

Influenza degli eventi rigenerativi sulle emissioni di particolato di veicoli Diesel dotati di DPF (Diesel Particulate Filter)

ENEA, 19 gennaio 2017

Maria Vittoria Prati

Carlo Beatrice

Maria Antonietta Costagliola

Chiara Guido



Istituto Motori – Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) of Italy

Department of Engineering, ICT and Technologies for Energy and Transport (DIITET)

BACKGROUND

L'Istituto Motori del CNR ha condotto tra il 2015 e il 2016 uno studio tecnico-scientifico sul funzionamento e l'efficacia dei filtri antiparticolato diesel - FAP (denominati secondo la terminologia inglese «Diesel Particulate Filter» – DPF) in esito ad una specifica richiesta del Dipartimento per i trasporti terrestri la navigazione, gli affari generali e del personale del Ministero dei Trasporti e delle Infrastrutture.

- Obiettivo dello studio era la *valutazione dell'efficacia di abbattimento del particolato allo scarico*, mediante l'impiego del FAP, prodotto dai motori diesel. Le valutazioni sono state condotte sia in termini di massa complessiva prodotta sia in termini di numero e distribuzione delle particelle e nanoparticelle emesse.
- Lo studio si è basato sia *sulla ricerca ed analisi dei dati disponibili dalla letteratura scientifica*, riconosciuta a livello internazionale, che in *attività sperimentali* condotte con misure dirette su motori provati nei propri laboratori.

EXpert PAnel for Polluting Emissions Reduction - EXPAPER

LIMITI STANDARD PER OMOLOGAZIONE AUTO E VEICOLI COMMERCIALI LEGGERI : dall'EURO 1 all'EURO 6



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

Test Cycle	
-------------------	--

ECE 15.04	ECE 15.05	NEDC	NEDC	NEDC	NEDC	NEDC	WLTP
-----------	-----------	------	------	------	------	------	------

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

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

PN: VANNO CONTATE LE PARTICELLE DI DIMENSIONI TRA 23 NANOMETRI E 10 MICRON

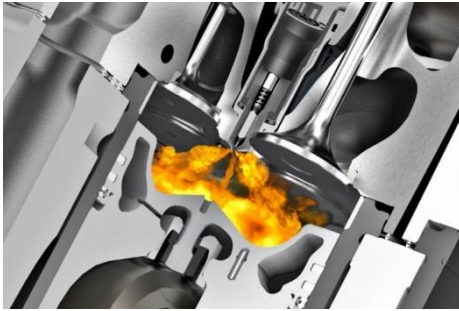
no change

change

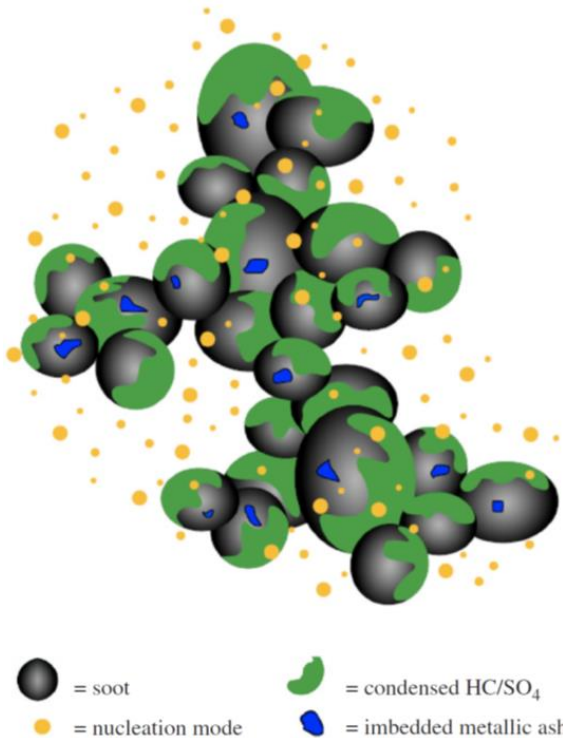
important

Combustibili con contenuto di zolfo <10 ppm in massa

COSA E' IL PARTICOLATO



Il particolato carbonioso (fuliggine), o secondo la terminologia inglese particulate matter (PM) o black carbon (BC), è generato dalla combustione di idrocarburi in condizioni locali di carenza di ossigeno. Tale condizione si verifica tipicamente per la fiamma nel cilindro di un motore diesel.



- Il PM è costituito principalmente da particelle solide di carbonio, con tracce di metalli e cenere derivanti dal combustibile, dall'olio lubrificante e dall'usura delle parti meccaniche, sui cui sono adsorbiti idrocarburi incombusti (generalmente ad alta massa molecolare) e solfati. La frazione del PM costituita da idrocarburi incombusti, è la componente più «tossica» del PM.
- Contestualmente alle particelle più pesanti sono presenti un certo numero di particelle semivolatili e volatili, la cui composizione e natura è ancora in fase di ricerca, ma principalmente dipendono anch'esse da composti derivanti da una non perfetta ossidazione degli idrocarburi, da metalli (nel combustibile, nell'olio e da fenomeni di attrito tra componenti) e da solfati (imputabili principalmente al contenuto di zolfo del combustibile e dell'olio)

DALLO SCARICO DEL VEICOLO ALLA MISURA (UNECE PMP)

Secondo la procedura di misura del PN a norma UNECE PMP (Particle Measurement Programme) le particelle campionate nel tunnel di diluizione passano in un sistema di rimozione di quelle volatili (VPR) e vengono «contate» dal Particle Number Counter (PNC) per diametri >23nm.

