



Abbattimento dei NOx nei Motori Diesel

pp. 352-357 Tecnica dell'Automobile

pp. 361-380 Fondamenti di Tecnica Automobilistica



Perché?



EU-1	EU-2	EU-3	EU-4	EU-5a	EU-5b	EU-6b	EU-6c
1992	1996	2000	2005	2009	2011	2014	2017

Test Cycle



ECE 15.04	ECE 15.05	NEDC	NEDC	NEDC	NEDC	NEDC	WLTC
--------------	--------------	------	------	------	------	------	------

Positive Ignition Engines (Gasoline)	CO	mg/km	2720	2200	2300	1000	1000	1000	1000	1000
	HC	mg/km			200	100	100	100	100	100
	HC + NOx	mg/km	970	500						
	NOx	mg/km			150	80	60	60	60	60
	NMHC	mg/km					68	68	68	68
	PM only GDI	mg/km					5	4,5	4,5	4,5
	PN	#/km							6E12	6E11

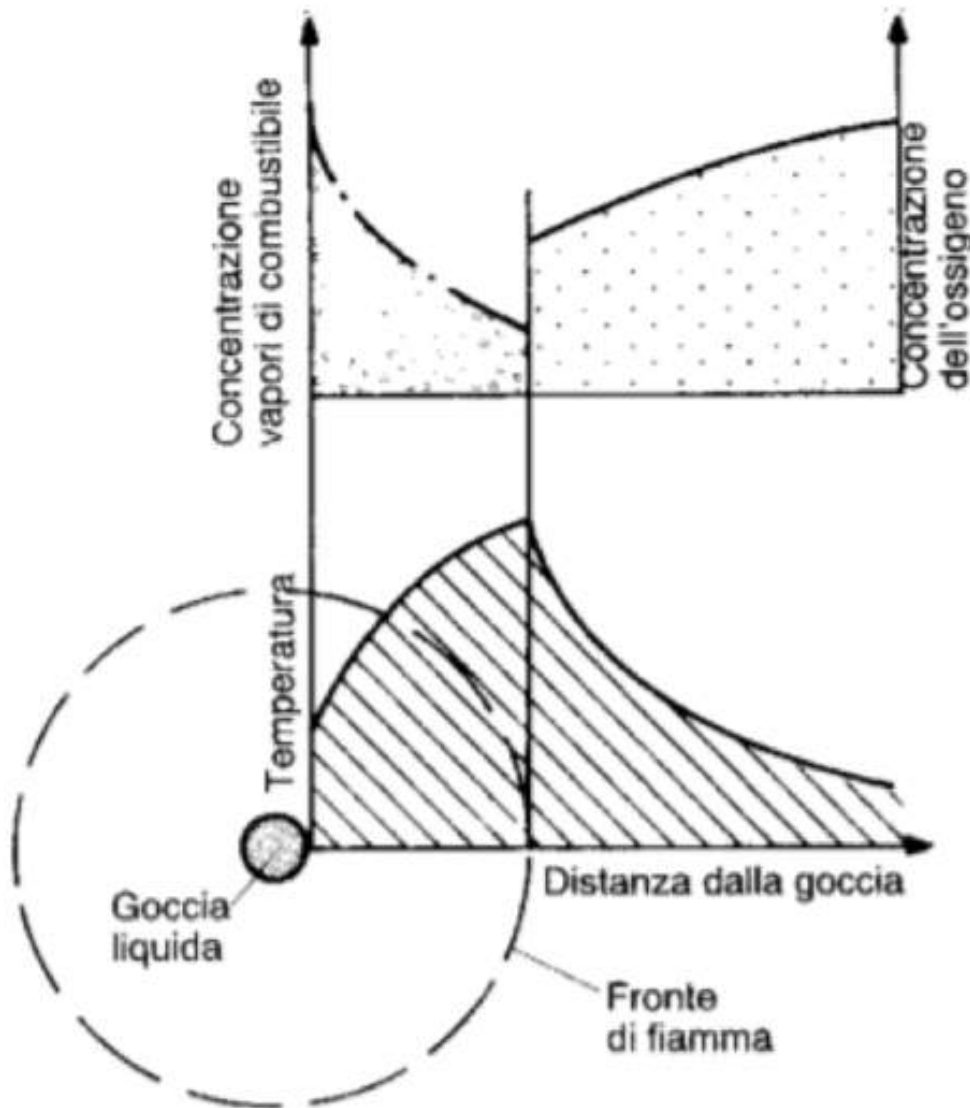
Compression Ignition Engines (Diesel)	CO	mg/km	2720	1000	640	500	500	500	500	500
	HC + NOx	mg/km	970	700	560	300	230	230	170	170
	NOx	mg/km			500	250	180	180	80	80
	PM	mg/km	140	80	50	25	5	4,5	4,5	4,5
	PN	#/km						6E11	6E11	6E11

no change

change

important

Combustione nel Diesel



Quando il gasolio viene iniettato nella camera di combustione, l'autoaccensione non avviene istantaneamente sia a causa della bassa infiammabilità del combustibile sia perché esso, seppur ridotto a finissime goccioline, deve miscelarsi con l'aria evaporando. Quest'ultimo processo richiede sempre un certo periodo di tempo; inevitabilmente durante la prima fase dell'iniezione si ha un certo accumulo di combustibile nella camera; tale accumulo genera fenomeni che descriveremo tra breve.

