso, le cui celle, chiuse alternativamente nei due lati, hanno una sezione di  $2 \times 2$  mm. La superficie disponibile per la filtrazione è di conseguenza molto grande, ossia di circa  $1 \text{ m}^2$  per un litro di volume del filtro. La condizione indispensabile per questo tipo di filtro è la sua grande superficie visto che, tenendo conto della contropressione, la velocità di flusso attraverso le pareti filtranti può raggiungere al massimo  $3-5 \text{ cm/s}$ . Il rendimento di un filtro nuovo, senza deposito, è inizialmente basso e la contropressione bassa. Il rendimento del filtro migliora rapidamente con l'aumentare del deposito di fuliggine e può raggiungere valori molto elevati. I filtri di questo tipo possono immagazzinare quantità molto elevate di fuliggine. Con il passare del tempo le celle si riempiranno e la contropressione aumenterà notevolmente. Nell'impiego pratico si dovrà evitare questa situazione.

I filtri in profondità, che di regola presentano una struttura fibrosa e che sotto forma di filtri cartacei o di veli permettono di ottenere rendimenti elevatissimi nella tecnica dei

riera e non si ha la formazione di una focaccia di fuliggine. L'insieme delle fibre presenta però una superficie molto grande (tipiche sono superfici di  $250 \text{ m}^2$  per litro di volume di filtro) sulla quale si depongono le particelle minuscole per effetto d'inerzia o della diffusione. La figura 6 mostra su queste fibre la crescita di agglomerati che aumentano ulteriormente la superficie filtrante.

La porosità della struttura dei filtri in profondità è elevata, di regola del 65 % e oltre. La velocità di flusso di  $20-60 \text{ cm/s}$  è di conseguenza più elevata rispetto ai filtri di superficie.



1. Diffusione 2. Catturazione 3. Deposizione per inerzia

Figura 6: meccanismi di filtraggio di una fibra isolata (dalla documentazione aziendale 3M)

Il rendimento migliore dei filtri in profondità si ha quando non vi è nessun deposito rispettivamente quando è stato completamente pulito. Nel contempo si ha qui la contropressione minore. Con l'aumentare del deposito diminuisce il rendimento finché si arriva alla saturazione. La contropressione aumenta in modo decrescente fino ad un valore limite. Il filtro non si otturerà mai del tutto.

Di regola i filtri sono costruiti tecnicamente in forma di candela nei quali dei tubi forati in lamiera assumono la funzione portante. Nel cosiddetto filtro avvolto il filo viene avvolto strettamente all'interno del tubo forato con una tecnica particolare che aumenta la sua superficie. Nel cosiddetto filtro a maglia la cavità cilindrica viene riempita in modo relativamente rilassato con una maglieria circolare plissettata [7].

Molti filtri tecnici si presentano in forma mista. Sia i filtri in profondità sia i filtri superficiali, di dimensioni adeguate, raggiungono un rendimento di molto superiore al 90 %. Mentre la qualità di filtraggio dipende solo poco dalla ve-

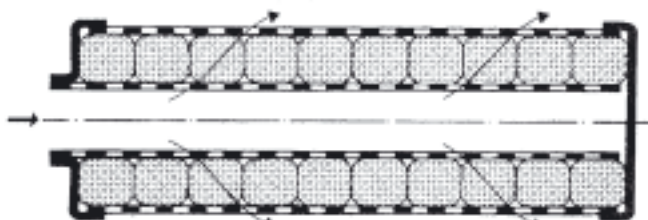


Figura 7: filtro a candela a rete di filamenti

locità di flusso e quindi dalla grandezza del filtro, la contropressione aumenta rapidamente con il diminuire delle dimensioni del filtro. Nel contempo diminuisce la capacità d'immagazzinamento.

La perdita di pressione del filtro influisce sul consumo di carburante del motore. A  $100 \text{ mbar}$  si deve contare su

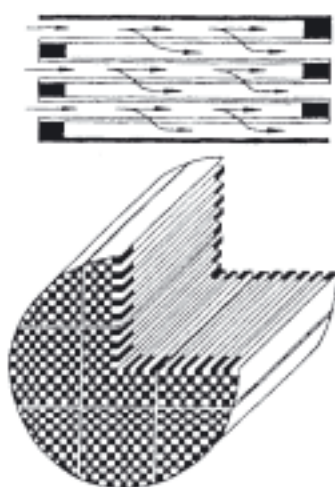


Figura 5: filtro alveolare monolitico ceramico o cosiddetto filtro „wall flow“ (immagine secondo CORNING).

locali puliti, possono essere utilizzati anche per la filtrazione della fuliggine a condizione che vengano impiegate fibre ceramiche. I pori delle strutture di filtri in profondità tipici sono di grandezza tale da non creare effetti bar-



una riduzione del rendimento del 2 %. Nei motori con turboaggregati essa è ev. un po' superiore. La contropressione è quindi spesso determinante per il dimensionamento del filtro.