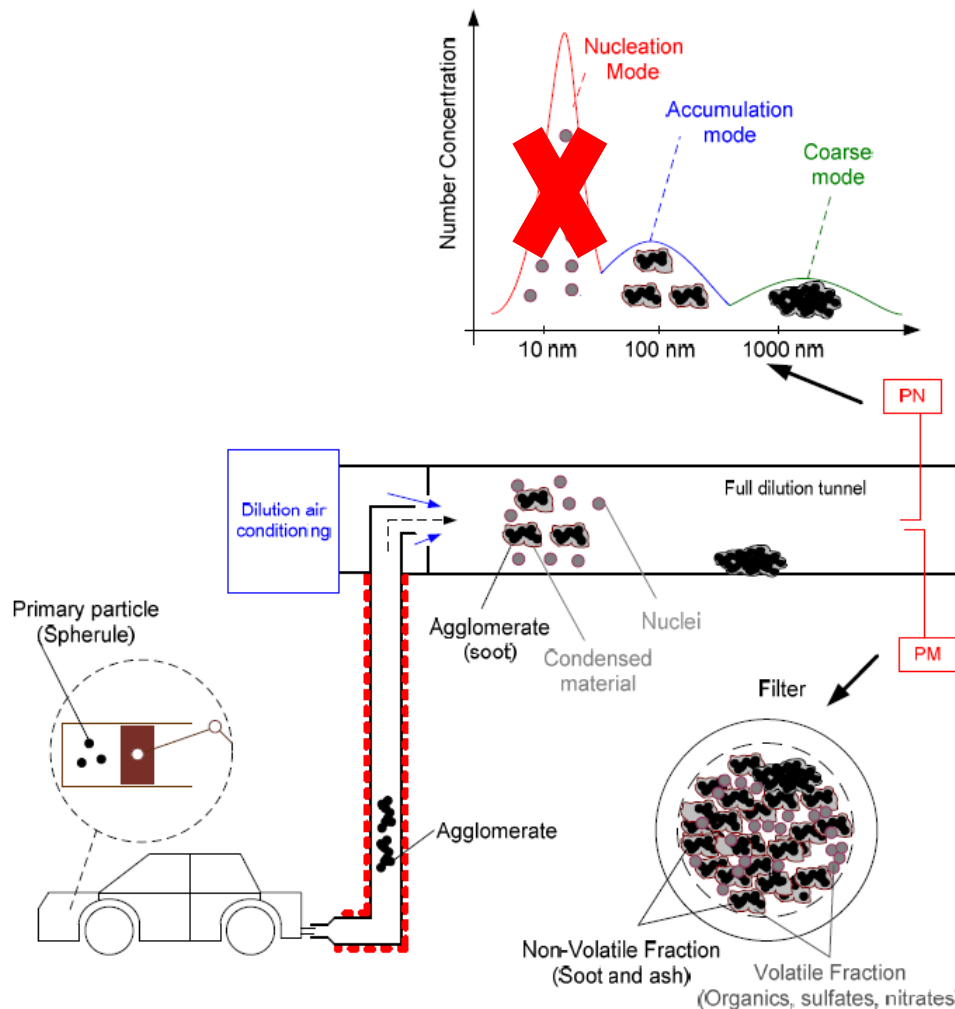


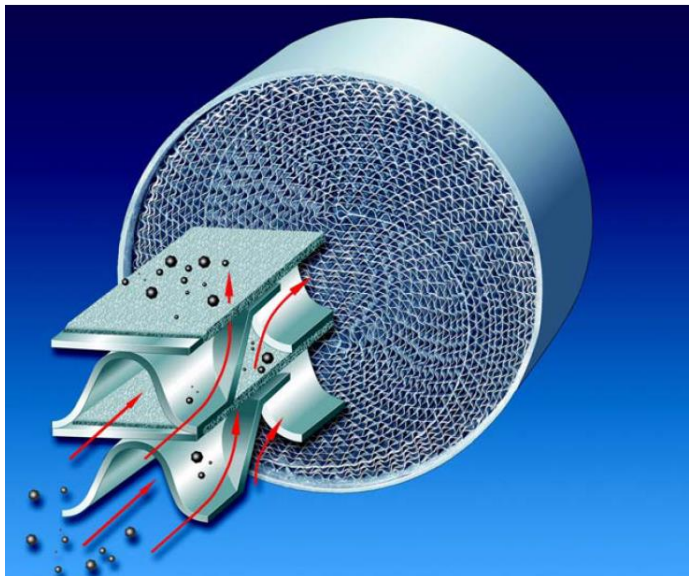
Figure 1: Typical sequence of particle transformation from the engine to the measurement location (from Giechaskiel et al., 2012).

- Le particelle con diametro ≥ 23 nm sono costituite da particolato carbonioso, sono misurabili con una procedura standardizzata.
- La misura delle particelle con diametro < 23 nm è strettamente legata alle condizioni del sistema ed alla metodologia di misura. Esse sono volatili o semivolatili e quindi fortemente influenzate dalla temperatura di campionamento. La metodologia di misura, caratterizzazione chimico-fisica è ancora in fase di studio (es. bandi UE Horizon 2020).
- Le particelle nanometriche e sub nanometriche sono mediamente catturate dal substrato carbonioso presente nel DPF.

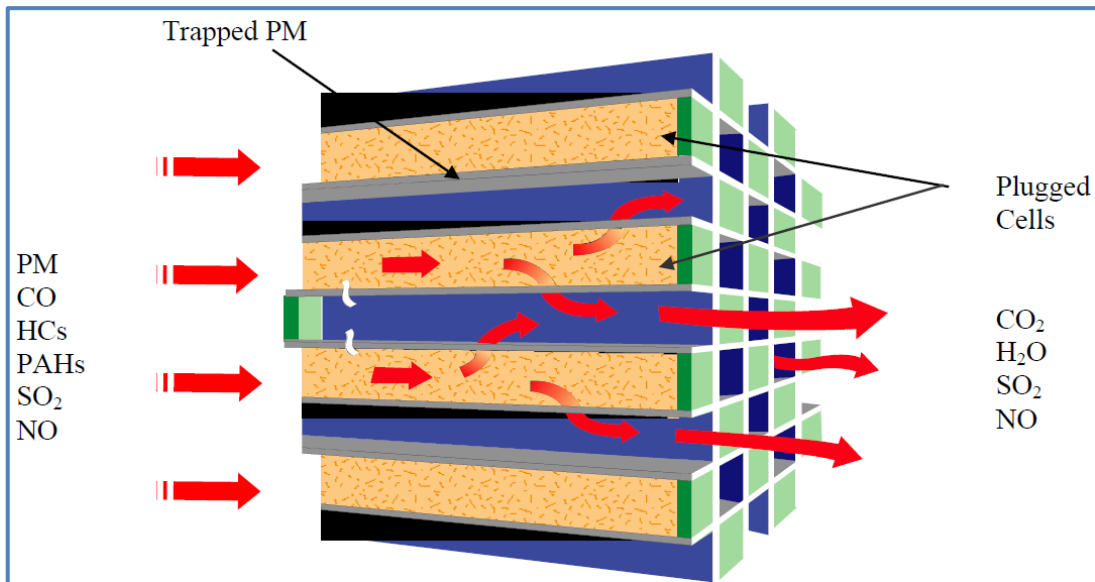
COSA SONO I FAP (Diesel Particulate Filter – DPF)

- I FAP/DPF sono dispositivi di post-trattamento delle emissioni prodotte dai motori e dedicati all'intrappolamento del particolato.

