



**SISTEMI DI FILTRAZIONE
DEL PARTICOLATO EMESSO DA MOTORI
DIESEL**

Prof. Ing. Vittorio Rocco



SOMMARIO

1. FORMAZIONE ED ABBATTIMENTO DEGLI INQUINANTI NEI MOTORI DIESEL	3
1.1. Generalità; normativa	3
1.2. Principali meccanismi di formazione degli inquinanti nei motori Diesel ...	4
1.3. Abbattimento delle emissioni inquinanti attraverso interventi motoristici	8
1.4. Abbattimento delle emissioni inquinanti attraverso l'adozione di sistemi di post-trattamento	10
2. FILTRI PER PARTICOLATO.....	14
2.1. Materiali impiegati e configurazioni geometriche	14
2.2. Il filtro wall-flow ceramico	15
2.3. Il filtro non-blocking a supporto metallico	17
2.4. Rigenerazione dei filtri per particolato	19
2.5. Rigenerazione assistita mediante additivi	20
2.6. Rigenerazione assistita mediante washcoated filter	21
2.7. Rigenerazione passiva CRT	23

1. FORMAZIONE ED ABBATTIMENTO DEGLI INQUINANTI NEI MOTORI DIESEL

1.1. Generalità; normativa

La formazione degli inquinanti durante il processo di combustione in un Diesel è fortemente influenzata dalla disomogeneità della carica dovuta alla distribuzione del combustibile in seno all'aria variabile nel tempo.

Le specie inquinanti prodotte da tale tipologia di motore sono:

- il monossido di carbonio CO;
- gli idrocarburi incombusti o solo parzialmente combusti HC;
- gli ossidi di azoto NO_x;
- il particolato (PM, Particulate Matter), costituito da particelle solide di materiale carbonioso e ceneri (*soot*), il cui insieme è detto SOLC , composti volatili organici (idrocarburi) e adsorbiti il cui insieme è detto SOF, e particelle di natura inorganica principalmente a base di zolfo; la composizione del particolato (Figura 1) dipende fortemente dalla tipologia di motore in esame e dal contenuto di zolfo del combustibile;
- gli ossidi di zolfo SO_x.

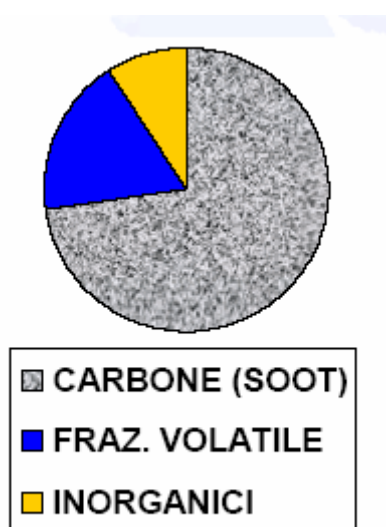


Figura 1: tipica composizione del particolato emesso da motori Diesel



Le specie inquinanti descritte precedentemente sono dette regolamentate (in realtà l' SO_x è limitato attraverso la riduzione del contenuto di zolfo del gasolio), perché oggetto di normative continentali o nazionali (Nord-America, Europa, Giappone) che impongono limiti sempre più stringenti sulle quantità di specie inquinanti emesse da parte dei singoli veicoli.

In tabella 1 è riportata l'evoluzione degli standard europei (EURO) e le relative date di entrata in vigore; ulteriori informazioni sulle normative mondiali possono essere tratte da <http://www.dieselnet.com/standards.html> .

<i>Diesel cars/ [g/km]</i>					
Standard	Year	HC+NO _x	NO _x	CO	PM
Euro I	1992	0.97	-	2.72	0.14
Euro I	1996	0.7	-	1.0	0.08
Euro II-DI	1999	0.9	-	1.0	0.10
Euro III	2000	0.56	0.50	0.64	0.05
Euro IV	2005	0.3	0.25	0.50	0.025
<i>Light duty trucks [g/km]</i>					
Class	Year	HC+NO _x	NO _x	CO	PM
I (<1305kg)	1994	0.97	-	2.72	0.14
	2000	0.56	0.50	0.64	0.05
	2005	0.30	0.25	0.50	0.025
II (1305-1760kg)	1994	1.40	-	5.17	0.19
	2001	0.72	0.65	0.80	0.07
	2006	0.39	0.33	0.63	0.04
III (>1760kg)	1994	1.70	-	6.90	0.25
	2001	0.86	0.78	0.95	0.10
	2006	0.46	0.39	0.74	0.06
<i>Heavy duty diesel trucks / [g/kWh]</i>					
Standard	Year&category	HC+NO _x	NO _x	CO	PM
Euro I	1992<85kW	1.1	8.0	4.5	0.612
	1992>85kW	1.1	8.0	4.5	0.36
Euro II	1996.10	1.1	7.0	4.0	0.25
	1998.10	1.1	7.0	4.0	0.15
Euro III	2000.10	0.66	5.0	2.1	0.10
Euro IV	2005.10	0.46	3.5	1.5	0.02
Euro V	2008.10	0.46	2.0	1.5	0.02

Tabella 1: standard europei relativi all'emissione di inquinanti di veicoli equipaggiati con motori Diesel

1.2. Principali meccanismi di formazione degli inquinanti nei motori Diesel

Come accennato nel numero precedente, l'analisi dei processi di iniezione, formazione e combustione della carica è fondamentale per capire i meccanismi che sono alla base della formazione degli inquinanti in questa tipologia di motori.

In Figura 2 è riportata una tipica curva di rilascio del calore durante un ciclo Diesel in funzione dell'angolo di manovella (CA, *Crank Angle*) (Dec, Johnson 2002), Pubblicazione Corning Hypothesis).

Si riconoscono le fasi di iniezione (alzata spillo), le fasi di combustione premiscelata, in corrispondenza del primo picco della curva di rilascio del calore e diffusiva (o *mixing-controlled*), in corrispondenza del secondo picco della curva di rilascio del calore.

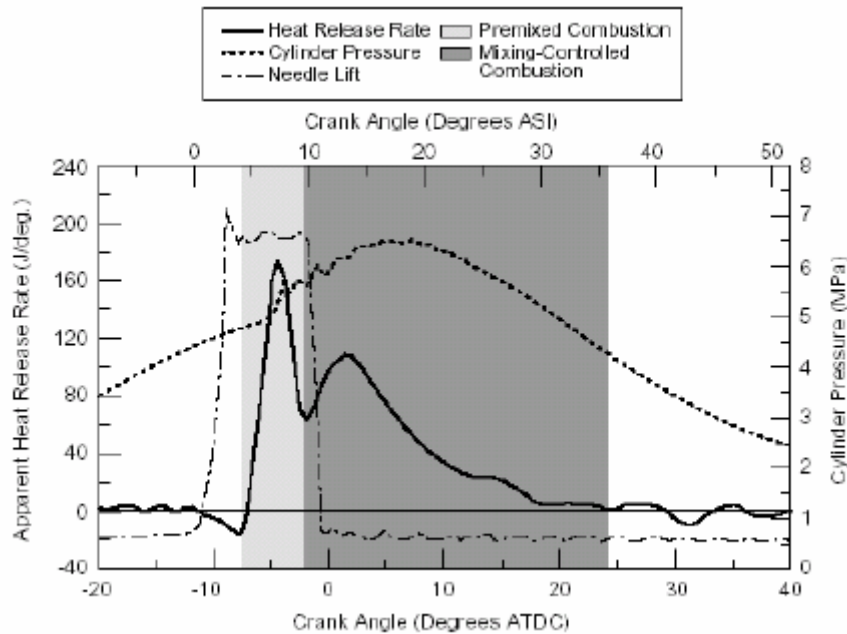


Figura 2: curva di rilascio del calore durante il processo di combustione in un motore Diesel