Tutti questi tipi di filtri hanno la caratteristica di ridurre in modo efficace il rumore dei gas di scarico.

#### 4. Pulizia periodica dei filtri

Un motore da 100kW può produrre in un'ora oltre 50 g di fuliggine. Un deposito sciolto di tale quantità corrisponde ad un volume di 1 l circa. Il filtro deve quindi essere molto grande oppure deve venire pulito molto spesso. In casi isolati si tenta di eliminare la fuliggine con un procedimento simile a quello dell'aspirapolvere. Ciò riesce però solo usando filtri cartacei particolari e con gas di scarico molto freddi ( $< 250^{\circ}\text{C}$ ) nonché produzione esigua di fuliggine. Rimane il pericolo di un'accensione improvvisa. Altre tecniche, basate su procedimenti industriali di depolverizzazione, tentano di togliere periodicamente la focaccia di fuliggine con la soffiatura inversa e l'eliminazione attraverso chiuse [9].

Il numero maggiore dei procedimenti oggi offerti si basa però sul fatto che la fuliggine può essere bruciata con l'ossigeno residuo presente nei gas di scarico. Tali filtri vengono pertanto anche definiti con il nome di filtro a combustione di fuliggine (FCF). La combustione completa della fuliggine richiede però temperature superiori ai  $600^{\circ}\text{C}$ . Queste temperature si presentano raramente durante l'uso di una macchina da cantiere dopo l'espansione dei gas con il turbocompressore. È nel contempo necessario un tasso di ossigeno del 6 - 8 %. Nel caso venisse scatenato questo tipo di rigenerazione, essa avviene di regola in un filtro estremamente carico. L'accensione della focaccia di fuliggine libera un'importante quantità di calore supplementare che può aumentare la temperatura nella zona di filtraggio di altri  $500 - 700^{\circ}\text{C}$  e pertanto provocare un carico termico improvviso al quale il materiale ceramico dei filtri alveolari spesso non resiste.

Per ottenere una rigenerazione sicura, risparmiare i materiali del filtro e poter controllare la contropressione vengono offerti i seguenti procedimenti di rigenerazione:

**Procedimenti attivi di rigenerazione:** essi controllano con rilevatori di pressione il deposito di fuliggine nel filtro e, raggiunto un valore limite, aumentano la temperatura nel filtro con metodi diversi fino all'accensione della fuliggine.

Come mostra la figura 9, il riscaldamento può avvenire con un bruciatore preacceso a monte che, utilizzando olio Diesel e aria comburente supplementare (ventilatore), riscalda i gas di scarico (bruciatore a flusso totale). Il riscaldamento viene dosato in modo tale da ottenere una combustione relativamente lenta della fuliggine così da poter eliminare in continuazione il calore prodotto evitando in tal modo un carico termico improvviso per il materiale del filtro.

Se il filtro deve essere rigenerato nelle diverse condizioni d'esercizio del motore, la potenza del bruciatore si

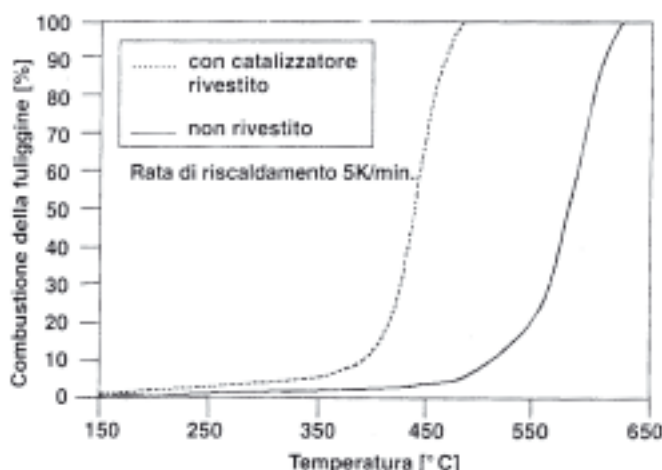


Figura 8: comportamento della fuliggine nella combustione su strutture a microfibre rivestite e non rivestite cataliticamente (informazioni BUCK).

situa nella zona di potenza del motore. La regolazione accurata è la premessa per un funzionamento efficace.