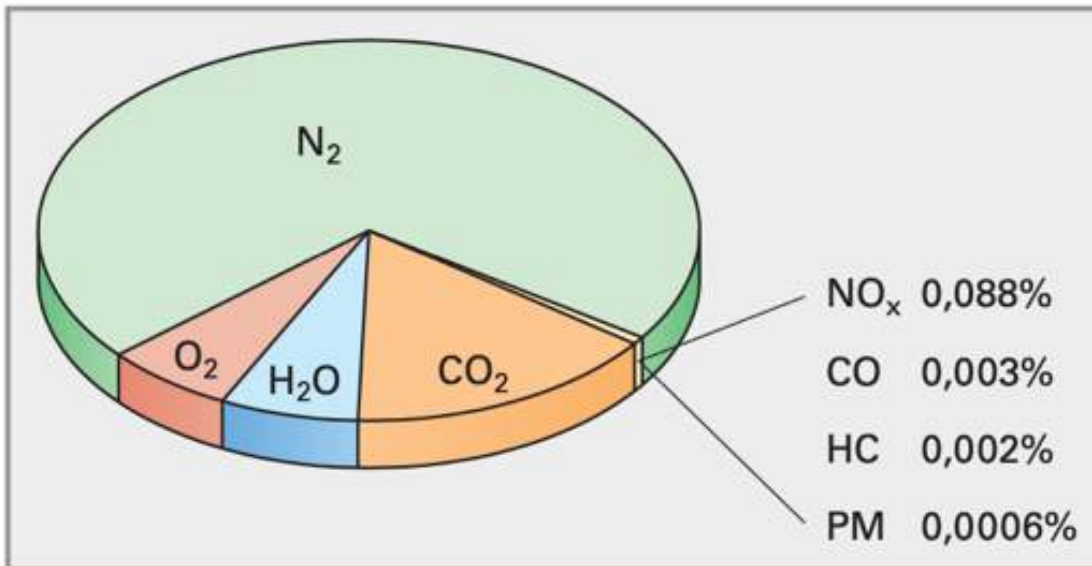
Torniamo ora a descrivere la fase di formazione della miscela e il fenomeno della combustione.

Dopo che l'aria si è miscelata ed è cominciata l'accensione, quest'ultima all'inizio procede assai rapidamente e poi rallenta nella fase finale (Figura 9.2). L'autoaccensione comincia sempre nelle zone in cui la miscela non è né troppo grassa né troppo magra; tali zone possono essere distribuite a macchia di leopardo all'interno della camera e per questo



Inquinanti

I gas di scarico di un motore Diesel contengono, oltre ad azoto (N_2) e ossigeno (O_2), diversi altri prodotti di reazione costituiti da carbonio C, idrogeno H, ossigeno O e azoto N.



Ossido di carbonio (CO)

Il motore Diesel ne emette circa 1/20 di quello a benzina e questo è abbastanza logico essendo il Diesel un motore a eccesso d'aria. Un Diesel moderno ne emette circa lo 0,05% contro l'1% circa del motore a benzina senza catalizzatore.

Idrocarburi (HC)

Grazie all'eccesso d'aria, anche le emissioni di HC sono circa la metà di quelle del motore a ciclo Otto: 0,03% contro circa 0,05%.

Ossidi d'azoto (NO_x – NO + NO_2)

L'eccesso di aria influisce negativamente sulla formazione degli ossidi di azoto, le cui concentrazioni sono superiori a quelle prodotte dal motore a benzina: 0,15% contro 0,085%. In particolare, l' NO_2 emesso è di poco superiore a quello del motore a ciclo Otto; invece l' NO è molto superiore.

Ossidi di azoto NO_x (monossido di azoto NO , biossido di azoto NO_2 , ecc.). Si producono a seguito delle elevate pressioni e temperature raggiunte in camera di combustione e a causa delle elevate velocità di propagazione di fiamma. Sempre a seguito dell'eccesso d'aria, a regime minimo e a carico parziale, si assiste a un aumento delle emissioni di NO_x .

Particolato (PM)

Si tratta di particelle di dimensioni inferiori al decimillesimo di millimetro (per questo si usano chiamare anche **PM 10** o **polveri sottili**). Sono composte dai più disparati elementi, dal carbonio a elementi solforati, ma anche acqua e idrocarburi incombusti, acidi ecc.

La percentuale delle varie sostanze nel particolato dipende dal carico del motore. È possibile ridurre tali emissioni aumentando la turbolenza nella camera di combustione e introducendo l'iniezione diretta a elevata pressione del combustibile.



Possibili Azioni per Riduzione Inquinanti

Misure motoristiche. Sono costituite, per esempio, da:

- ottimizzazione della camera di combustione;
- pilotaggio pre e post-riscaldamento;
- elevazione della pressione di iniezione;
- tecnologia plurivalvole;
- pilotaggio del flusso di aspirazione nei condotti;
- regolazione della pressione di sovralimentazione;
- ottimizzazione della pre-iniezione, dell'iniezione principale e della post-iniezione;
- EGR (Exhaust Gas Recirculation).

Post-trattamento dei gas di scarico. Sono applicati i seguenti sistemi:

- catalizzatore ad ossidazione;
- filtro antiparticolato (FAP);
- catalizzatore ad accumulo NO_x ;
- catalizzatore SCR;
- filtro DPNR.