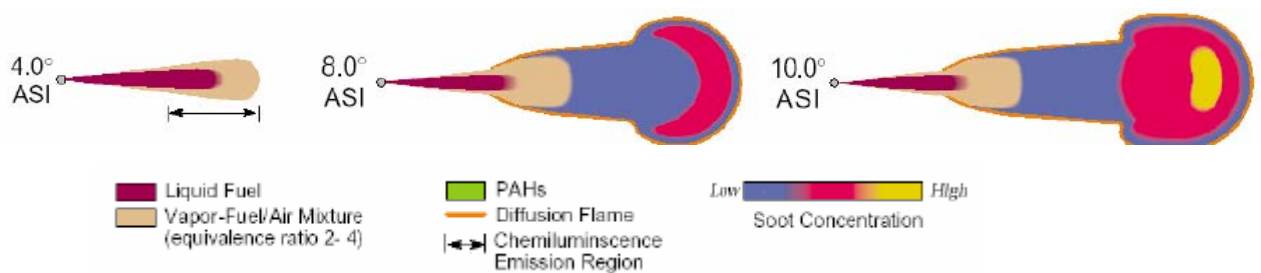


Figura 3: schema di formazione degli inquinanti nello spray

In Figura 3 è riportata la forma dello spray durante la fase di iniezione: si riconoscono tre momenti fondamentali:

- 4 gradi CA (Crank Angle) ASI (After Start of Injection): la curva di rilascio del calore percorre la valle iniziale;

- 8 gradi CA ASI: la curva di rilascio del calore presenta un primo picco: tale fase viene indicata come premiscelata;
- 10 gradi CA ASI: inizio della fase di combustione diffusiva: tale struttura viene mantenuta fino alla fine dell'iniezione.

La fase premiscelata e diffusiva contribuiscono in maniera radicalmente differente alla formazione degli inquinanti (Dec, Flynn et al.):

- durante la fase premiscelata la parte ricca della miscela brucia, genera i precursori del particolato e si consuma tutto l'ossigeno richiamato;
- durante la fase diffusiva, alimentata dai gas caldi residui della fase premiscelata, si forma la maggior parte dei NOx; durante tale fase il particolato può essere ossidato se la durata della fiamma diffusiva e la disponibilità di ossigeno lo consentono (Figura 4) (Dec et al.); la formazione di particolato è dunque il risultato di un equilibrio dinamico tra i meccanismi di formazione e di ossidazione.

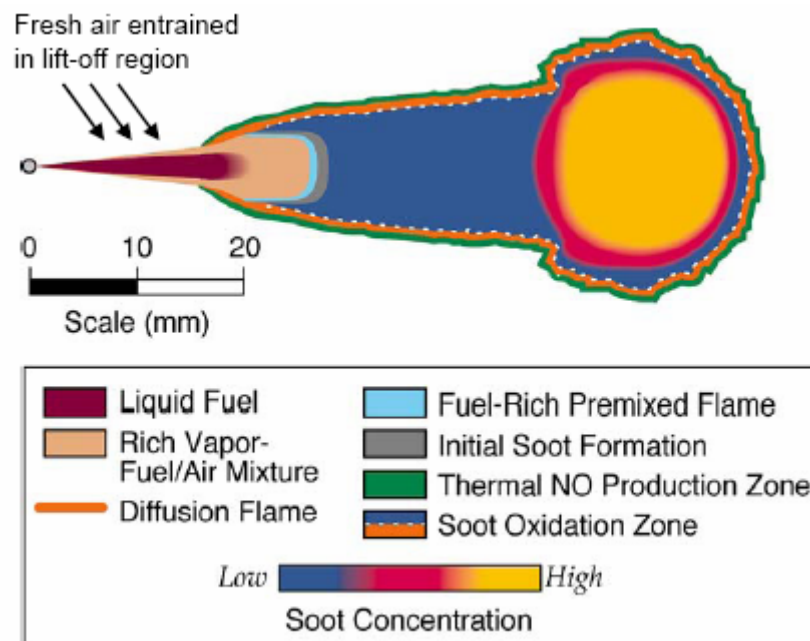


Figura 4: zona di ossidazione del particolato e meccanismo di inglobamento dell'aria

Ulteriore approfondimento merita il meccanismo di formazione del particolato.

La formazione del particolato può essere suddivisa secondo tre fasi: formazione dei nuclei precursori, crescita di dimensioni dei nuclei carboniosi, ed accumulazione in particelle di diametro maggiore.

La distribuzione dei diametri delle particelle risulta tipicamente bimodale; i due modi vengono detti di nucleazione ed accumulazione (Figura 5).

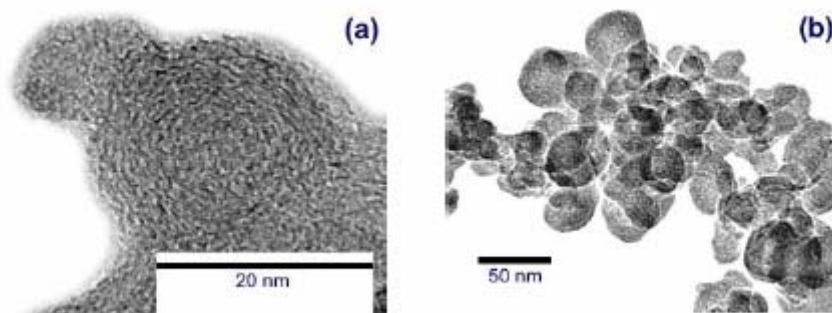


Figura 5: immagini TEM dei modi di nucleazione (a) ed agglomerazione (b)

Le particelle relative al modo di nucleazione hanno origine da sfere carboniose di diametro compreso tra 3-30 nm; tale modo contiene 1-20% in massa del totale e più del 90% del numero totale di particelle; la presenza di zolfo nel combustibile può facilitare la formazione di particolato relativa a questo modo.

Le particelle relative al modo di accumulazione sono invece formate da agglomerati di particelle appartenenti al modo di nucleazione (30-500 nm); tale fenomeno può anche avvenire in misura ridotta a causa dell'elevato tempo richiesto perché avvenga il fenomeno rispetto al tempo caratteristico associato al fenomeno della combustione.

La qualità dello spray, in termini di dimensione delle gocce, risulta di fondamentale importanza ai fini della formazione del particolato, dato che la quantità aumenta con la dimensione delle gocce (Watarabe et al., Baumgard et al.): a tal proposito, in tabella sono riportati i principali parametri che ne favoriscono la formazione.