È necessaria una potenza inferiore del bruciatore se si utilizza un sistema gemellare di filtri nel quale il filtro da rigenerare non viene attraversato dai gas di scarico ma solo dal gas del bruciatore. La rigenerazione avviene più lentamente e potrà essere meglio controllata - il costo complessivo del sistema aumenta però ulteriormente.

Il procedimento può essere notevolmente semplificato se ci si limita alla rigenerazione a macchina ferma con il motore che gira a vuoto o a motore fermo. L'energia necessaria per il riscaldamento elettrico può allora essere prelevata dalla rete. Questo tipo di rigenerazione necessita di un lasso di tempo notevolmente maggiore e può essere effettuato di regola solo periodicamente tra i turni di lavoro. Le dimensioni dei filtri devono pertanto essere tali da poter immagazzinare tutta la fuliggine prodotta durante 8 - 16 ore senza un aumento inammissibile della contropressione. Altri sistemi mantengono il riscaldamento del bruciatore anche per questo procedimento periodico di rigenerazione a macchina ferma. Ciò riduce il tempo di rigenerazione. I filtri intercambiabili, come offerti per i carrelli elevatori, non sono in pratica utilizzabili nella costruzione di gallerie.

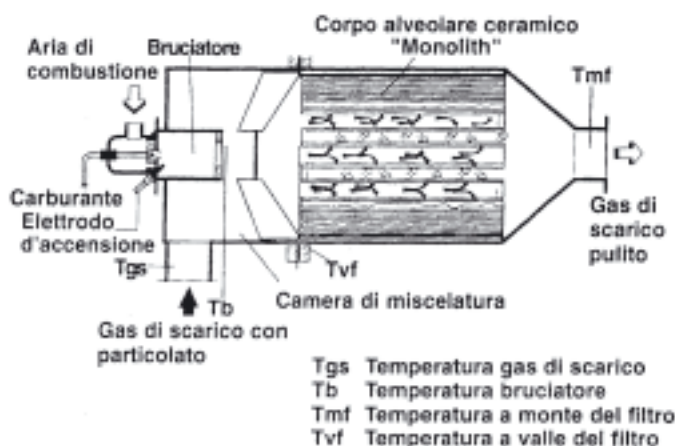


Figura 9: filtro per particolato con bruciatore Diesel a flusso totale (DS/GILLET)

*In contrapposizione a ciò vi sono i cosiddetti sistemi passivi di rigenerazione.*

**Rigenerazione additiva:** determinati ossidi metallici hanno la caratteristica di ridurre per effetto catalitico la temperatura d'accensione della fuliggine. Nel caso del rame ciò è da lungo tempo noto (pulizia dei camini). Ma anche gli ossidi di ferro e gli ossidi di cerio sono molto attivi. I metalli sono aggiunti al carburante in piccole quantità (20-50 ppm) sotto forma di complessi organici. Si ritrovano nella fuliggine sotto forma di particelle molto piccole e, come risulta dalla figura 10, sono in grado di scatenare l'accensione della fuliggine a temperature più basse. Oltre alle rigenerazioni stocastiche che, grazie all'accensione che può avvenire già a temperature di 200 - 300° C in seguito alla presenza di idrocarburi, si constatano equilibri di rigenerazione a partire da 400° C [9] circa.

La premessa per l'inizio della rigenerazione è la presenza di un deposito minimo che aumenta la contropressio-

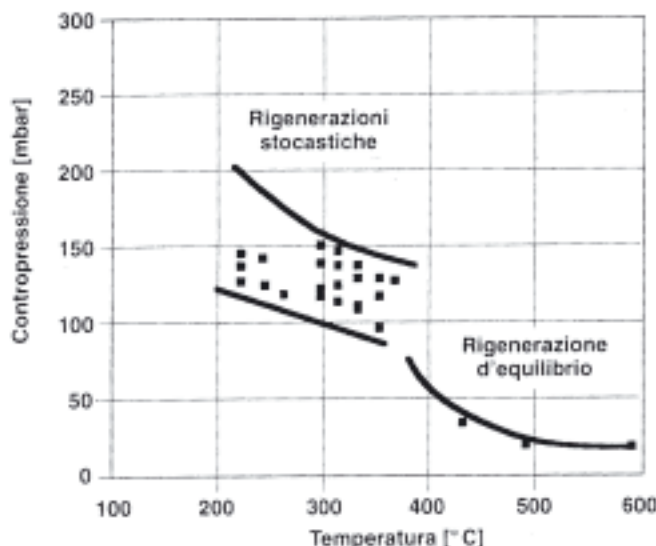


Figura 10: rigenerazione con additivi al carburante (secondo RHÔNE POULENC)

ne di 2 - 4 volte rispetto al filtro pulito. Quanto minore è il deposito tanto maggiore sarà la temperatura di rigenerazione. Gli ossidi metallici restano quasi per intero nel filtro e, visto che non possono essere bruciati, portano insieme alle parti incombustibili del particolato (cenere-olio, materiale d'abrasione) gradualmente all'otturazione irreversibile dei pori. Il filtro dovrà poi essere sostituito oppure pulito lavandolo o con aria compressa.