Flow-Through DPF (aperti)



Wall-Flow DPF (chiusi)



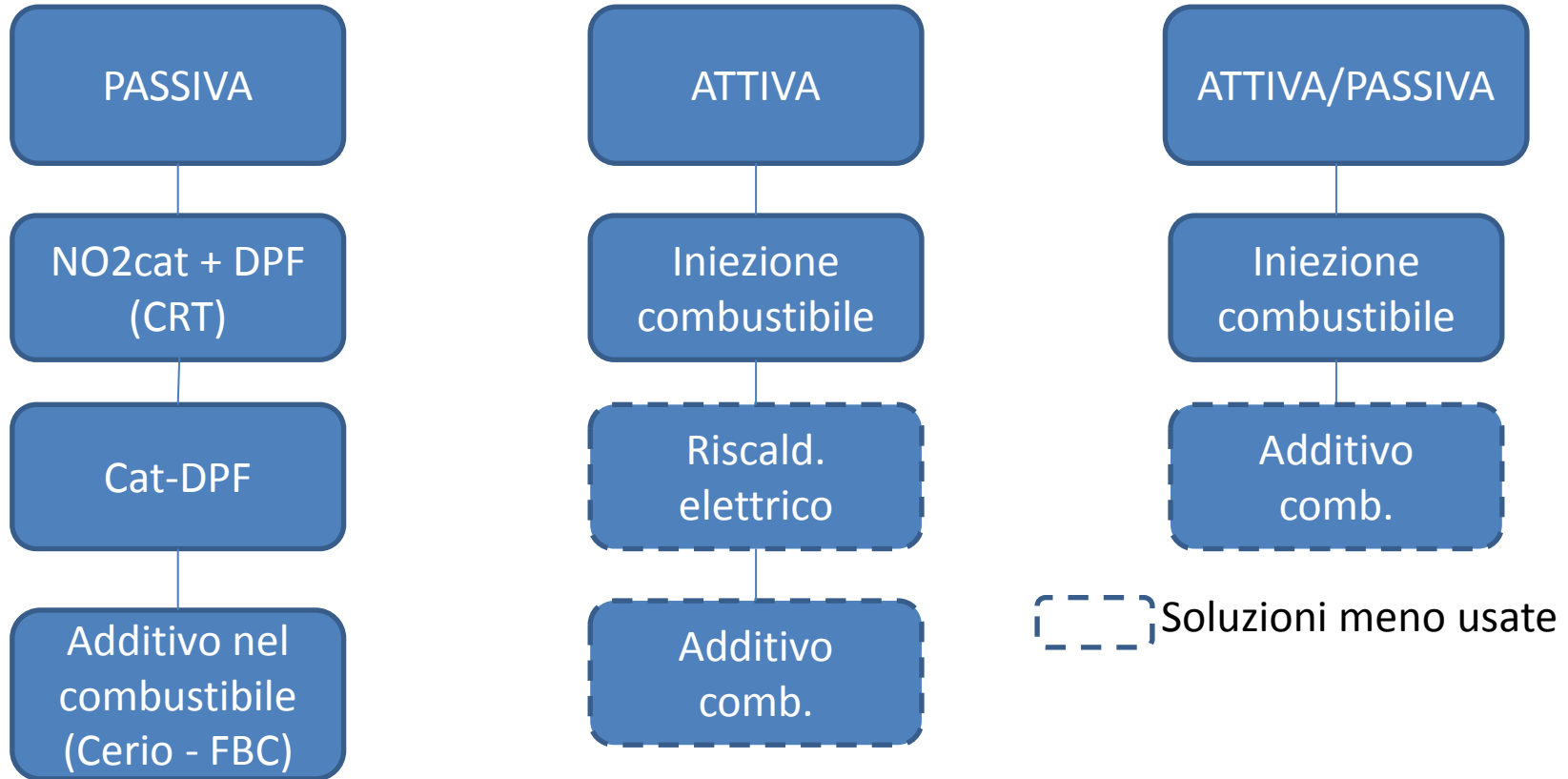
- I Flow-Through-DPF sono filtri costituiti da fogli corrugati in cui il flusso è forzato a passare in un sottile foglio poroso (generalmente catalizzato).
- I Wall-Flow-DPF sono filtri ceramici costituiti da un monolite con canali paralleli alternativamente interrotti in cui il flusso è forzato a passare attraverso le pareti ceramiche dei canali. Essi possono essere catalizzati (CDPF) e non.

Ref: MECA.org. http://www.meca.org/galleries/files/MECA_Diesel_White_Paper_12-07-07_final.pdf

FAP per tipologia di rigenerazione

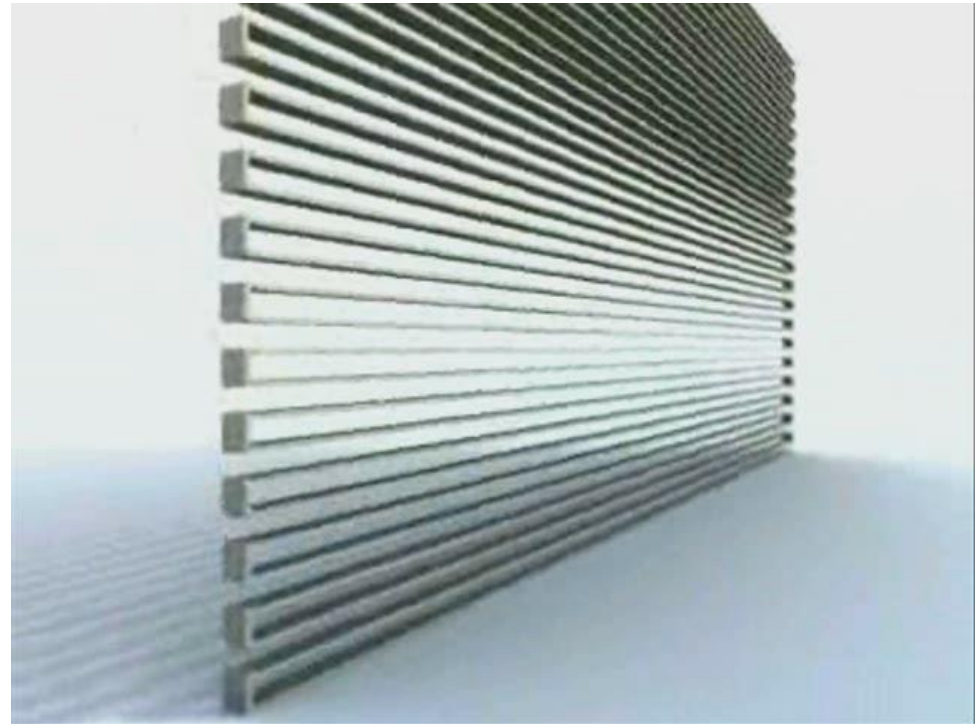
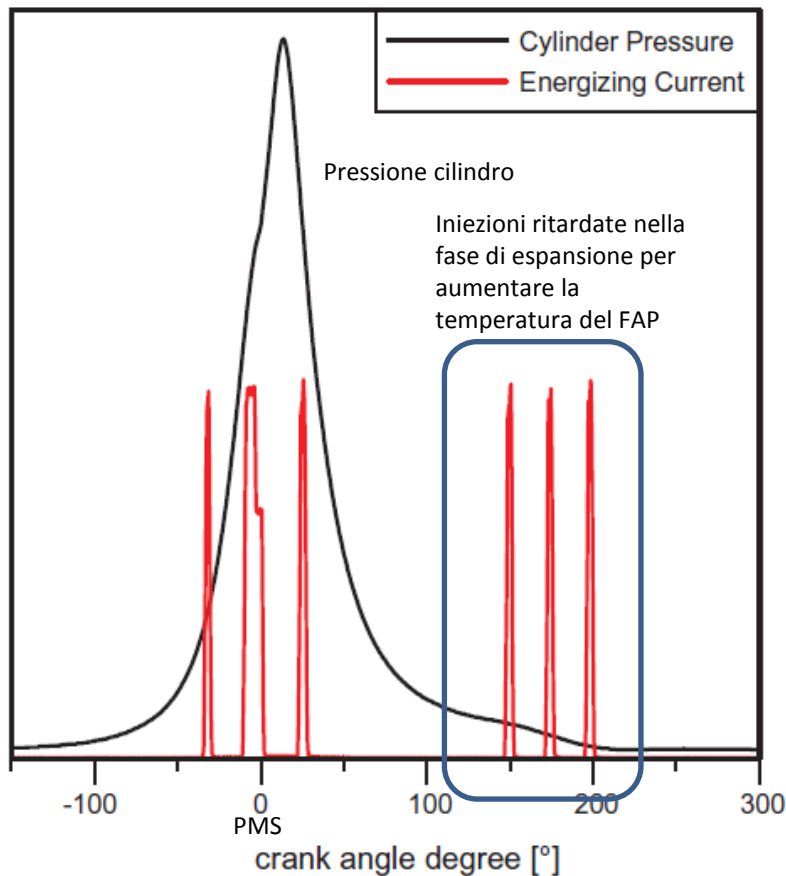
Il PM viene progressivamente accumulato nello strato poroso del filtro, aumentando la contropressione sullo scarico del motore. Nella prima fase la filtrazione avviene nell'interno del substrato, e poi via via sulla superficie di ingresso a causa dello strato di PM che si genera. Oltre un certo accumulo il filtro deve essere rigenerato ossidando il PM accumulato.