Formation of insoluble fraction favored by:	<ul style="list-style-type: none"> • Elevated temperature • High pressure • Absence of oxygen
Oxidation of insoluble fraction favored by:	<ul style="list-style-type: none"> • Elevated temperature • High pressure • Presence of Oxygen
Formation of HC particles favored by:	<ul style="list-style-type: none"> • Lean mixture zones • Temperatures below the flammability limit • Hydrocarbons layers on the walls of the bowl • Fuel droplets seeping at the nozzle tip
Sources of particles from lubricant:	<ul style="list-style-type: none"> • Surface of cylinder liners • Valve stem gaskets • Turbo-compressor gaskets • Recycling of crankcase ventilation gases to inlet

Tabella 2: influenza dei principali parametri sulla formazione del particolato

Il particolato è anche composto da una frazione organica solubile (SOF), composta tipicamente da idrocarburi provenienti dall’olio lubrificante e da composti organici ad alto peso molecolare adsorbiti sulle particelle carboniose.

La SOF merita speciale riguardo poiché contiene la maggior parte dei PAH, composti notoriamente cancerogeni, emessi dai motori Diesel.

1.3. Abbattimento delle emissioni inquinanti attraverso interventi motoristici

Il miglioramento e l’ottimizzazione del processo di iniezione consentono di controllare, anche se non oltre un certo limite, gli inquinanti emessi; in particolare, di recente sono state introdotte strategie di iniezione multiple separando la fase di iniezione in più sottofasi indipendente (*split injections*): in Figura 6 è riportata una strategia che utilizza fino a 5 iniezioni per ciclo, e la gestione in funzione di carico e velocità del motore.

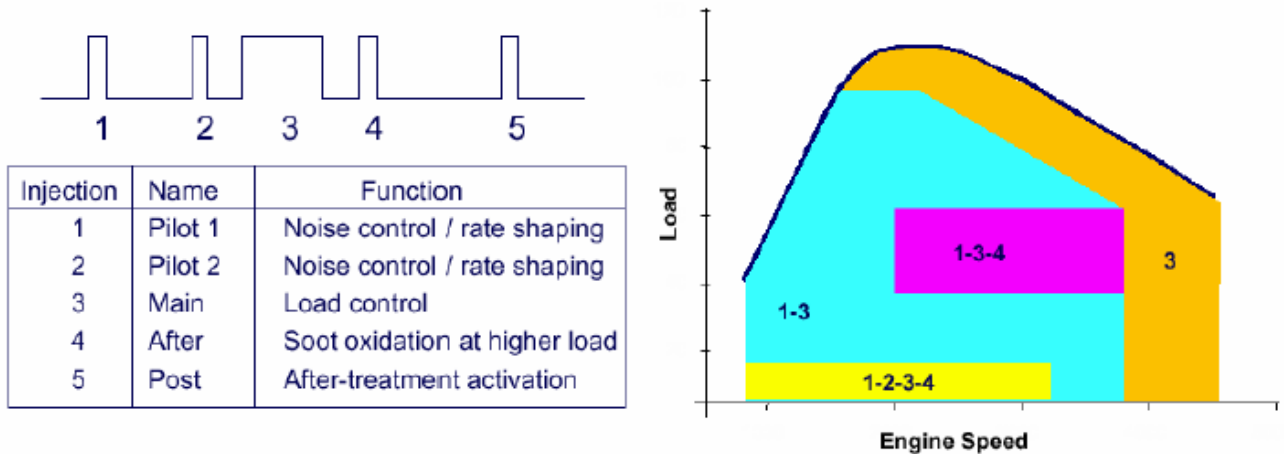


Figura 6: strategie multiple di iniezione

Il miglioramento in termini di emissioni inquinanti è riportato in Figura 7

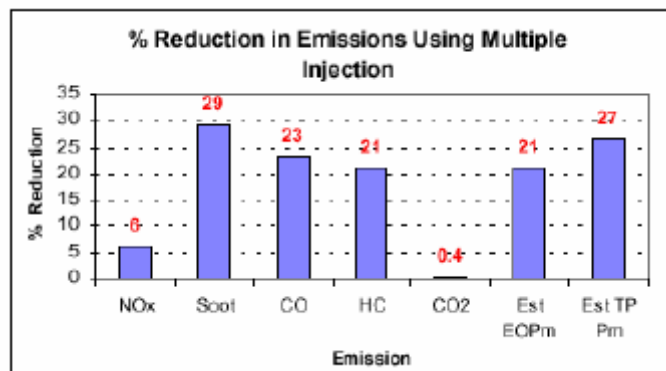


Figura 7: strategie multiple di iniezione

La gestione di iniezioni multiple permette di controllare anche il rumore prodotto dal motore, che normalmente dipende dall'entità del picco di rilascio del calore relativo alla fase premiscelata.

Un altro intervento atto alla riduzione dell'emissione di particolato consiste nella diminuzione del diametro degli orifizi degli iniettori: in Figura 8 le zone colorate sono associate alla presenza di particolato, mentre le zone grigie sono correlate alla combustione; l'orifizio di diametro pari a 45 µm mostra una formazione di soot di entità trascurabile con e senza EGR. Tale miglioramento è associato alla presenza di un migliore mixing tra aria e combustibile.

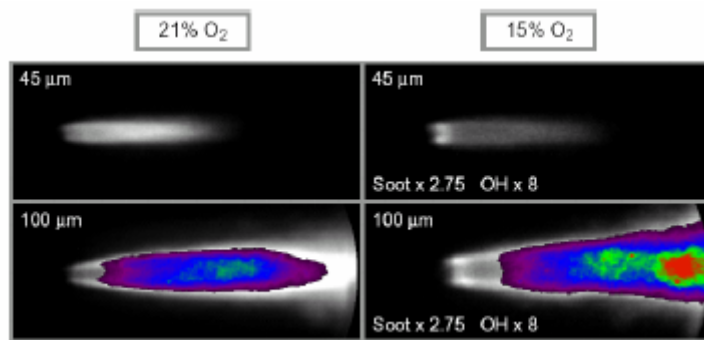


Figura 8: formazione di soot (zone colorate) relative ad iniettori con orifizi di diverso diametro

Infine, l'adozione di elevate pressioni di iniezioni e di elevate quantità di EGR permette di diminuire drasticamente sia i NOx che il particolato (Figura 9)

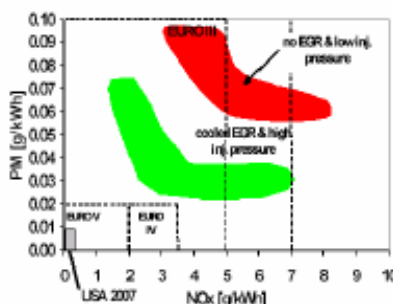


Figura 9: emissione di NOx e particolato con l'introduzione di elevate pressioni di iniezione di EGR raffreddato

tale intervento, utilizzato insieme alla strategia ad iniezioni multiple, permette di superare le normative EURO IV, specie per quanto riguarda motori di cilindrata limitata.