Tabella 1: Limiti di emissioni dei gas di scarico per autovetture leggere e combi

	CO	HC + NO_x	NO_x	Particolato
Euro 3 dal 2000	0,64	0,56	0,5	0,05
Euro 4 dal 2005	0,5	0,30	0,25	0,025
Euro 5 dal 2009	0,5	0,23	0,18	0,005
Euro 6 dal 2014	0,5	0,17	0,08	0,005



Misure Motoristiche e Conseguenze

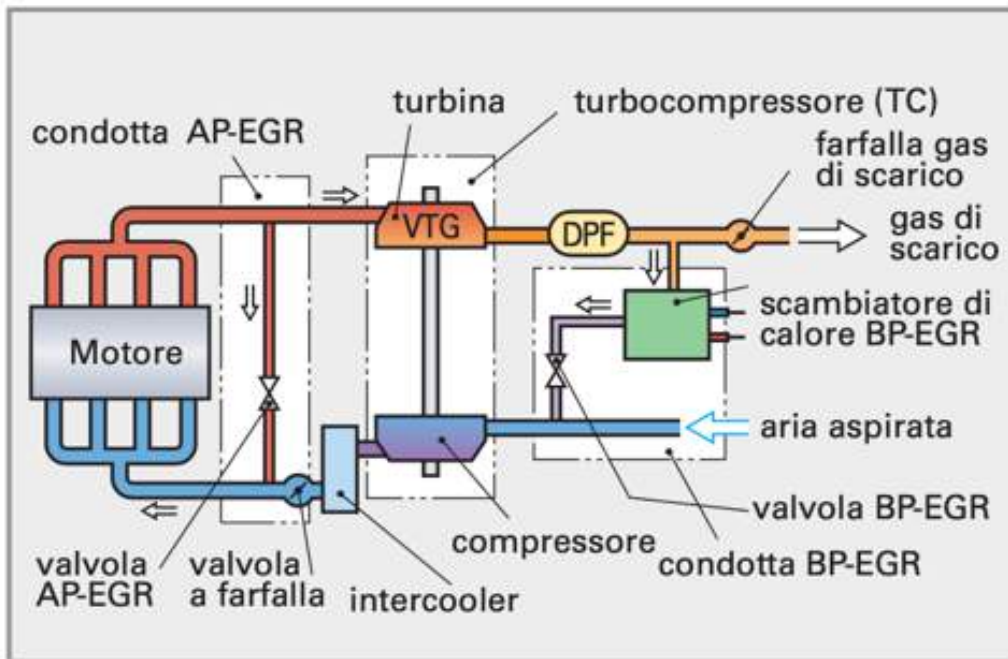
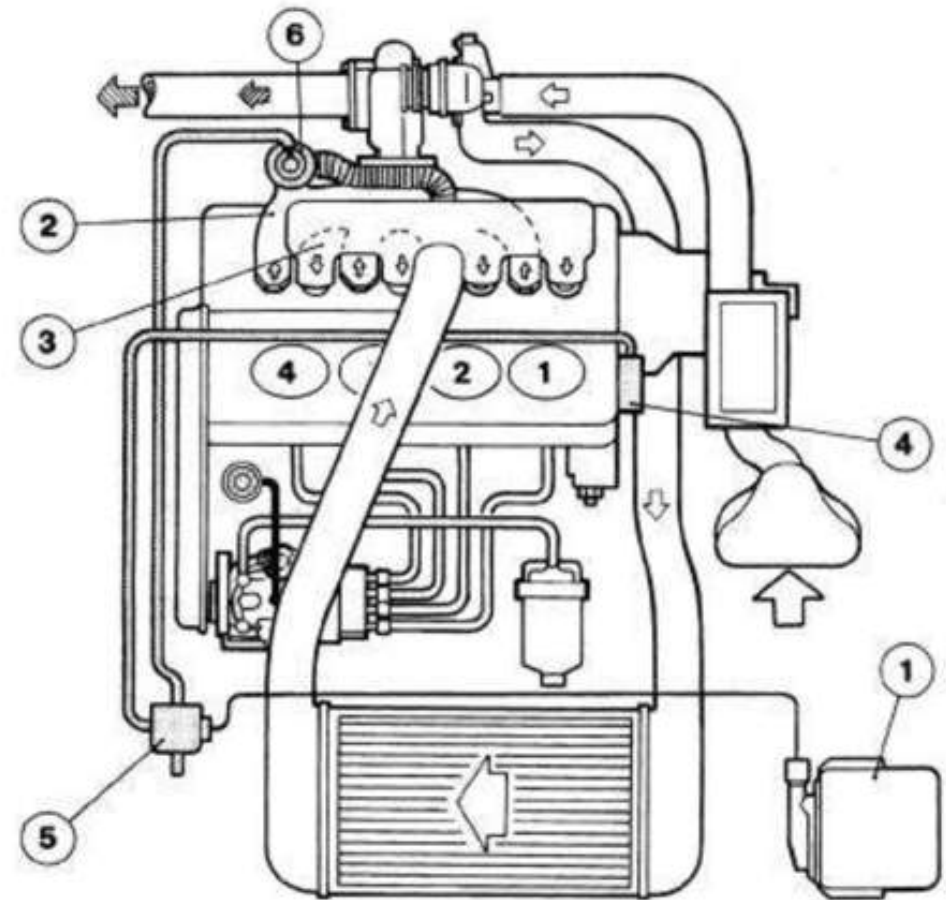
Tabella 1: Misure atte alla riduzione delle emissioni di sostanze nocive ed effetti conseguenti

Misura	CO	HC	NO _x	PM	CO ₂	Rimedio
Quota EGR alta	↑	↑	↓	↑	↑	FAP
Anticipo punto d'iniezione	↓	↓	↑↑	↓↓	↓	SCR
Ritardo punto d'iniezione	↑	↑	↓↓	↑↑	↑	FAP
Temperatura di combustione alta	↓	↓	↑	↑	↓↓	FAP, SCR

Figura 9.79

Schema funzionale dell'impianto di ricircolo gas esausti (EGR).