**Rivestimento catalitico:** si può ottenere una riduzione efficace della temperatura d'accensione della fuliggine con un rivestimento ad alta dispersione del materiale filtrante con sostanze aventi effetto catalitico come il pentossido di vanadio. La figura 8 presenta una riduzione della temperatura di combustione della fuliggine di quasi 200° C. L'effetto è particolarmente pronunciato nelle strutture fibrose grazie alla loro grande superficie. Entrano in considerazione anche altri metalli e ossidi metallici e il metodo non è naturalmente limitato esclusivamente all'applicazione di filtri a fibre.

I meccanismi di rigenerazione passiva, con l'aggiunta di additivi al combustibile e con il rivestimento catalitico del

materiale filtrante, semplificano notevolmente il sistema. La loro applicazione si limita però a quei casi nei quali la temperatura del gas di scarico raggiunge sufficientemente spesso per periodi più lunghi dei valori di oltre 400° C. Questa condizione risulta soddisfatta nel caso di numerosi impieghi di macchine da cantiere.

Questa punta di temperatura può essere ottenuta per brevi tempi anche con accorgimenti semplici come per esempio con la chiusura dell'aria del motore, con l'incremento del ritorno dei gas di scarico o con la modificazione dell'inizio di mandata. I relativi procedimenti, che premettono una regolazione elettronica, sono in fase di sviluppo.

## 5. Scelta dei sistemi di filtri di particolato per il programma di valutazione VERT

Oltre 30 ditte\*) offrono sistemi filtranti per fuliggine da installare in un secondo tempo. Volere esaminare parallelamente tutti questi sistemi avrebbe oltrepassato largamente il quadro di questa valutazione. I sistemi differiscono però nei loro principi basilari in parte solo poco l'uno dall'altro. Spesso vengono usati i medesimi mezzi filtranti combinati con procedimenti diversi di rigenerazione.

Per ottenere una panoramica è sufficiente esaminare i mezzi filtranti più importanti e i procedimenti di rigenerazione applicati ai diversi mezzi filtranti tipici. È quindi stata effettuata la scelta seguente:

### Mezzi filtranti:

- filtri alveolari ceramici (NGK e CORNING)
- filtro alveolare metallico a sinterizzazione (SHW)
- filtro ad avvolgimento di filamenti (3M)
- filtro a maglia di filamenti (BUCK)

### Procedimenti di rigenerazione:

- bruciatore Diesel (DSI)
- riscaldamento elettrico (HUSS, UNIKAT)
- additivi (PLUTO, RHÔNE POULENC, LUBRIZOL)
- rivestimento catalitico (BUCK)

Alcuni di questi filtri sono dotati di un rivestimento supplementare in metallo prezioso che non serve alla combustione della fuliggine filtrata ma all'ossidazione secondaria di sostanze dannose sotto forma di gas, quali HC e CO, che qualche volta si presentano in quantità maggiore durante la rigenerazione (evaporazione di HC e combustione incompleta).