1.4. Abbattimento delle emissioni inquinanti attraverso l'adozione di sistemi di post-trattamento

Come accennato nel precedente paragrafo, interventi motoristici non sono di norma sufficienti a garantire l'ottemperanza alle normative imposte; si rende pertanto necessaria l'adozione di diversi dispositivi di post-trattamento. Lo studio e l'ottimizzazione di detti dispositivi risulta di particolare interesse soprattutto al fine di garantirne affidabilità, durata e soprattutto di limitarne il costo: esso difatti costituisce un puro aggravio in virtù del limitato potere attrattivo nei confronti del cliente.

- Catalizzatori ossidanti

I catalizzatori ossidanti sono dispositivi efficaci per il controllo delle emissioni di CO ed HC (inclusi i PAH, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons e le aldeidi). Riescono inoltre ad ossidare la SOF del particolato; sebbene l'efficienza di conversione sia decisamente ridotta rispetto ai filtri, detti dispositivi hanno permesso negli anni passati di ottemperare alle normative vigenti attualmente.

La tipologia più diffusa di catalizzatore ossidante impiega una struttura ad *honeycomb* a supporto ceramico; i metalli nobili (Pt, Pd) sono impregnati su un *wash-coat* poroso di allumina spesso 20-40 μm (Figura 10). Sarebbe preferibile altresì l'utilizzo di Pd impregnato su un washcoat di silice per minimizzare la produzione di solfati.

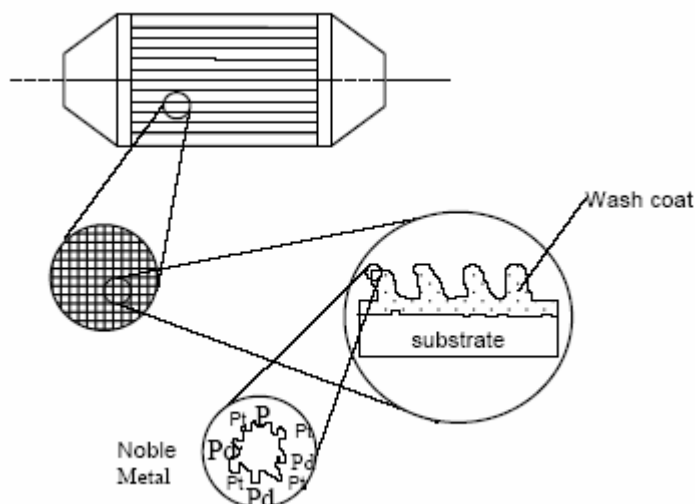


Figura 10: struttura di un catalizzatore ossidante ad *honeycomb*

- Dispositivi per la riduzione dei NO_x

La riduzione catalitica dei NO_x in ambiente ossidante risulta particolarmente ardua, data la limitata disponibilità di CO e la competizione con l'O₂ per quanto riguarda le reazioni con gli HC.

Una tecnologia promettente si basa invece sull'immagazzinamento dei NO_x (*NO_x storing*) nel catalizzatore, successivamente convertiti attraverso l'utilizzo saltuario di cicli ricchi accuratamente controllati (Myoshi et al.); in Figura 11 è schematizzato il relativo meccanismo di conversione.

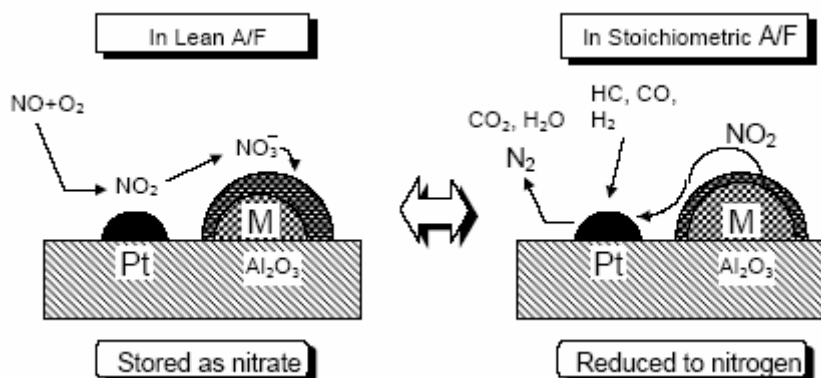


Figura 11: meccanismo *NOx storing* per la riduzione degli NOx

- Filtri per particolato

Lo scopo dei filtri per particolato consiste nell'intercettare le particelle non convertite nel catalizzatore ossidante.

I parametri principali per la valutazione delle prestazioni di un filtro sono l'efficienza di filtrazione e la contropressione, ovvero la differenza di pressione misurata tra le sezioni di ingresso e di uscita del dispositivo, che deve essere minima per non influenzare negativamente le prestazioni del motore ed i consumi.

La caduta di pressione che si genera nella colonna dei gas per l'attraversamento della trappola, aumenta con il crescere della quantità di particolato accumulato sul filtro, rendendo così necessaria, dopo un breve tempo di funzionamento del motore, un'operazione di rigenerazione del filtro stesso.

Questa fase è particolarmente critica poichè, durante la combustione del carbonio, si possono sviluppare gradienti termici e temperature locali talmente elevati, da danneggiare il supporto. Non di rado, difatti, si registrano aumenti di temperatura nel filtro dell'ordine di grandezza di mille gradi in pochi secondi.

Ulteriori problemi derivano dalla posizione della trappola. Infatti, poiché durante le condizioni di marcia normali riscontrabili in circuito urbano la temperatura dei gas di scarico dei motori Diesel raramente raggiunge l'intervallo di temperatura ottimale per promuovere l'innesco della rigenerazione (circa 400-500°C), sarebbe necessario posizionarla tra le valvole di scarico e la turbina di sovralimentazione, ossia nel vano motore. Tuttavia, gli ingombri e le temperature elevate hanno fatto sì che questa soluzione non abbia trovato impiego a bordo delle vetture in commercio: le trappole vengono quindi normalmente collocate nel sottoscocca.



L'efficienza di filtrazione e la contropressione generata allo scarico sono due grandezze dipendenti in quanto, a parità di altre grandezze, un filtro con una più elevata efficienza di filtrazione presenta anche un valore di contropressione maggiore.

In genere le trappole assolvono molto bene anche al compito di abbattere le onde acustiche, per cui la loro adozione rende superfluo l'utilizzo di silenziatori di scarico.

L'entrata in vigore delle prossime normative europee EURO4 (1 gennaio 2006) obbligherà di fatto le case automobilistiche ad adottare tali dispositivi nella quasi totalità dei modelli equipaggiati con motore Diesel.

Dato il forte impatto sul mondo dell'automobile, tale tematica viene affrontata nel dettaglio nel prosieguo.



2. FILTRI PER PARTICOLATO

2.1. Materiali impiegati e configurazioni geometriche

Negli ultimi 15 anni sono comparsi come prototipi e sul mercato diversi sistemi DPF (Diesel Particulate Filters): essi differiscono basilamente per quanto riguarda i materiali utilizzati e la configurazione geometrica, ed anche per la tecnologia di rigenerazione impiegata e le opzioni di controllo e/o monitoraggio.

I materiali del filtro e la sua configurazione geometrica sono un elemento chiave nei sistemi DPF: devono essere difatti oggetto di attenta valutazione la contropressione allo scarico, l'efficienza di intrappolamento del particolato, la facilità di rigenerazione, la durata nel tempo delle prestazioni offerte ed infine, il costo.