I FAP/DPF possono essere suddivisi per metodo di rigenerazione:



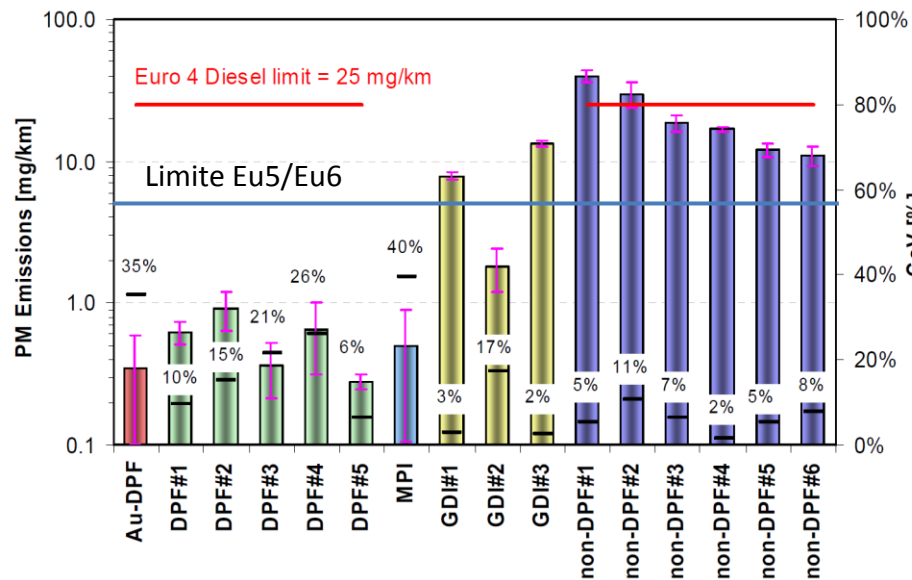
Per i filtri di serie sono principalmente usati CDPF wall-flow (ceramici) e la rigenerazione è di tipo attivo mediante iniezione «ritardata» nel cilindro o post-iniettore nel collettore di scarico.

Rigenerazione attiva dei wall-flow FAP

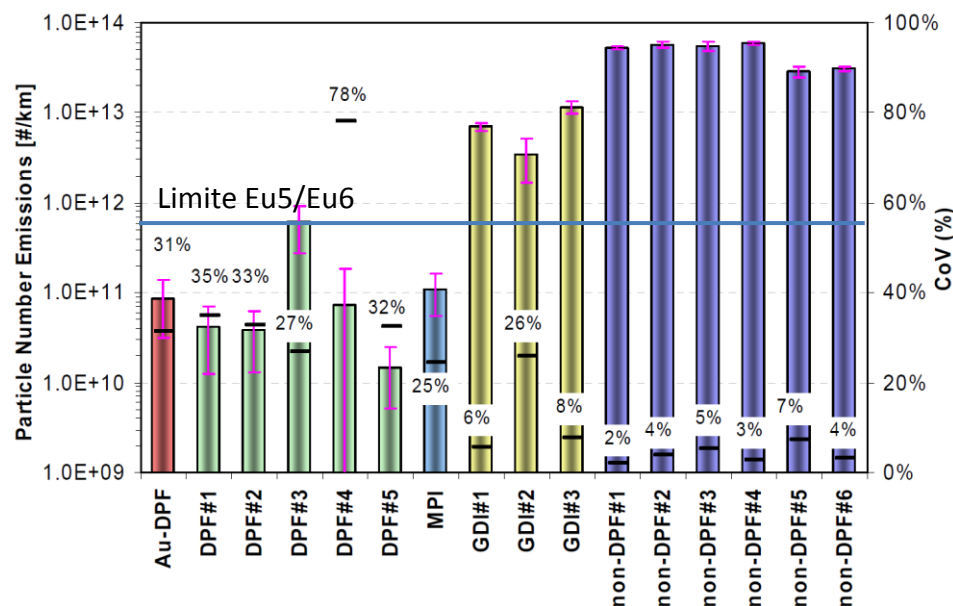


Attraverso iniezioni ritardate nella fase di scarico dei cilindri viene inviato combustibile al catalizzatore ossidante a monte del FAP che ne aumenta la temperatura all'ingresso fino a circa 650°C. Dopo comincia la fase di rigenerazione che dura mediamente 10-15 minuti a seconda del tipo di motore, delle condizioni di funzionamento, della strategia adottata ecc. Finisce quando la contropressione ha raggiunto un valore prestabilito e corrispondente al filtro «pulito».