\*) l'elenco può essere richiesto alla direzione del progetto



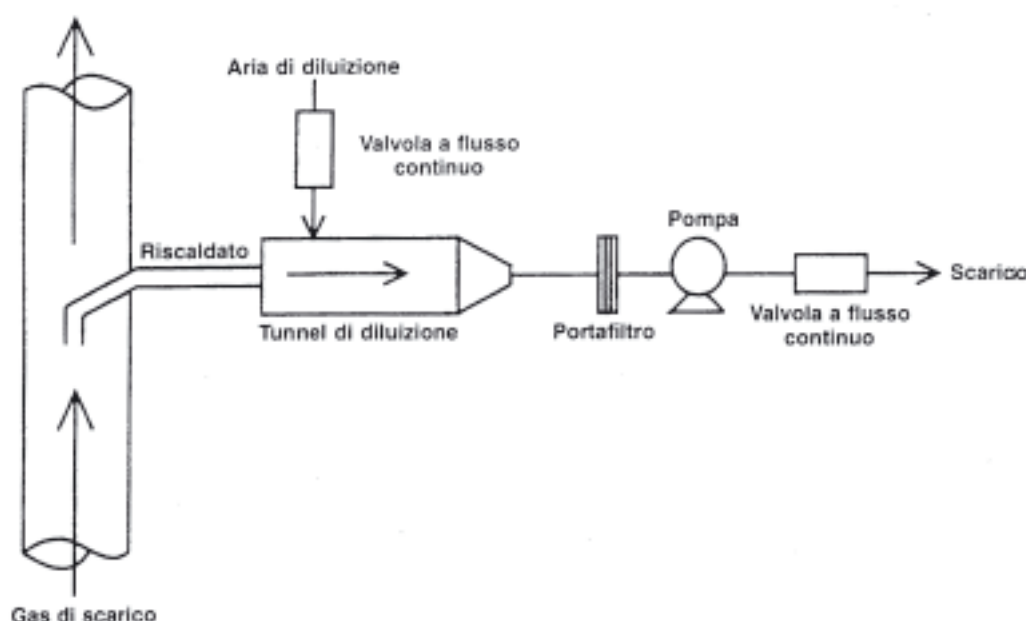


Figura 11: tunnel di diluizione a flusso parziale AVL.

## 6. Metodi di prova

Tutte le prove sono state effettuate sul banco prova motori della sede di verifica dei gas di scarico presso la Scuola d'Ingegneria a Bienne/Svizzera [10] sia in condizioni stazionarie sia in condizioni variabili. Come casi tipici di condizioni variabili per macchine da cantiere sono stati scelti l'accelerazione libera dal regime minimo fino ai giri limitati automaticamente nonché la cosiddetta accelerazione del trasduttore dal regime minimo fino al punto coppia frenante.

Sono stati impiegati i seguenti procedimenti di misurazione:

### Gravimetria con la tecnica del tunnel di diluizione:

è stato prelevato un campione in modo isocinetico conformemente alla norma e raffreddato con aria ambiente a meno di 52° C in un tunnel di diluizione (figura 11). Il gas raffreddato e diluito è stato condotto ad un filtro di misurazione che è stato pesato prima e dopo la prova dopo condizionamento. Il peso complessivo del filtrato è stato definito secondo le norme valide a livello internazionale nel campo degli autoveicoli come „emissione di particolato“.

### Analisi del filtrato:

L'analisi termica a due livelli secondo il procedimento della coulometria ha permesso di determinare il contenuto complessivo in carbonio del filtrato e quindi permettere una valutazione sulle EMD secondo la definizione dei valori MAC. L'analisi chimica del filtrato con il procedimento d'estrazione ha inoltre permesso di determinare le parti di idrocarburi e di solfati aggregati. Si è rinunciato ad analisi più precise per determinare l'origine delle particelle dal carburante o dal lubrificante.

### Analisi della distribuzione della grandezza del particolato in alcuni punti d'esercizio:

è stata esaminata in alcuni punti d'esercizio la distribuzione della grandezza delle particelle comprese tra 10 - 200 nm. A tale scopo è stato utilizzato un cosiddetto ana-

lizzatore mobile differenziale della ditta TSI. Questo apparecchio suddivide il particolato ad intervalli in circa 30 classi di grandezza e determina il numero di particelle per ogni classe con un misuratore di nuclei di condensazione inserito in seguito. Gli spettri di distribuzione con 30 classi possono così essere misurati nel giro di 20 minuti circa.

### Emissioni in condizioni variabili:

è stata analizzata in condizioni variabili con il metodo dell'opacimetria solo la produzione di fumo. Ciò ha permesso di registrare sia l'evoluzione dell'opacità dei gas di scarico sia l'integrazione dell'intera emissione di fumo. Non è però possibile un confronto fisico corretto di questa misurazione con l'esame gravimetrico.

Sia le misurazioni in condizioni stazionarie sia quelle in condizioni variabili sono state effettuate in modo da permettere il confronto dei risultati. Ciò significa che il motore è stato dapprima sottoposto senza filtro per particolato a tutte le analisi e in seguito, con la contropressione prodotta dai filtri, al medesimo punto d'esercizio, con il filtro montato a valle. Sulla base del confronto con/senza filtro è stato possibile stabilire i seguenti criteri di valutazione:

grado di precipitazione:	$\frac{\text{MP senza filtro} - \text{MP con filtro}}{\text{MP senza filtro}}$
penetrazione:	$\frac{\text{NP con filtro}}{\text{NP senza filtro}}$
grado di trasformazione:	$\frac{\text{CSD senza filtro} - \text{CSD con filtro}}{\text{CSD senza filtro}}$

MP = massa del particolato

NP = numero di particelle

CSD = concentrazione delle sostanze dannose

## 7. Risultati

Nella tabella seguente vengono presentati alcuni risultati in un punto d'esercizio tipico, ossia a pieno regime e al momento di coppia massima.