I mezzi porosi delle trappole possono essere sia di materiale ceramico che di materiale metallico; tra i supporti ceramici figurano:

- cordierite (estrusi);
- mullite (estrusi, schiume, fibre);
- carburo di silicio (estrusi, schiume, tessuti);
- tialite (estrusi);
- mullite/zirconia (estrusi, schiume);
- mullite/tialite (estrusi, schiume);

mentre tra i materiali metallici figurano:

- metalli sinterizzati;
- reti metalliche;
- schiume metalliche.

Normalmente i materiali utilizzati nei filtri che equipaggiano le vetture attualmente in commercio sono: tradizionalmente la cordierite e, più recentemente, il carburo di silicio.

Il carburo di silicio presenta una miglior resistenza ad elevata temperatura, ma un maggior peso ed un costo più elevato.

Le differenti configurazioni geometriche e le relative caratteristiche sono riportate in tabella 3



Type of trap	Efficiency %	Advantages	Drawbacks
Ceramic monolith	60 – 95	<ul style="list-style-type: none"> • High efficiency • Moderate cost • Can be covered with catalyst 	<ul style="list-style-type: none"> • Moderate ΔP • High ΔP gradient • Subject to thermal shock cracking
Aluminated metallic sponge (precious metal catalyst)	50 – 80	<ul style="list-style-type: none"> • Low ΔP gradient • Self regenerable • Reduces (HC, CO and odor) 	<ul style="list-style-type: none"> • Moderate ΔP • Low efficiency especially at high speed • Produce sulfates
Ceramic foam	30 – 75	<ul style="list-style-type: none"> • Good thermal shock resistance • Can be covered with catalyst 	<ul style="list-style-type: none"> • Regeneration difficult • Very high ΔP • Low efficiency
Ceramic fiber sponge	>75	<ul style="list-style-type: none"> • Very high efficiency • Good thermal shock resistance 	<ul style="list-style-type: none"> • Fiber disintegration • High ΔP gradient • Large volume and weight
Woven silica fiber coil filter	>75	<ul style="list-style-type: none"> • Good thermal shock resistance • Low ΔP • High efficiency 	<ul style="list-style-type: none"> • Large volume demand

Tabella 3: tipologie di trappole per particolato

La tipologia di gran lunga più usata è il *wall-flow ceramic monolith*, la cui tecnologia di produzione è patrimonio di un ristretto numero di produttori (Corning Glass ed NGK).

Ultimamente è comparsa sul mercato una nuova tipologia di filtri a supporto metallico detti non-blocking a bassa contropressione allo scarico, il cui principio di funzionamento verrà analizzato nel prosieguo.

2.2. Il filtro *wall-flow* ceramico

I filtri di tipo *wall-flow* a supporto ceramico sono direttamente derivati dai supporti flow-through utilizzati per i tradizionali catalizzatori a struttura ad *honeycomb*, avendone ostruito alternativamente le sezioni di ingresso ed uscita di ogni singolo canale con l'obiettivo di forzare il moto dei gas esausti attraverso l'elemento filtrante permettendo così la rimozione meccanica delle particelle: in Figura 12 ne è riportato il principio di funzionamento.

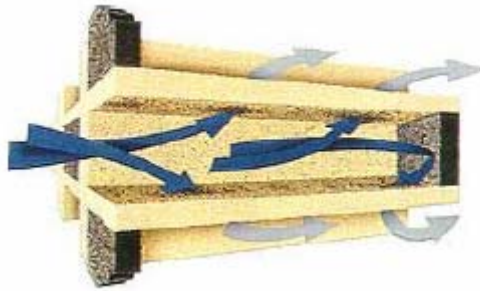


Figura 12: principio di funzionamento di una trappola *wall-flow* a supporto ceramico

I meccanismi di intercettazione del particolato possono essere classificati come segue:

- *depth filtration*, ossia le particelle di dimensione minore degli elementi porosi del filtro si depositano all'interno del materiale filtrante attraverso l'azione di differenti campi di forze;
- *cake filtration*, ossia le particelle di dimensione maggiore degli elementi porosi del filtro, si depositano sul muro dell'elemento filtrante essendo bloccati meccanicamente.

I meccanismi illustrati possono essere riconosciuti nell'immagine SEM di Figura 13

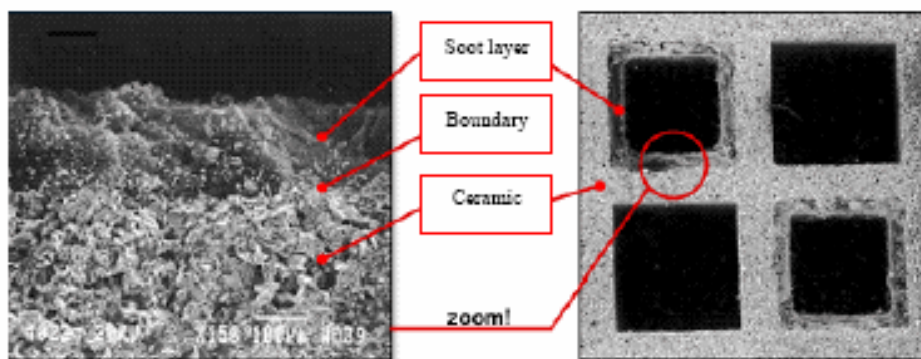


Figura 13: immagine SEM della sezione trasversale di un filtro sporco

La *depth filtration* avviene secondo i meccanismi riportati nelle Figure 14, 15 e 16.

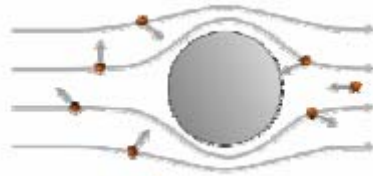


Figura 14: meccanismo di *depth filtration: diffusional deposition*

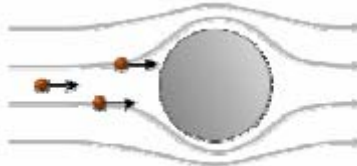


Figura 15: meccanismo di *depth filtration: inertial deposition*

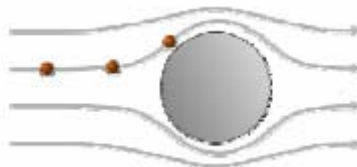


Figura 16: meccanismo di *depth filtration: streamline interception*

La *diffusional deposition* dipende dal moto browniano associato alle particelle di diametro minore di $0.3 \mu\text{m}$: queste particelle non si muovono in maniera coerente con le linee di flusso, ma diffondono verso la superficie del corpo intercettatore.

La *inertial deposition* è importante per particelle di massa elevata (ovvero di diametro elevato). Le particelle collidono contro il corpo intercettatore poichè per via della propria inerzia non riescono a seguire le linee di flusso.

La *streamline interception* può avvenire qualora la particella segua linee di flusso molto vicine al corpo intercettatore, e toccandolo possano essere da esso bloccate.