Effetto del FAP/DPF wall-flow (chiuso) «attivo» sulle emissioni PM in massa e PN in numero di particelle allo scarico del veicolo

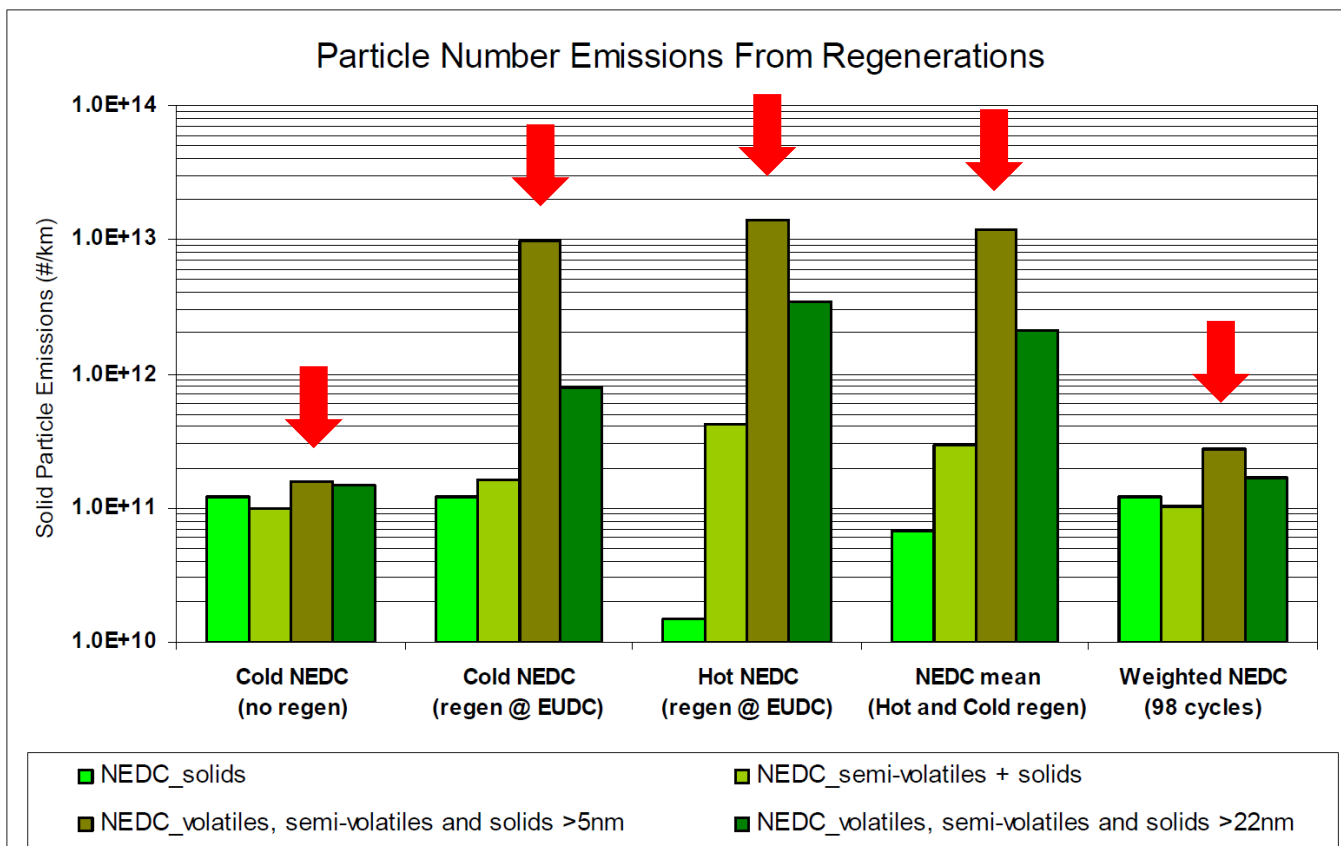


L'uso del FAP abbassa di circa 100 volte l'emissione di PM (massa) sul ciclo di omologazione europeo NEDC. Le tendenze, seppur con possibili differenze, sono conservate se si considera sia l'uso su strada che la prova con ciclo WLTP. Le emissioni di PM sono comparabili o inferiori ai motori benzina ad iniezione indiretta MPI e nettamente inferiori rispetto ai motori benzina ad iniezione diretta GDI senza FAP. **L'efficienza di filtrazione è generalmente nel range 99-99.9%.**



L'uso del FAP abbassa di circa 1000 volte l'emissione di Particelle PN (numero), sul ciclo europeo NEDC. Le tendenze, seppur con possibili differenze, sono conservate se si considera sia l'uso su strada che la prova con ciclo WLTP. Le emissioni di particelle sono comparabili o inferiori ai motori benzina convenzionali (MPI) e nettamente inferiori rispetto ai motori a benzina ad iniezione diretta (GDI) senza FAP. **L'efficienza di filtrazione è generalmente nel range 99-99.9%.**

Influenza della rigenerazione dei FAP wall-flow «attivi» su emissioni PN in numero allo scarico del veicolo



La rigenerazione del FAP generalmente tende ad aumentare il PN emesso per una frazione del tempo rigenerativo, seguendo la procedura PMP. È stato stimato un range di percorrenza tra una rigenerazione e l'altra in 500-1000 km. Il JRC traduce tale range in un numero di cicli NEDC medio per l'autovettura in prova pari a 98. In tali condizioni il valore medio del numero di particelle emesse nell'intervallo tra l'inizio di una rigenerazione e l'inizio della successiva è inferiore al limite Eu5/Eu6.

Influenza delle condizioni di rigenerazione dei FAP wall-flow «attivi» sull' emissione di PN allo scarico del veicolo.

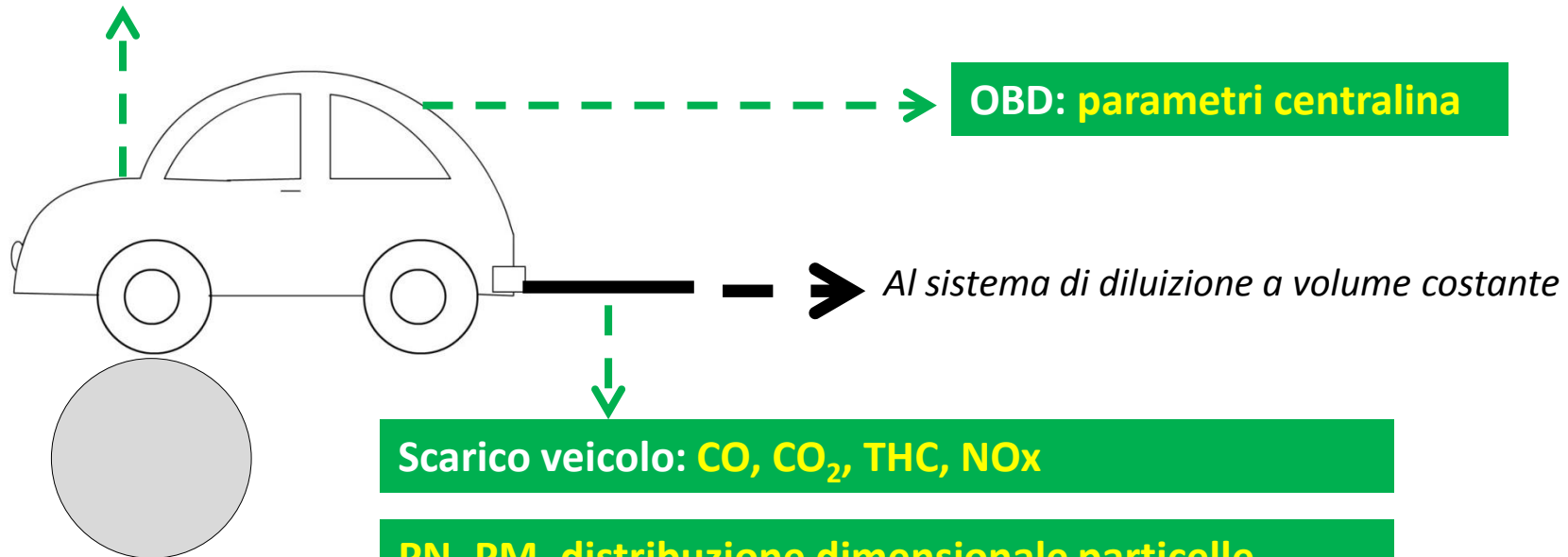
Dalla letteratura scientifica si evince che :