- 1 Centralina controllo motore
- 2 Collettore dello scarico
- 3 Collettore di aspirazione
- 4 Pompa a vuoto
- 5 Elettrovalvola EGR
- 6 Valvola di attuazione EGR



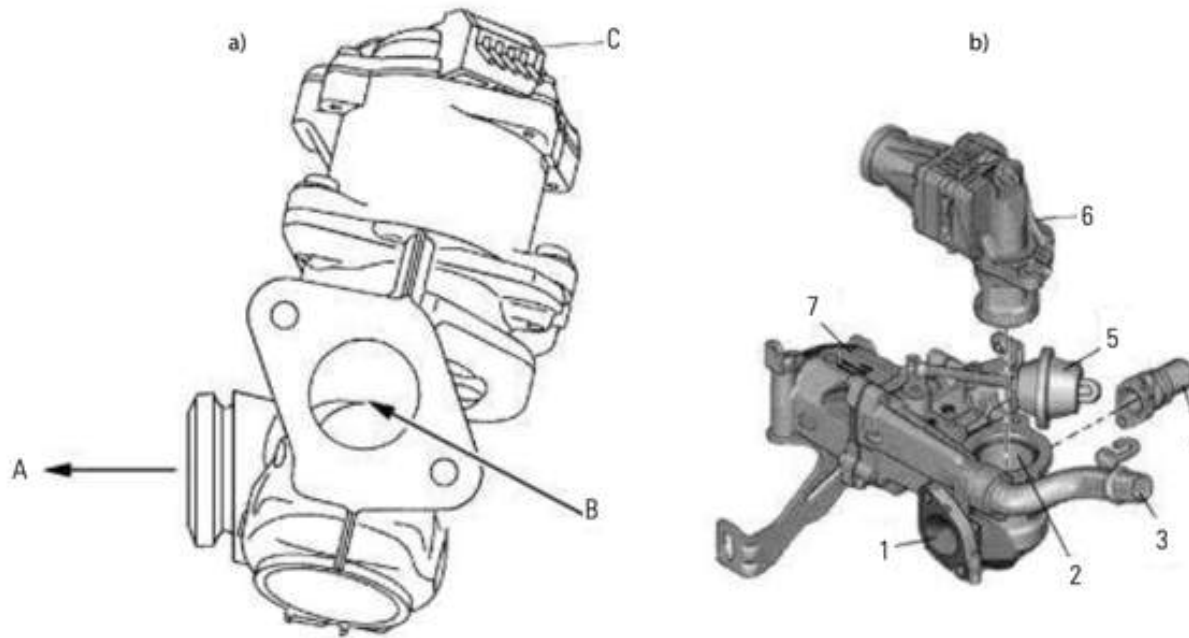


Figura 9.80

EGR elettrica (a).

a) Uscita gas di scarico verso collettore aspirazione

b) Entrata gas di scarico

c) Contatti elettrici

Insieme EGR raffreddata ad acqua (b) e grafico zone di intervento EGR (c).

1 Entrata gas di scarico dal collettore

2 Uscita gas di scarico verso valvola EGR

3 Uscita acqua di raffreddamento

4 Entrata acqua raffreddamento

5 Polmone a depressione di comando

Bypass gas di scarico verso serpentina di raffreddamento

6 Valvola EGR

7 Contenitore serpentina di raffreddamento gas di scarico

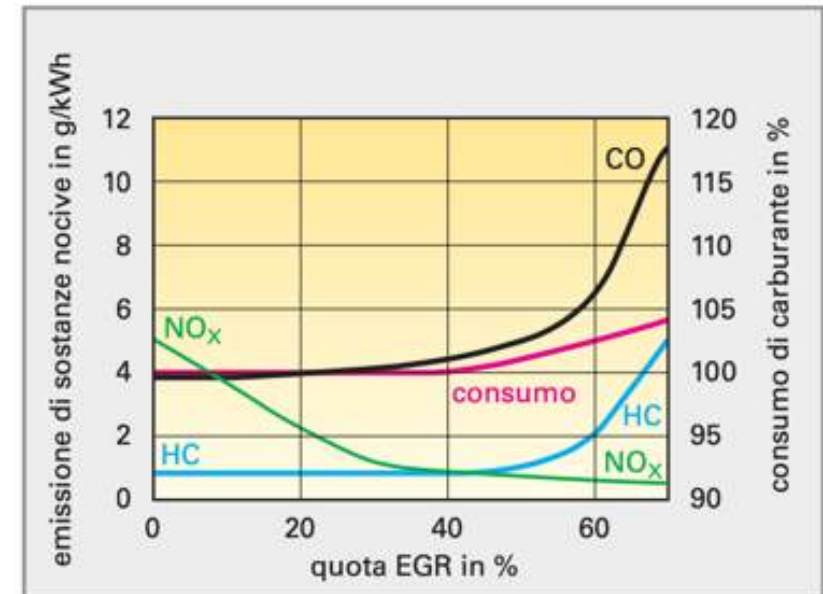
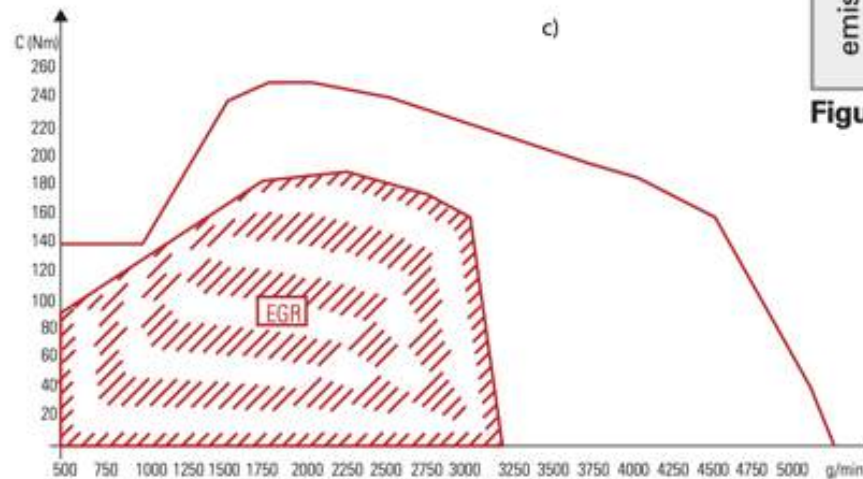
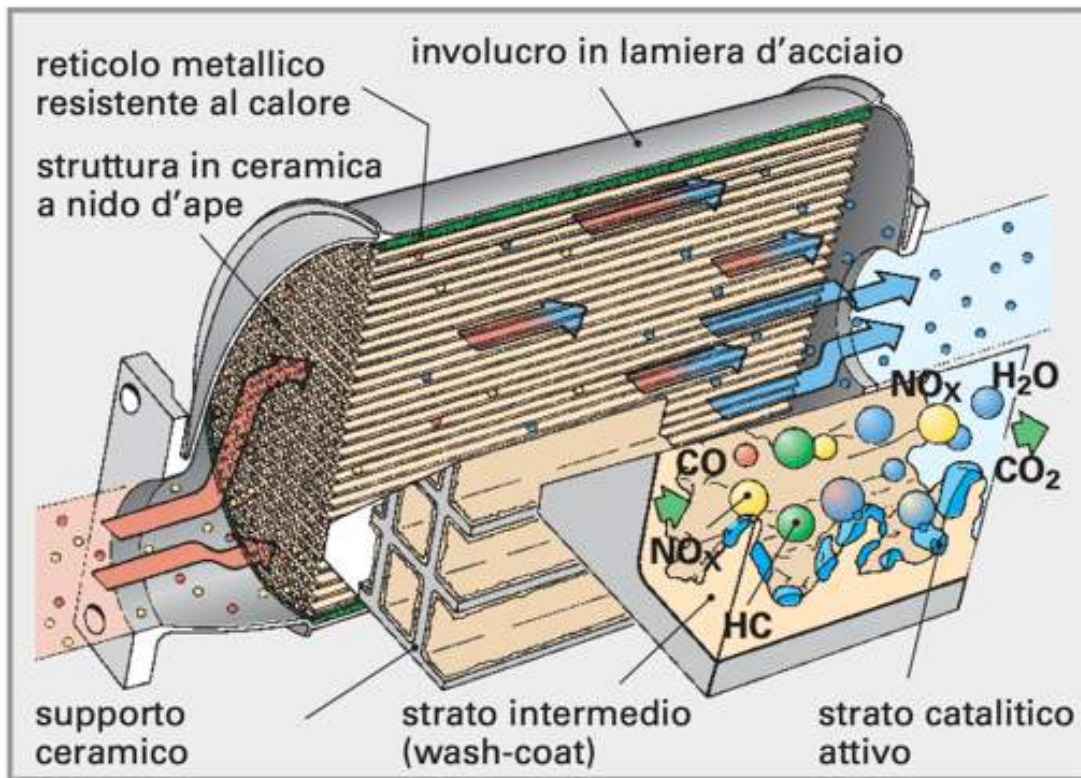