2.3. Il filtro non-blocking a supporto metallico

Le trappole di tipo *wall-flow* descritte rappresentano ad oggi la tecnologia più efficace per ridurre le emissioni di particolato con l'obiettivo di ottemperare alle più stringenti normative. Esse difatti sono caratterizzate da un'elevata efficienza di filtrazione, ma anche

dal provocare un'elevata contropressione in corrispondenza degli elementi filtranti e variabile nel tempo in funzione del carico di particolato.

Una possibile soluzione potrebbe consistere nell'adozione di un filtro *non-blocking* a supporto metallico: in Figura 17

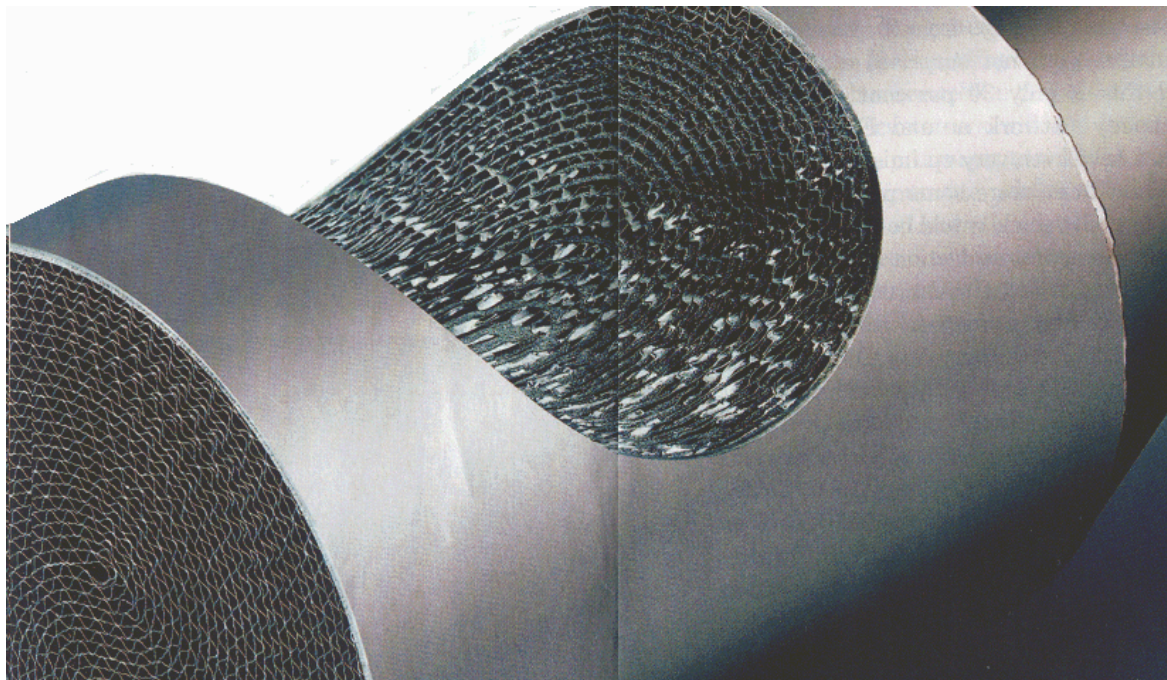


Figura 17: filtro *non-blocking* a supporto metallico

Il dispositivo riportato è realizzato mediante lamine corrugate, assemblate e sagomate in maniera da poter riempire un cilindro o una forma geometrica assegnata.

All'interno dei canali sono ricavate una serie di palette che forzano localmente il flusso ad attraversare il materiale filtrante permettendo così di intercettare una parte delle particelle contenute nei gas di scarico secondo quanto illustrato in Figura 18.

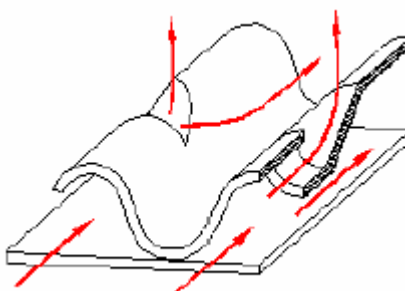


Figura 18: meccanismo di intercettazione del filtro *non-blocking*

Il filtro *non-blocking* permette di ottenere una contropressione limitata allo scarico, specialmente all'aumentare del carico del filtro, anche in condizioni di *clogging*.

2.4. Rigenerazione dei filtri per particolato

Come risulta evidente, la contropressione offerta allo scarico dovuta alla presenza del filtro per particolato nel sistema di scarico del veicolo è una caratteristica negativa, dato che aumenta il consumo di combustibile e diminuisce la coppia motrice massima disponibile.

La contropressione aumenta, inoltre, man mano che il filtro si carica di particolato: l'andamento caratteristico del *loading* è riportato in

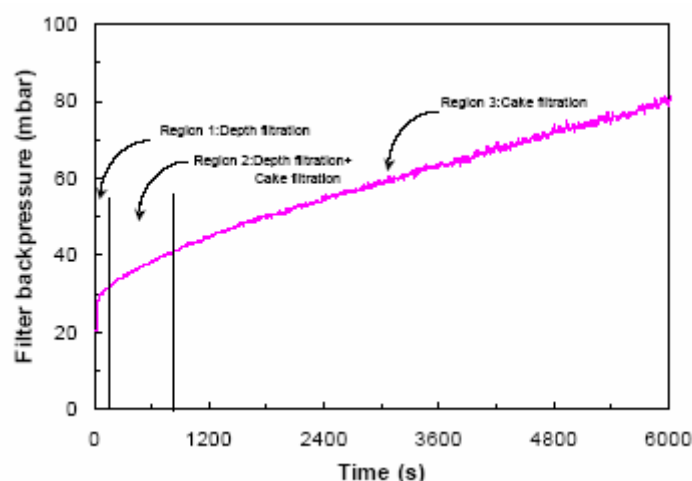


Figura 19: *loading* di un filtro per particolato; il punto di funzionamento del motore è di medio carico e velocità

A causa del fenomeno del *loading*, è necessaria la pulizia periodica del filtro tramite la combustione delle particelle accumulate (rigenerazione del filtro).

Relativamente alle condizioni di portata in massa ed ossigeno tipicamente disponibili allo scarico di un motore Diesel, una completa rigenerazione del filtro richiederebbe una temperatura degli esausti pari a circa 550 °C, difficilmente raggiungibile durante le normali condizioni di guida.

Pertanto, numerose tecniche di rigenerazione sono state sviluppate nel corso degli ultimi 20 anni, le più semplici basate sulla combustione assistita mediante catalizzatori con l'obiettivo di ridurre la temperatura operativa di rigenerazione a circa 450 °C.

I catalizzatori possono essere impiegati sia mediante rivestimento degli elementi filtranti (Farrauto et al., van den Tillaart et al., Neeft et al. 1996, Neft et al. 1997), sia attraverso l'opportuno dosaggio di additivi nel combustibile (Johnson 2000, Kasper et al.).

Altri sistemi invece prevedono la rigenerazione continua del filtro, come ad esempio il CRT (Continuously Regenerating Trap) brevettato da Johnson and Matthey (Cooper et al.) basato sulla combustione del particolato a spese dei NOx presenti nei gas di scarico.