Mezzo filtrante	Filtro alveolare ceramico	Filtro a maglia di filamenti	Filtro ad avvolgimento di filamenti	Filtro metallico a sintrizzazione
Grado di precipitazione grav. %	92,4	88,8	87,5	95,3
Grado di precipitazione EMD %	99,0	90,8	93,4	99,0
Penetrazione totale in %	7,7	9,8	9,5	14,4
Grado di trasformazione FOS %	66	55,4	72	79
Perdita di pressione mbar	12	61	41	56
Volume filtro l/KW	1,25	0,3	0,67	0,26

A causa della breve disponibilità dei filtri per l'esame, questi non erano ottimizzati, di grandezze diverse e hanno quindi presentato perdite di pressione molto diverse. Nel caso del filtro ceramico la differenza è pure dovuta al fatto che questo è previsto per la rigenerazione periodica con riscaldamento elettrico, quindi per l'immagazzinamento durante almeno un turno lavorativo.

Per quanto concerne il grado di precipitazione del filtro sono risultate delle somiglianze molto strette: dal punto di vista gravimetrico è stato raggiunto quasi dappertutto il 90%. Per quanto concerne l'EMD è stato superato il 90% ed alcuni filtri hanno perfino raggiunto il 99%. Anche per quanto concerne la penetrazione, che tiene conto della deposizione del particolato fine, la maggior parte dei filtri hanno dato dei buoni risultati. Come era da attendersi, tutti i filtri hanno permesso di ottenere un'evidente riduzione degli idrocarburi aggregati SOF.

Gli idrocarburi volatili e il CO sono stati ridotti solo dal filtro alveolare ceramico, dotato di un rivestimento in metallo prezioso avente effetto catalitico. Questo rivestimento sarebbe pure applicabile agli altri filtri.

Il valore degli ossidi d'azoto si è di poco modificato. Esso è di regola stato ridotto lievemente grazie alla contropressione un po' maggiore.

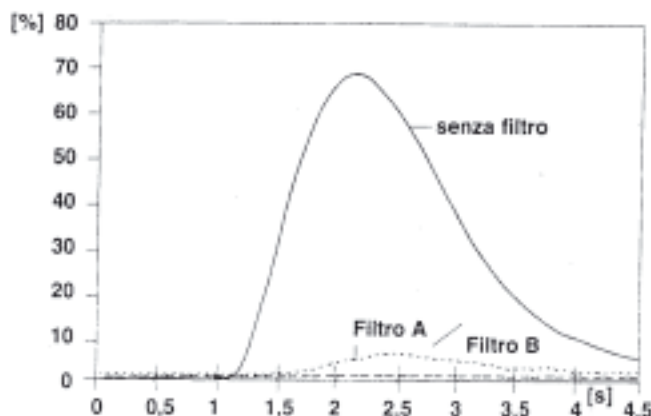


Figura 12: opacità a valle del filtro confrontata con l'opacità in accelerazione libera senza filtro.

Anche le misurazioni effettuate in condizioni variabili, durante l'accelerazione libera e l'accelerazione del trasduttore, evidenziano nella figura 12 l'elevata qualità dei filtri per quanto concerne l'eliminazione del particolato. Questo risultato ha un significato particolare perché il metodo della misurazione dell'emissione di fumo durante l'accelerazione - conformemente all'ordinanza sulla manutenzione degli autoveicoli Diesel [12] - si presta particolarmente bene per l'esame della qualità del filtro impiegato in condizioni reali.

Ciò ha permesso di provare che filtri buoni ritengono il particolato in modo efficiente tanto durante l'alternanza rapida di carico e dei giri quanto durante l'impiego in condizioni stazionarie.

Il procedimento della gravimetria tiene conto in particolare del particolato di grandi dimensioni. L'opacimetria rileva solo il particolato che risulta alla luce visibile. Per ottenere dei risultati per quanto concerne il particolato fine <300 nm si è dovuto pertanto impiegare l'analisi mobile differenziata che permette di fare delle asserzioni attendibili fino a dimensioni di 20 nm circa. Il risultato, nuovamente per punto d'esercizio del momento di coppia massimo, è evidenziato dalla figura 13 sotto forma della penetrazione. Le caratteristiche di precipitazione sono abbastanza diverse. Solo un filtro ha sempre presentato una caratteristica piatta, ossia ritiene il particolato fine con altrettanta efficienza di quello più grande.