Figura 2: Influenza delle quote EGR sulle sostanze nocive

Nei motori Diesel portati a temperatura d'esercizio, l'EGR viene attivato al regime minimo e alle condizioni di carico parziale. In condizioni di pieno carico, l'EGR viene disattivato.



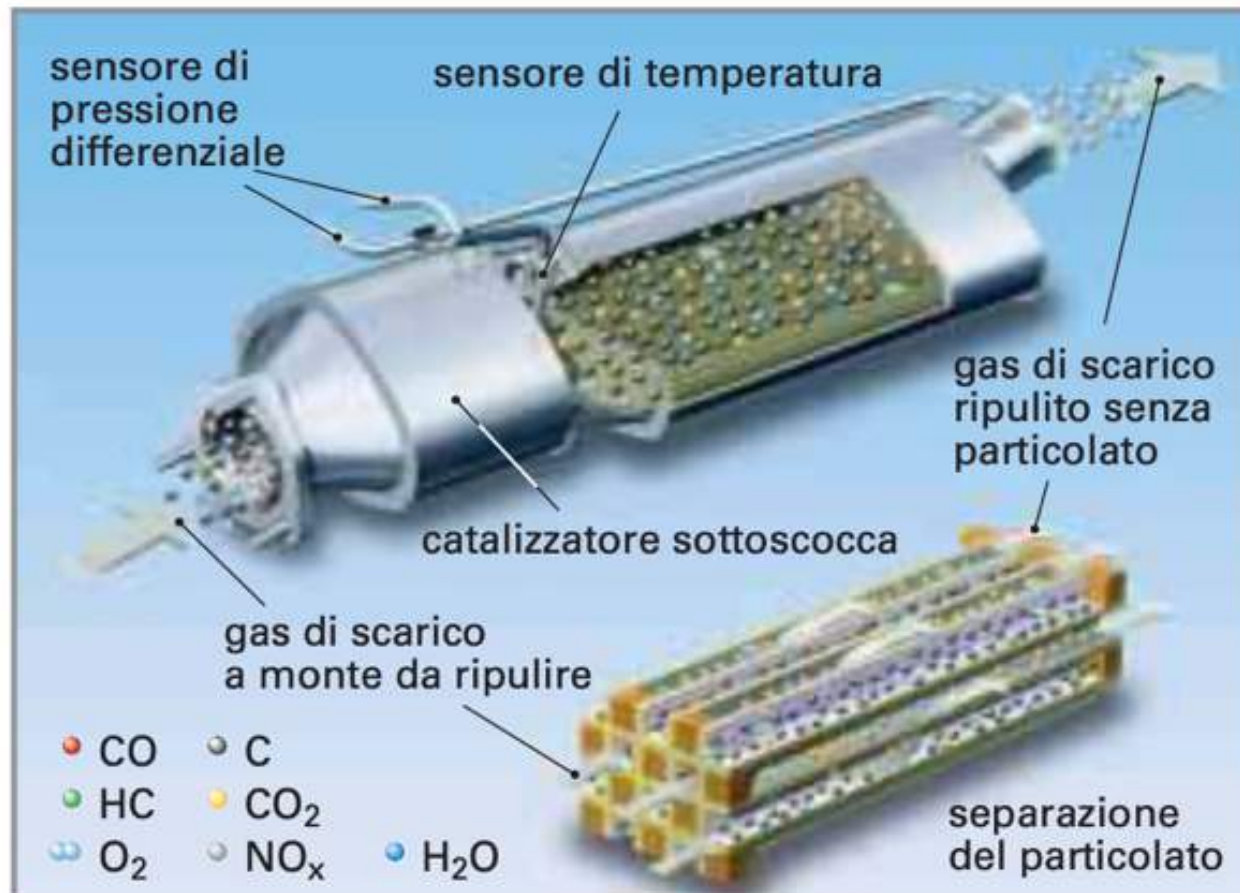
Ossidazione di HC e CO. Nel catalizzatore ad ossidazione (oxi-kat) il monossido di carbonio (CO) e gli idrocarburi incombusti (HC) vengono ossidati trasformandosi in biossido di carbonio (CO_2) e vapore acqueo (H_2O).