2.5. Rigenerazione assistita mediante additivi

Gli additivi per combustibili tipicamente utilizzati per la rigenerazione assistita sono composti organico-metallici: la parte organica viene ossidata nel cilindro, mentre la parte metallica viene incorporata nelle particelle di particolato sotto forma di composti metallici. Le specie più comunemente utilizzate sono il Cerio ed il Ferro, per il basso costo e la ridotta tossicità.

Sebbene la velocità di ossidazione del particolato sia notevolmente aumentata dalla presenza dell'additivo, gli esausti devono essere ulteriormente riscaldati per ottenere la giusta temperatura di rigenerazione; normalmente si opera sui parametri di iniezione, e si effettua l'opportuno *tuning* sul sovralimentatore per evitare variazioni di bmep con l'obiettivo di non variare le prestazioni del motore.

Il gruppo PSA è stato il primo produttore di automobili ad impiegare questo sistema per la produzione in serie (Salvat et al.); lo schema del sistema è riportato in Figura 20

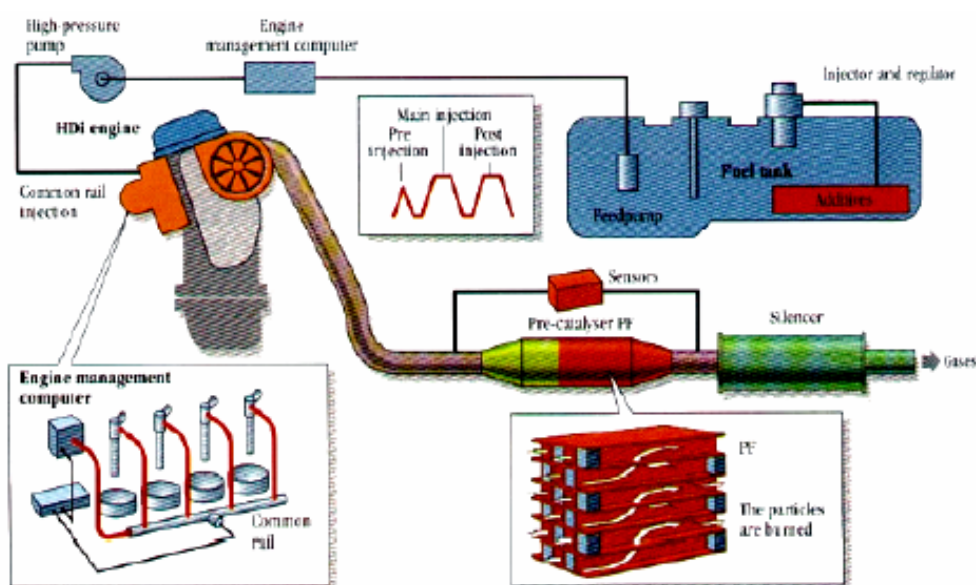


Figura 20: schema del sistema di rigenerazione assistita introdotta da PSA nel 2000



Il sistema è composto da:

- Un filtro *wall-flow* in carburo di silicio;
- Un catalizzatore ossidante a monte del filtro per particolato;
- Un sistema di dosaggio per l’additivo; l’additivo è contenuto in un apposito serbatoio e viene automaticamente mescolato con il combustibile;
- Sensori dedicati ed una ECU specifica per attivare il sistema di gestione apposito del motore e per la diagnostica;

La rigenerazione del filtro avviene ogni 400-500 km, ed è avviata dal sistema di iniezione common-rail. Durante la rigenerazione vengono impiegate tre iniezioni: *pilot*, *main* e *post*; quest’ultima assicura che i gas di scarico abbiano la temperatura desiderata.

L’ulteriore aumento della temperatura degli esausti è assicurata dall’ossidazione degli HC prodotti dalla *post* nel catalizzatore ossidante, il cui ruolo è molto importante a basso carico ed a ridotta velocità

Il buon funzionamento del sistema dipende dalla risoluzione di problemi connessi con la durata del filtro e l’accumulazione di ceneri. Elevati stress termici possono infatti comparire qualora siano presenti elevati gradienti termici, specialmente durante la rigenerazione a bassa space-velocity, che causano microcricche riducendo la durata del filtro. La presenza dell’additivo, invece, provoca il deposito di ulteriori ceneri nel filtro; il serbatoio deve inoltre essere riempito periodicamente. Mediamente ogni 80000 km, pertanto, il filtro deve essere pulito con acqua ed il serbatoio riempito.

Recentemente anche il gruppo VW ha equipaggiato la Passat con il sistema descritto.

2.6. Rigenerazione assistita mediante washcoated filter

I filtri per particolato *washcoated* sono stati sviluppati nei primi anni '80, ed introdotti da Mercedes in California nel 1985. Il filtro utilizzato è un classico *wall-flow* ceramico (in cordierite o carburo di silicio), i cui elementi filtranti sono rivestiti con materiale catalitico (ossidi di metalli Ba, Ca, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, La, Mn, V o metalli nobili Pt, Pd) (Figura 21)

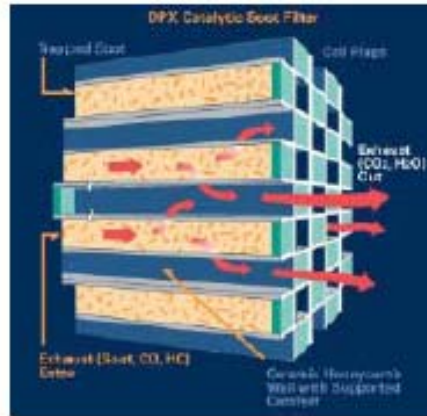


Figura 21: filtro per particolato *washcoated*

I problemi connessi con questa tipologia di filtro sono principalmente due:

- La distanza tra i siti attivi e le particelle carboniose è troppo elevata, quindi l'azione catalitica risulta debole;
- Il materiale catalitico provoca l'ossidazione dell' SO_2 in SO_3 , che può filtrare attraverso il materiale poroso ed essere rilasciato in atmosfera, e con l'acqua può dare luogo ad ulteriori particelle costituite da solfati che possono incrementare le emissioni di particolato.

I *coatings* a sali fusi presentano minori inconvenienti, essendo costituiti da miscele eutettiche di ossidi metallici presenti in fase liquida a temperature relativamente basse; le particelle possono quindi essere bagnate dal catalizzatore, ed è quindi garantito un miglior contatto.

Il recente sviluppo effettuato su questa tecnologia, indicano che il filtro *washcoated*, se combinato con un avanzato sistema di controllo, possa essere una valida alternativa al sistema con additivo; Toyota è stato il primo costruttore ad introdurre il sistema DPNR (Diesel Particulate NOx Reduction, Figura 22) nella produzione di serie sull'Avensis. Il DPNR è costituito da un NOx *adsorber catalyst* impregnato su un tradizionale filtro *wall-flow* a supporto ceramico; il sistema quindi presenta un ingombro limitato.