- **il numero delle nano-particelle emesse durante la rigenerazione è di circa 100-1000 volte piu' alto rispetto a quelle emesse in normali condizioni di funzionamento, ma limitato circa all'1-2 % del tempo di funzionamento del motore tra una rigenerazione e la successiva. Le emissioni di nano-particelle di un veicolo valutate in una percorrenza media (inclusa una rigenerazione) risultano notevolmente inferiori a quelle che verrebbero emesse nell'atmosfera, dallo stesso motore, in assenza di filtro;**
- L'entità, la distribuzione dimensionale delle particelle, la loro natura chimico-fisica (volatili, semivolatili, solide), l'andamento nel tempo di rigenerazione in cui si osserva tale aumento, dipendono da vari fattori concorrenti del sistema veicolo e del sistema di campionamento e misura;
- I risultati ottenuti dalla letteratura e dalle indagini sperimentali sono quelli ad oggi ottenibili sulla base delle tecnologie disponibili.

ANALISI SPERIMENTALI

Laboratorio Emissioni – Istituto Motori CNR

Scarico motore: **CO, CO₂, THC, NO_x**



OBD: **parametri centralina**

Al sistema di diluizione a volume costante

Scarico veicolo: **CO, CO₂, THC, NO_x**

PN, PM, distribuzione dimensionale particelle

FPS (sistema di diluizione a T e P controllate, DF=12)

ELPI (Electrical Low Pressure Impactor) PN da 7 nm
a 10 μm

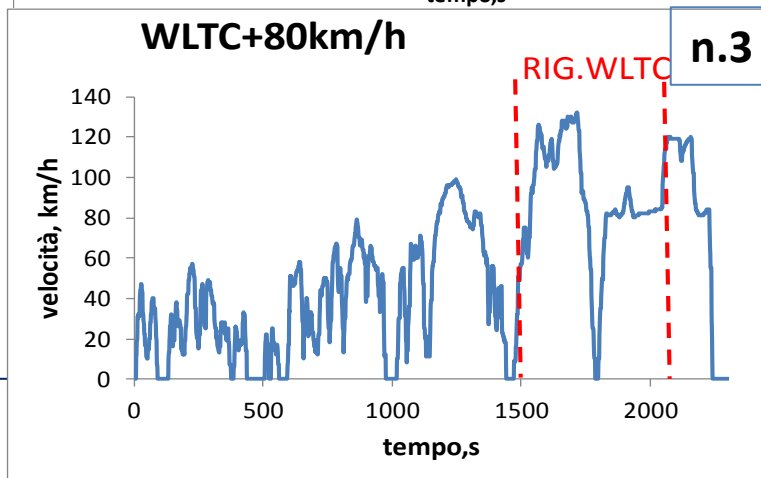
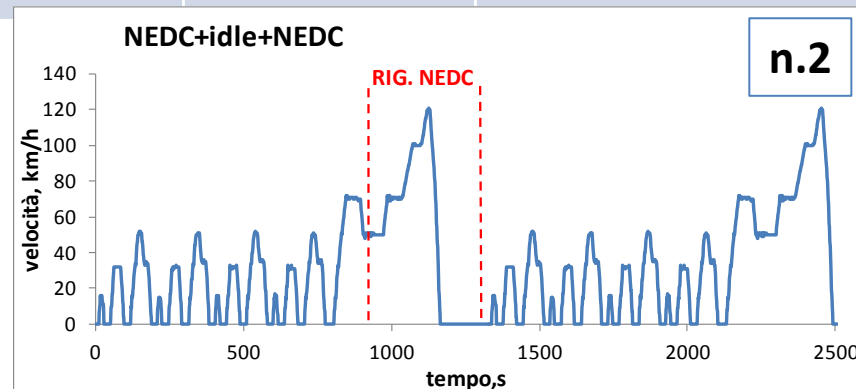
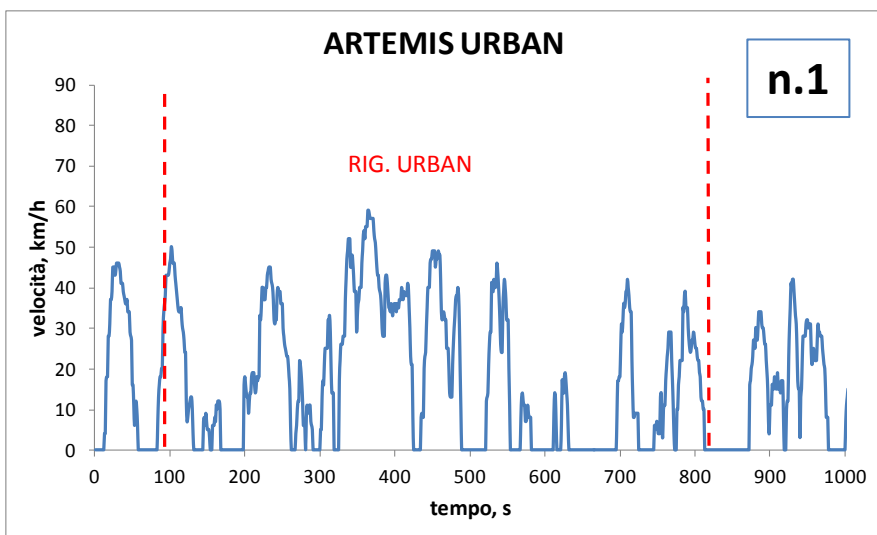
PMP comunemente utilizzato nei laboratori di
ricerca per studi di base