L'ossidazione avviene a partire da una determinata temperatura (temperatura light-off) che è di 170-200 °C a seconda della composizione dei gas, della velocità di flusso e della dotazione del catalizzatore. A questa temperatura, la quota di ossidazione sale sopra il 90%.

Ossidazione di NO a NO_2 . Il monossido di azoto NO e il biossido di azoto NO_2 sono definiti entrambi come NO_x . La parte di NO_2 in NO_x nei gas di scarico dei motori Diesel e negli stadi principali di utilizzo rappresenta circa il 10%. Il catalizzatore ossidante provvede già a basse temperature all'aumento della percentuale di NO in NO_2 .

Un'elevata quota di NO_2 è importante per la funzione di altri componenti dell'impianto di scarico, come il filtro antiparticolato (FAP) e il catalizzatore SCR.

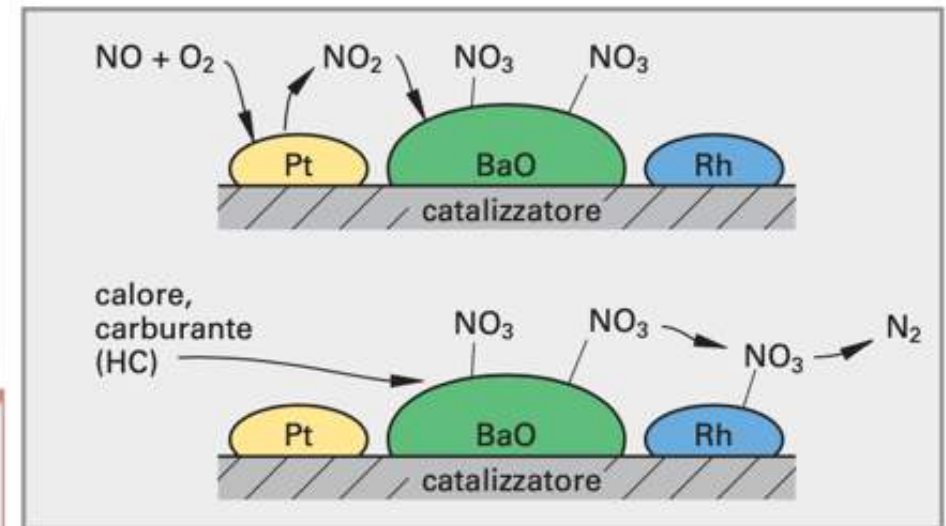
FAP a flusso completo. È impiegato come equipaggiamento di fabbrica ed è costituito principalmente da un corpo ceramico di carburo di silicio (SiC) strutturato a nido d'ape che filtra il 100% del flusso dei gas di scarico. Per la rigenerazione, è necessario un intervento della centralina gestione motore.



Il catalizzatore ad accumulo NO_x è in grado di trattenere gli ossidi d'azoto sulla sua superficie attiva. Ad un certo livello di saturazione avviene la rigenerazione mediante arricchimento della miscela. In tal modo, gli ossidi di azoto vengono ridotti (trasformati) in azoto (N₂) e acqua (H₂O).

Mediante il procedimento SCR continuo (Selective Catalytic Reduction) gli ossidi di azoto nel gas di scarico sono trasformati in azoto e acqua fino all'80%.

Il sistema DPNR (Diesel Particulate and NO_x Reduction System) riduce nel medesimo tempo particelle di fuliggine e ossidi di azoto senza aggiunta di additivi di riduzione. Inoltre, non necessita di manutenzione.



Struttura. Il sistema (**fig. 2**) è costituito da un catalizzatore SCR, da un dispositivo di dosaggio programmato, oltre che da un catalizzatore ad ossidazione e da un FAP. Il sistema di dosaggio inietta finemente la componente di riduzione a monte del catalizzatore SCR a seconda del carico e del numero di giri.