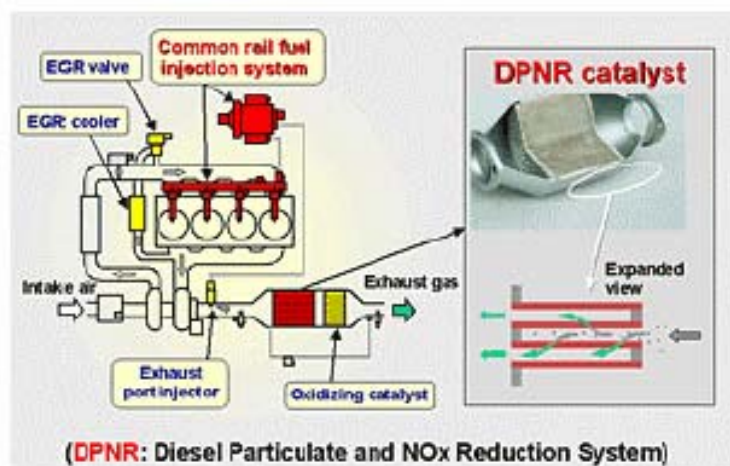


Figura 22: sistema DPNR sviluppato da Toyota

Il DPNR è installato in una posizione *close-coupled* rispetto al motore, e risulta particolarmente efficace grazie all'avanzato sistema di gestione del motore; il motore è equipaggiato con un quinto iniettore collocato nel collettore di scarico, per creare le giuste condizioni operative per il funzionamento. Il sistema richiede gasolio a basso tenore di zolfo, recentemente introdotto in alcuni paesi dell'Unione Europea.

Il sistema DPNR permette di mantenere le emissioni di NO_x e di particolato al di sotto di EURO IV rispettivamente del 50 e del 90 %.

La Umicore ha sviluppato una nuova tecnologia per i filtri *washcoated*; tale sistema viene utilizzato sulle classi C ed E di Mercedes, e non richiede alcun uso di additivi. Anche VW/Audi ha equipaggiato recentemente i propri modelli di punta con filtri *washcoated*.

2.7. Rigenerazione passiva CRT

Il funzionamento del filtro CRT si basa sulla presenza dei NO_x nei gas esausti dei motori Diesel.

Il sistema (Figura 23) è composto da un catalizzatore ossidante a base di Pt ed un filtro per particolato. Il sistema è detto passivo perché non richiede l'utilizzo di fonti di calore supplementari, e richiede combustibile a basso tenore di zolfo per ottenere la riduzione di particolato massima possibile.

Il sistema si basa sul principio dell'ossidazione del particolato tramite l'NO₂, che avviene a più bassa temperatura rispetto all'O₂ (circa 260 °C), e compatibile con il range tipico degli esausti dei motori Diesel.

Il catalizzatore ossidante, posto a monte del filtro, permette l'ossidazione dell'NO in NO₂, che viene utilizzato per la combustione del particolato nel filtro. Il catalizzatore svolge anche le funzioni tradizionali di conversione di HC e CO.

Il filtro può essere *coated* o *uncoated* con Pt per promuovere ulteriormente la reazione di combustione del particolato.

Il sistema risulta affidabile qualora funzioni con un rapporto NO_x/PM di almeno 25.

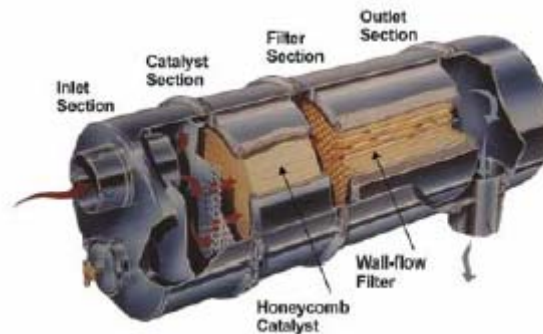


Figura 23: filtro CRT

Tale sistema è molto conveniente se adottato su una trappola *non-blocking* a supporto metallico; in una tale geometria, infatti, l'NO₂ risulta disponibile in tutto il filtro, e non solo a monte degli elementi filtranti, dando la possibilità di effettuare una rigenerazione ancor più efficiente. Tale dispositivo, chiamato *PM-Filter-Catalyst*, sarà presto adottato da MAN nella produzione di serie.



BIBLIOGRAFIA

- G. Stratakis, Experimental Investigation of Catalytic Soot Oxidation and Pressure Drop Characteristics in Wall-Flow Diesel Particulate Filters, *PhD Thesis (2004)*
- J. Dec, A conceptual model of DI diesel combustion based on laser-sheet imaging, *SAE 97087 (1997)*.
- T. Johnson, Hypothesis: HDD Engines will hit EURO IV, V and US 2007 with no more than DOCS (or less), *pubblicazione Corning (2002)*
- P. F. Flynn, R. P. Durrett, G. L. Hunter, A. O. zur Loye, O. C. Akinyemi, J. E. Dec, C. K. Westbrook, Diesel combustion: An integrated view combining laser diagnostics, chemical kinetics, and empirical validation, *SAE 1999-01-0509 (1999)*.
- J. Dec, D. Tree, Diffusion-flame/wall interactions in a heavy-duty DI diesel engine, *SAE 2001-01-1295 (2001)*
- H. Watanabe, T. Tahara, M. Tamanouchi, J. Iida, Study of the effects on exhaust emissions in direct injection diesel engines: Effects of fuel injection system, distillation properties and cetane number, *JSAE Review 19 (1998) 21-26*
- K. Baumgard, J. Johnson, The Effect of fuel and Engine Design on Diesel Exhaust Particle Size Distributions, *SAE paper 960131, (1996)*.
- N. Miyoshi, S. Matsumoto, K. Katoh, N. Takahashi, K. Yokota, M. Sugiura, K. Kasahara, Development of New Concept Three Way Catalyst for Automotive Lean Burn Engines, *SAE paper 950809 (1995)*.
- R.J. Farrauto, K.E. Voss, Monolithic Diesel Oxidation Catalysts, *Applied Catalysis B: Environmental 10 (1996) 29-51. 162*
- J.A.A. van den Tillaart, J. Leyrer, S. Eckhoff, E.S. Lox, Effect of Support Oxide and Noble Metal Precursor on the Activity of Automotive Diesel Catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental 10 (1996) 53-68*.
- J.P.A. Neeft, M. Makkee, J.A. Moulijn, Catalysts for the Oxidation of Soot from Diesel Exhaust gases, An exploratory study, *Applied Catalysis B: Environmental 8 (1996) 57-78*



- J.P.A. Neeft, W. Schiper, M. Makkee and J.A. Moulijn, Feasibility Study towards a Cu/K/Mo/(Cl) soot Oxidation Catalyst for Application in Diesel Exhaust Gases, *Applied Catalysis B: Environmental* 11 (1997) 365-382
- T. V. Johnson, Diesel Emission Control in Review, *SAE paper 2000-01-0184* (2000).
- M. Kasper, K. Sattler, K. Siegmann, U. Matter and H. C. Siegmann: The Influence of Fuel Additives on the Formation of Carbon During Combustion, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 30, (1999), Pages 217-225
- B.J. Cooper, H.J. Jung, J.E. Thoss, Treatment of Diesel Exhaust Gas, *US Patent 4,902,487* (1990).
- O. Salvat, P. Marez, G. Belot, Passenger Car Serial Application of a Particulate Filter System on a Common Rail Direct Injection Diesel Engine, *SAE paper 2000-01-0473* (2000).