Il numero maggiore dei filtri ha presentato una tendenza al peggioramento del rendimento per il particolato inferiore a 30 - 40 nm e in due casi perfino a partire da 70 nm. L'importanza tossicologica di questo risultato è ancora controversa. Sulla base di queste conoscenze ci sembra quindi importante favorire quei filtri che ritengono in modo efficiente anche le particelle finissime alle quali viene attribuito il potenziale tossico maggiore.

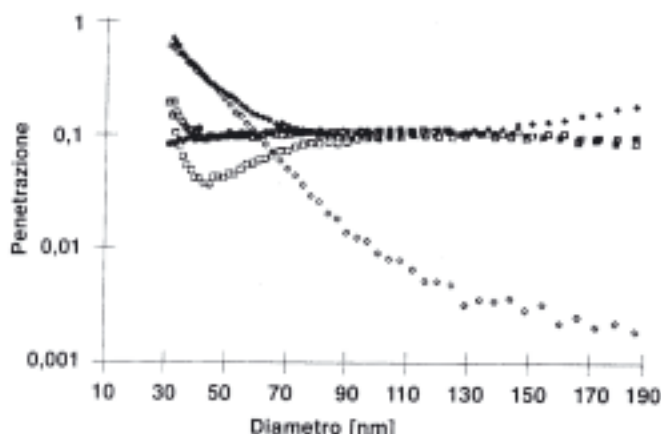


Figura 13: penetrazione del particolato a dipendenza del diametro di mobilità per 5 diversi filtri per particolato

L'esame dei procedimenti di rigenerazione non è ancora stato concluso. Su di esso si riferirà in uno dei prossimi bollettini.



## 8. Esperienze fatte con i filtri per particolato durante l'impiego reale

Nel quadro del programma di valutazione VERT vengono effettuate delle prove in condizioni reali a partire dalla metà del 1995.

Sono però disponibili vaste esperienze derivanti da una prova di filtri per particolato effettuata su larga scala in Germania, alla quale hanno partecipato per 2 anni numerosi produttori di filtri e di veicoli. Le applicazioni si riferivano per la maggior parte ai camion e ai bus. La relazione intermedia e finale [11] valuta positivamente i risultati ottenuti.

Per alcuni tipi di filtro si è potuto constatare un lieve peggioramento sistematico nel corso dei due anni d'impiego (figura 14) ma l'efficienza dei filtri è risultata in complesso buona e la sicurezza - tenendo conto del carattere di prototipo di queste installazioni - era da considerare soddisfacente.

N. di Bosch

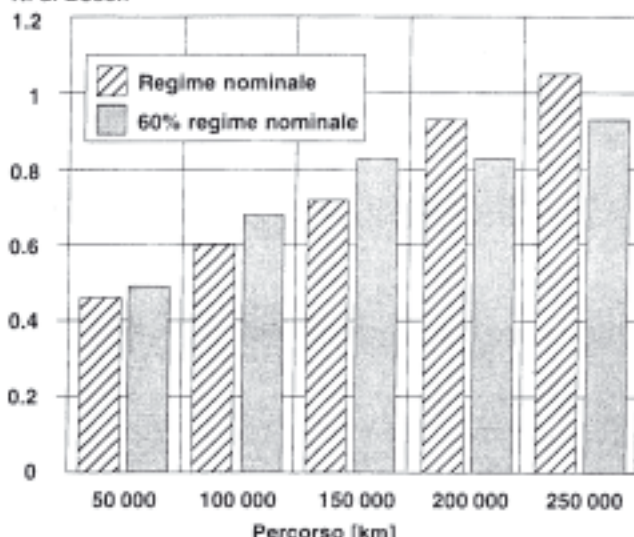


Figura 14: densità ottica media di tutti i veicoli dotati di filtro ceramico ad avvolgimento rilevato nel corso della prova su larga scala UBA.

La maggior parte dei produttori ha utilizzato le esperienze risultate da questa prova per sviluppare ulteriormente i loro sistemi di filtraggio per cui oggi sono disponibili dei sistemi notevolmente migliorati sui quali possiamo basarci per l'attrezzatura in un secondo tempo di macchine da cantiere nella costruzione di gallerie.