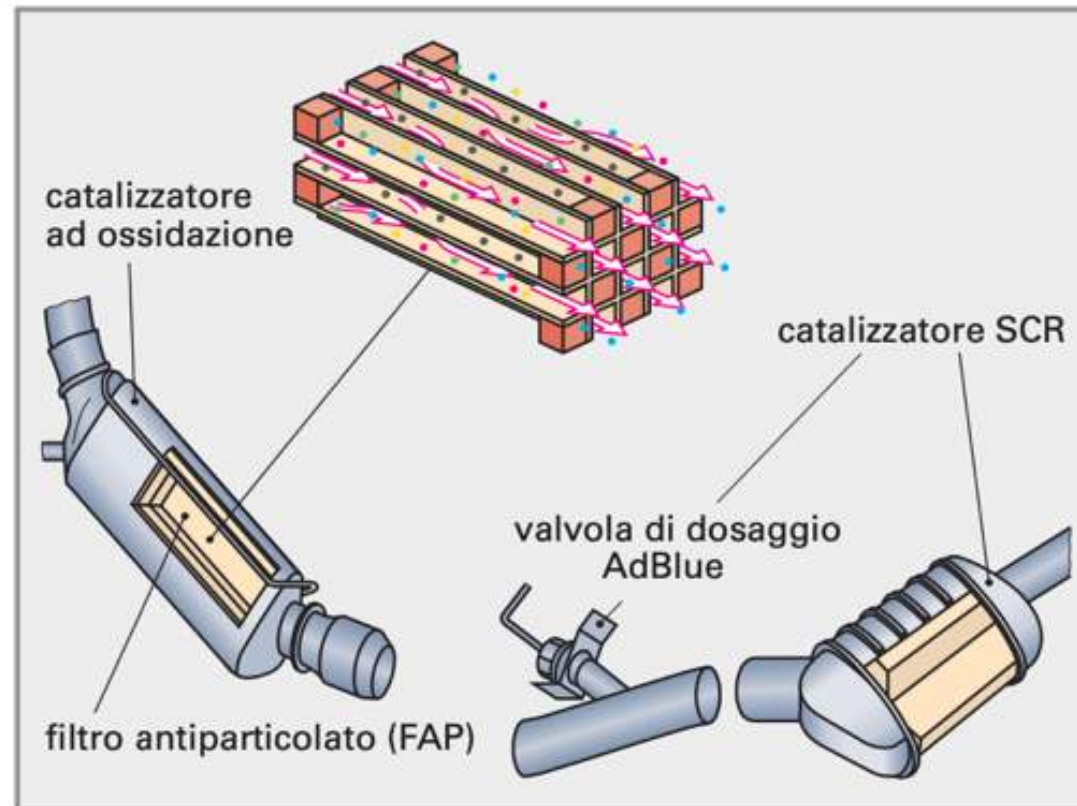


Figura 2: Depurazione gas di scarico con catalizzatore SCR



SCR

Agente di riduzione. L'ammoniaca necessaria per la reazione SCR non è utilizzata in forma diretta, ossia allo stato puro, bensì sotto forma di soluzione acquosa di urea al 32%, denominata industrialmente in modo unificato AdBlue, e regolata da norme DIN 70070 e ISO 22241. Dalla soluzione urea-acqua si sviluppano ammoniaca (NH_3) e CO_2 . In un catalizzatore SCR, l'ammoniaca prodotta in questo modo reagisce a partire da 170°C trasformandosi in azoto (N_2) e acqua (H_2O). Il consumo di AdBlue è di circa 0,1 litri per 100 km o circa 1-3% del consumo di gasolio. A questo scopo occorre alloggiare un serbatoio adeguato, al cui rabbocco si deve provvedere in occasione della manutenzione.