Case-studies prodotti da IM su contratto MIT e su altre attività

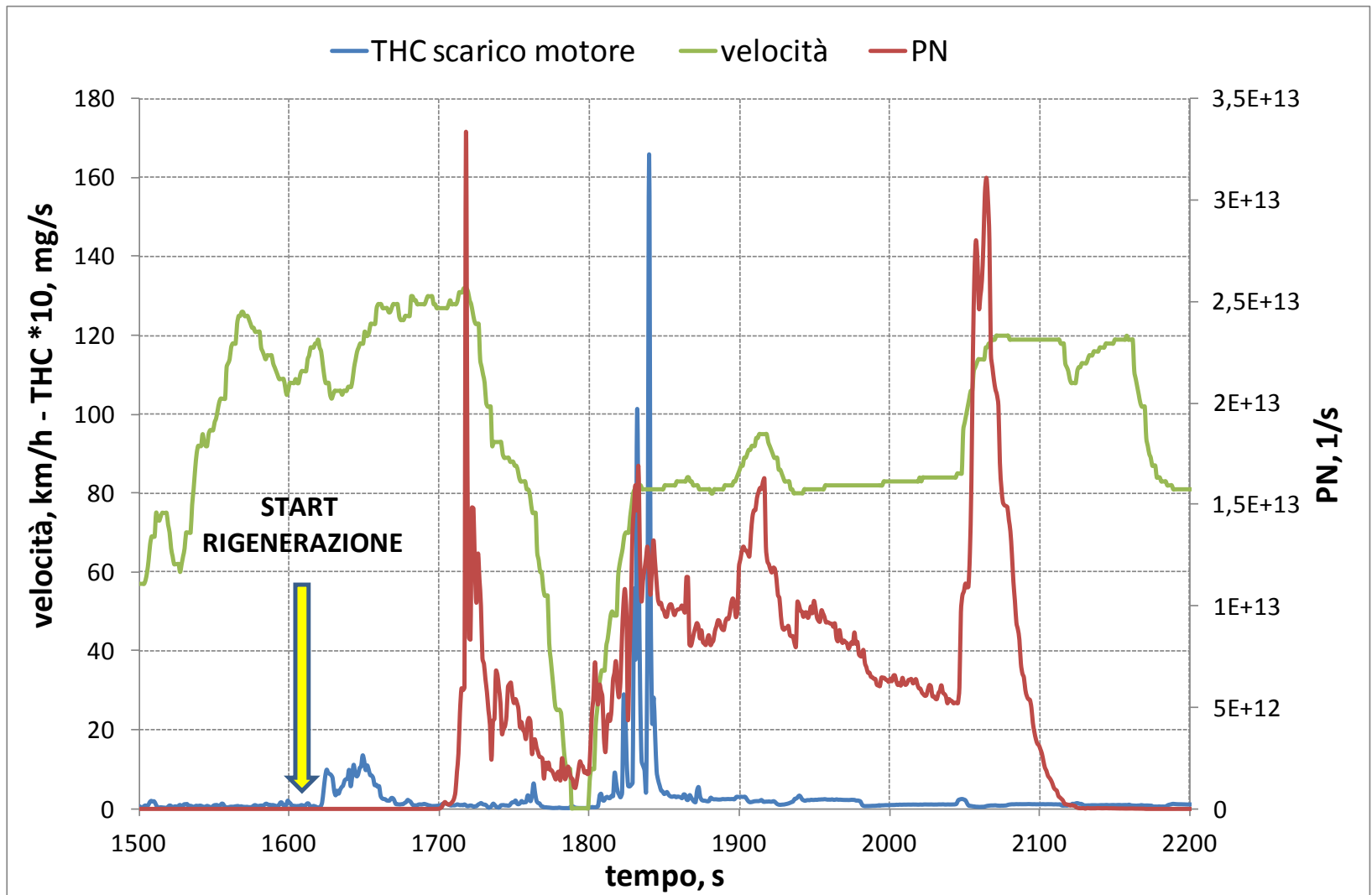
			Sistema controllo emissioni
Light-duty (veicoli commerciali)	Citroen Jumper 2.2	Euro5b	EGR, Pre-cat-+DPF (rigenerazione attiva tramite post-iniezioni in camera di combustione)
Passenger cars (autovetture)	Nissan Quashquai 1.5	Euro 4	EGR, Pre-cat-+DPF (rigenerazione attiva tramite post-iniezioni allo scarico)
	Alfa Romeo Mito 1.6	Euro 5a	EGR, Pre-cat-+DPF (rigenerazione attiva tramite post-iniezioni in camera di combustione)

Eventi rigenerativi – Citroen Jumper 2.2 EURO5b

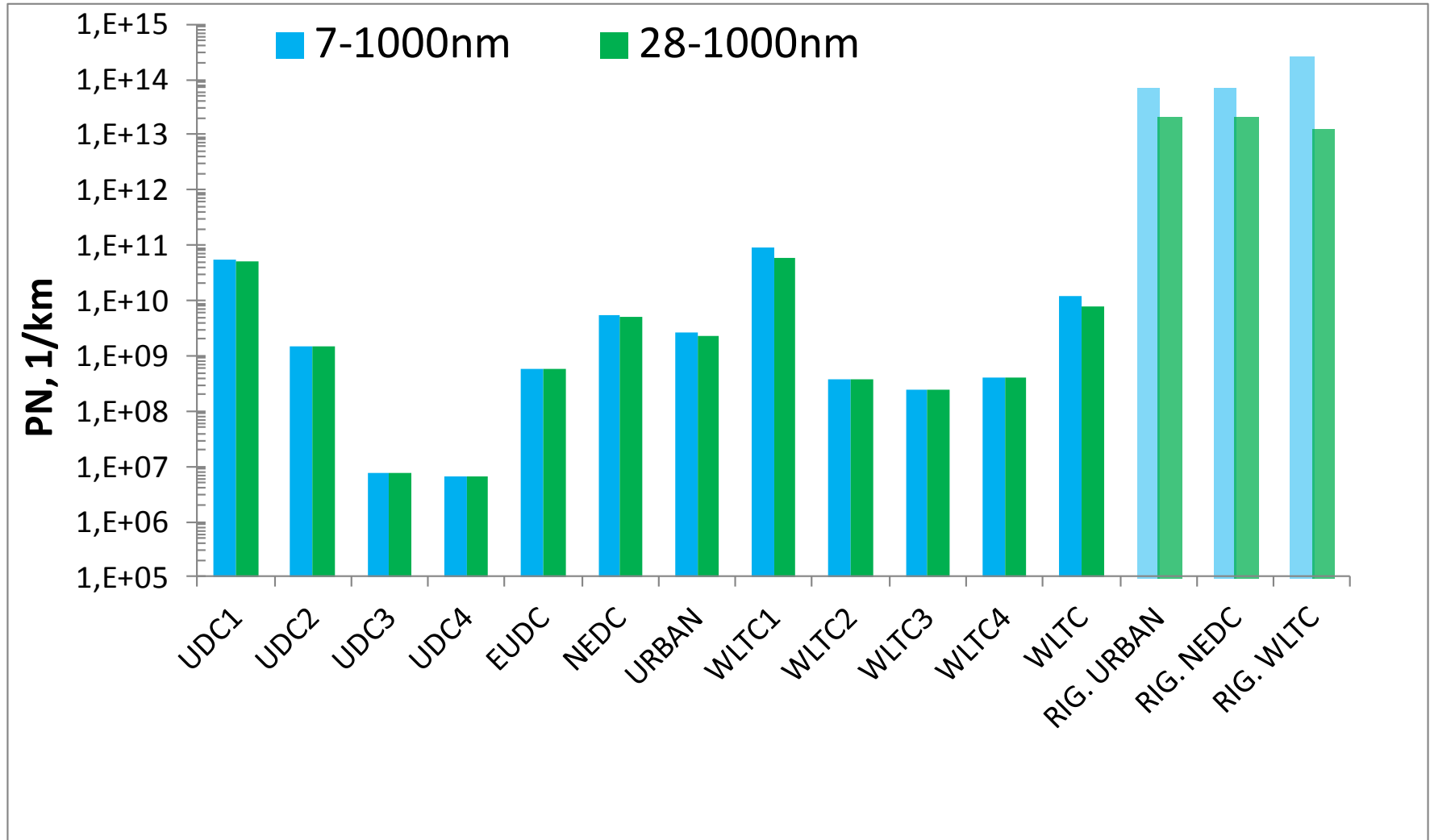
N°	data	Ciclo di guida	Distanza, km	Durata, s	Velocità media, km/h
1	11/12/2015	ARTEMIS URBAN	3.4	700	17.2
2	05/02/2016	NEDC	3.6	850	15.0
3	08/01/2016	WLTC+80km/h	12.9	510	90.8