## 9. Stato tecnico dei filtri per particolato

Sulla base delle prove eseguite nel corso del progetto su due motori e delle esperienze dei produttori di filtri che vi hanno partecipato, lo stato tecnico attualmente raggiunto dai filtri per particolato può essere caratterizzato nel modo seguente:

- grado di precipitazione gravimetrico > 85 %
- grado di separazione del carbonio complessivo > 90%
- emissione del carbonio complessivo < 0,05 g/kWh
- perdita di pressione del filtro senza deposito < 50 mbar
- perdita di pressione del filtro con deposito massimo < 150 mbar
- volume del filtro < 0,6 l/kWh
- attenuazione del rumore > 25 db(A)
- prezzo e costi d'installazione:

al di sotto di 100 kW: < 125 CHF/kW

al di sopra di 100 kW: < 100 CHF/kW

- costi annui di manutenzione < 15 % del costo del filtro
- durata di vita > 6000 ore d'esercizio
- durata d'impiego > 2000 ore d'esercizio (pulizia dell'elemento filtrante)
- intervallo per la manutenzione > 500 ore d'esercizio

Sono quindi soddisfatte le premesse più importanti per l'impiego in galleria, delle quali non si può fare a meno dal punto di vista del progetto VERT. Questo elenco può essere considerato un mansuario approssimativo per la scelta ed eventualmente per l'adattamento di sistemi di filtraggio per l'impiego in macchine da cantiere nella costruzione di gallerie.

\*\*\*

### Letteratura:

1. Krebsrisiko von Diesel und Benzinmotorabgasen, Schriftenreihe UFAFP/Svizzera, n. 222
2. Bollettino VERT 1, giugno 1995
3. RTSP 554, Emissioni di motori Diesel (EMD)
4. Charakterisierung der partikelförmigen Emissionen von Dieselmotoren, K.H. Zierock, Staubreinigung der Luft 43 (1983)
5. Dieselmotorabgas - Entstehung und Messung, H. Klingenberg, VDI-Berichte n. 888, 1991
6. Möglichkeiten der Schadstoff-Minimierung bei Dieselmotoren, K. Obländer, VDI-Berichte n. 888, 1991
7. Gestrickte Strukturen aus Endlosfasern für die Abgasreinigung, A. Meyer et al., MTZ 56(1995) 2
8. Diesel Exhaust Aftertreatment 1995, SP-1073 SAE Detroit 1995
9. Verminderung der Abgasemission von Dieselmotoren durch Partikelfilter und Abgaskatalysatoren, G. Lepperhoff, MTZ 55(1994) 12
10. Particle Size Distribution Downstream Traps of Different Design, SAE 950373, H. Egli et al.
11. Konzept und Ergebnisse des Partikelfilter-Grossversuchs der Bundesrepublik Deutschland, UBA Berlin und TÜV Rheinland, 12/1994
12. Ordinanza del 22 dicembre 1993 sulla manutenzione e il controllo successivo degli autoveicoli per quanto concerne le emissioni dei gas di scarico e di fumo

### Abbreviazioni:

- EMD Emissioni dei motori Diesel  
 INSAI Istituto nazionale svizzero di assicurazione contro gli infortuni  
 AUVA Allg. Unfallversicherungsanstalt/Österreich  
 TBG Tiefbau-Berufsgenossenschaft/Deutschland  
 UFAFP Ufficio federale dell'ambiente, delle foreste e del paesaggio  
 MAC Concentrazione massima sul posto di lavoro  
 FCF Filtro a combustione di fuliggine  
 CIT Concentrazione indicativa tecnica  
 RTSP Regole tecniche per le sostanze pericolose  
 FOS Frazione organica solubile  
 UBA Umwelt-Bundesamt Deutschland

### Direzione del progetto:

Studio d'ingegneria TTM, A. Mayer, Fohrhölzistr. 14b,  
 CH-5443 Niederrohrdorf  
 Tel. 0041(56)951414, Fax 0041(56)951415

### Commissione dei committenti del progetto:

AUVA: E. Bigga, A/0043(3842)24317  
 TBG: Prof. Dr. Kieser, D/0049(761)73135  
 INSAI: W. Scheidegger, CH/0041(41)419 50 60

### Ordinazione dei bollettini:

AUVA: Allgemeine Unfallversicherungsanstalt  
 Abteilung für Unfallverhütung und Berufskrankheitsbekämpfung  
 Adalbert-Stiftstr. 65, A-1200 Wien (Frau Radosztics)  
 Tel.: 0222-33111-418, Fax: 0222-33111-347  
 Numero d'ordinazione AUVA-Report 4/2  
 TBG: Tiefbau-Berufsgenossenschaft, Am Knie 6,  
 D-81241 München, Tel.: (089)8897 505, Fax: (089)8897 494  
 INSAI: Istituto nazionale svizzero di assicurazione contro gli infortuni, Servizio clientela, casella postale, 6002 Lucerna,  
 Tel.: 041(419 58 51, Fax: (041)419 59 17