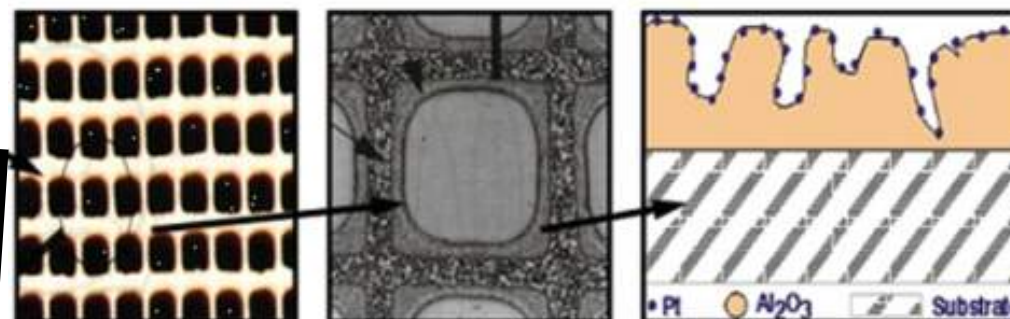
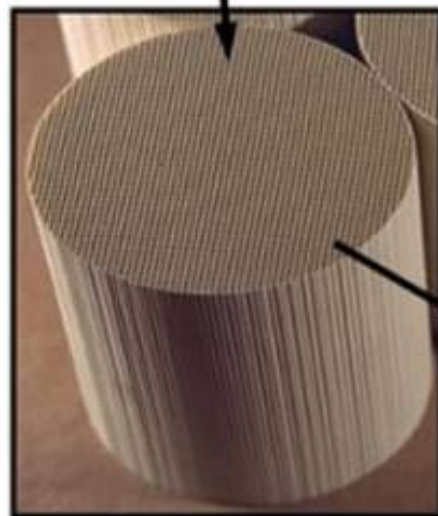
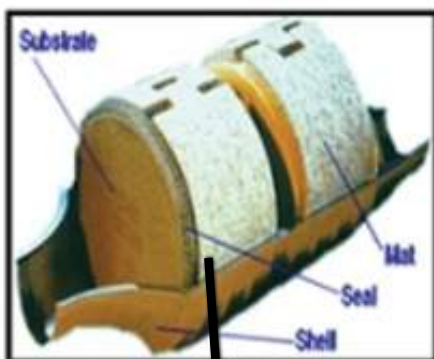
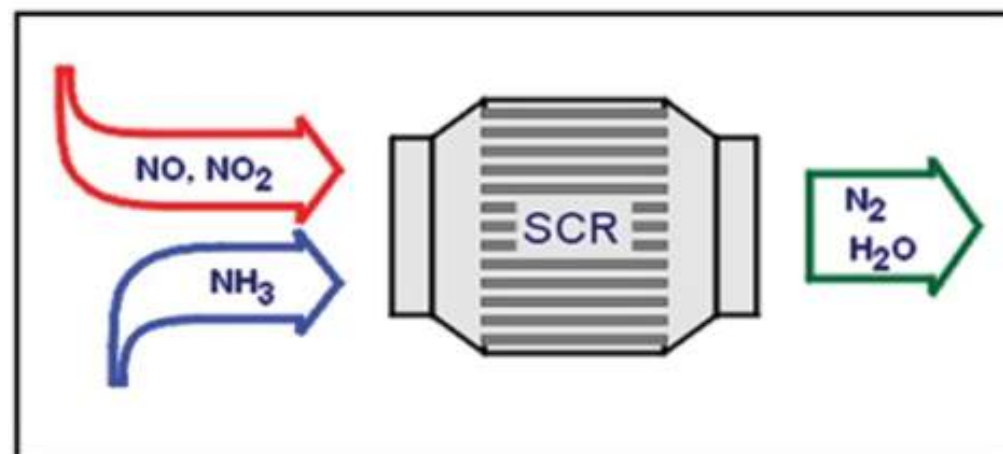
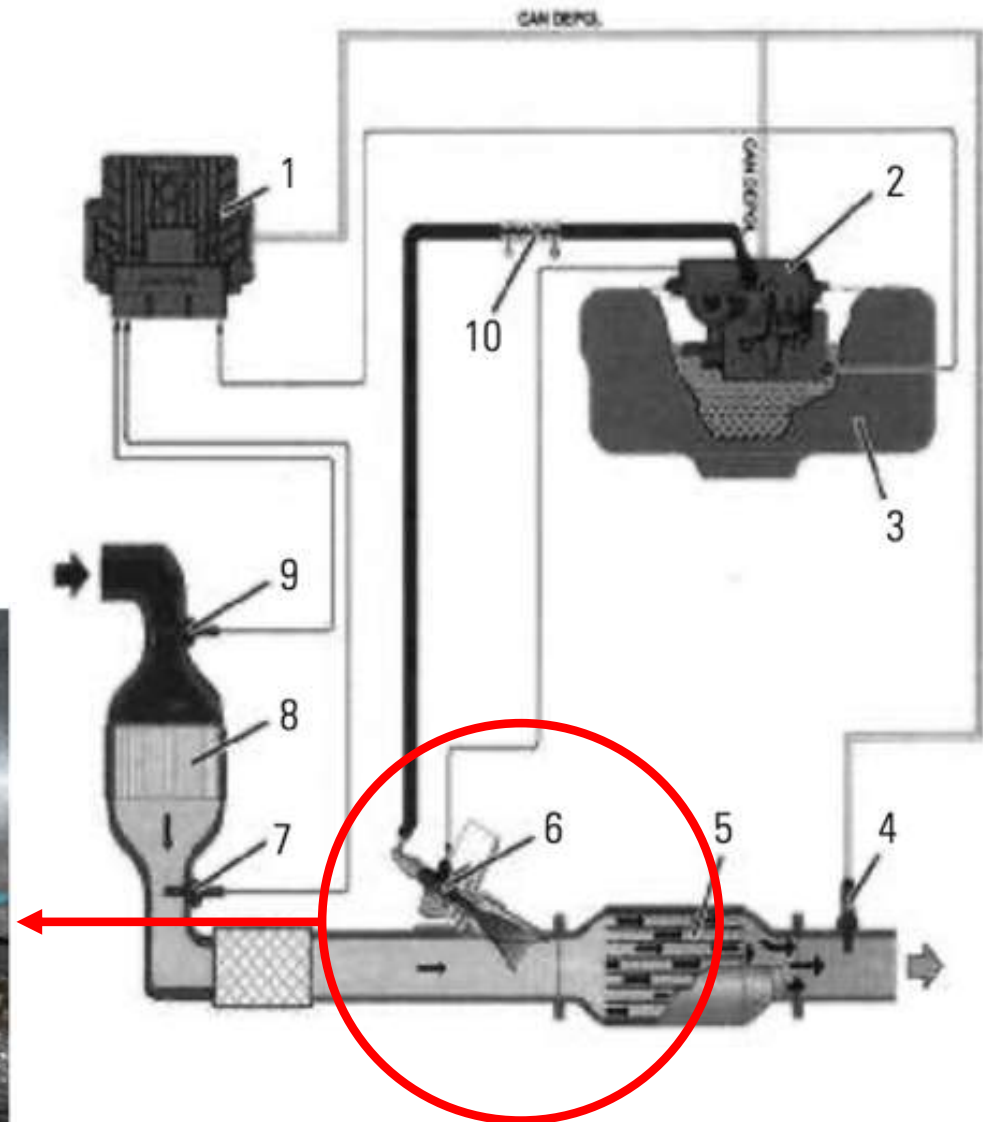


Figura 9.90

Principali componenti impianto SCR.

- 1 Calcolatore motore
- 2 Insieme modulo pompa urea
- 3 Serbatoio urea
- 4 Sonda NO_x
- 5 Insieme catalizzatore NO_x -filtro antiparticolato
- 6 Iniettore urea
- 7 Captatore temperatura gas di scarico a valle del catalizzatore
- 8 Catalizzatore di ossidazione
- 9 Captatore temperatura gas di scarico a monte del catalizzatore
- 10 Canalizzazione riscaldata







Spiegazione AdBlue

<https://www.youtube.com/watch?v=f2UIR9bNMnI>

Peugeot BlueHdi

<https://www.youtube.com/watch?v=yQq6ch1pY2E>

Reazione Chimica

<https://www.youtube.com/watch?v=90xNrMnMQkY>

Peugeot BlueHdi

<https://www.youtube.com/watch?v=mTCqjnmBtE8>