Andamento parametri caratteristici durante la rigenerazione. Veicolo Citroen Jumper Eu5b



Risultati. Emissione PN per tipo di ciclo, frazione di ciclo e range dimensionale delle particelle. Veicolo Citroen Jumper Eu5b



Eventi rigenerativi analizzati su autovetture.

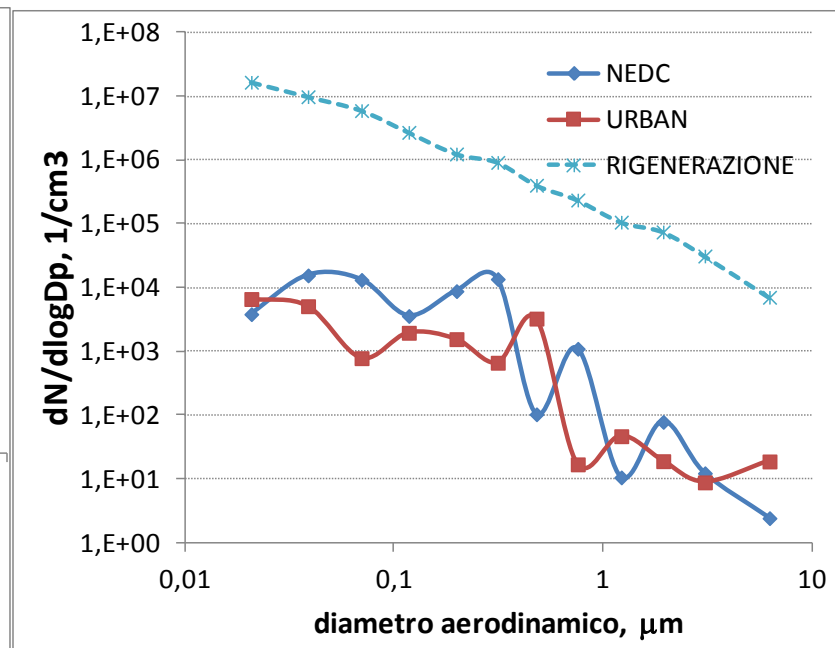
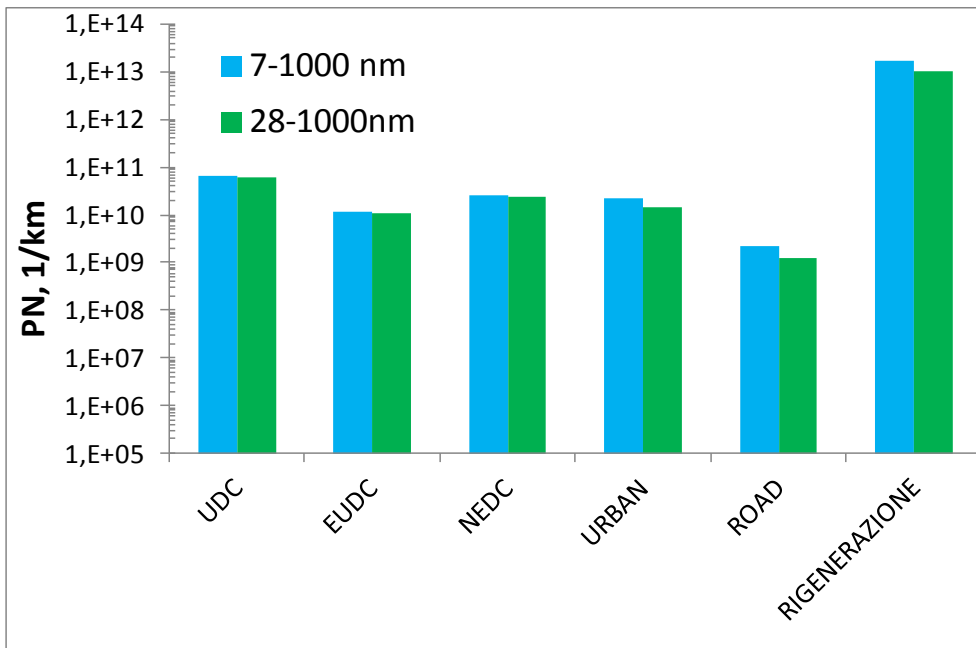
NISSAN QUASHQUAI

N°	data	Ciclo di guida	Distanza, km	Durata, s	Velocità media, km/h
1	15/07/2010	ARTEMIS ROAD	14.9	850	62.9

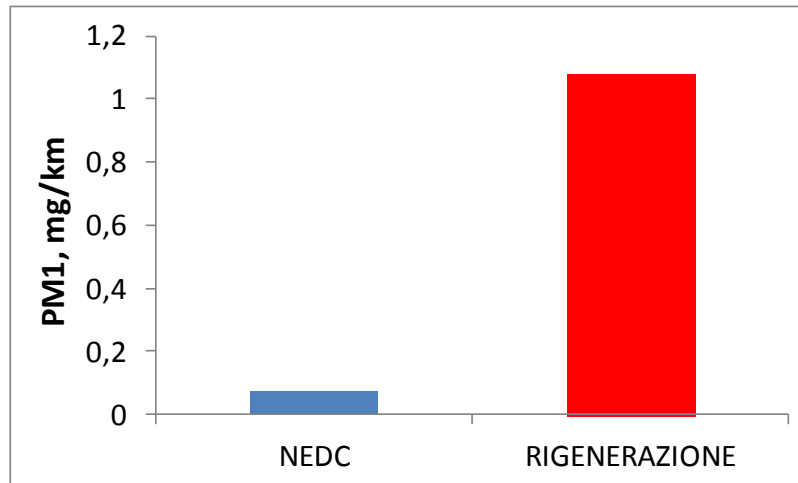
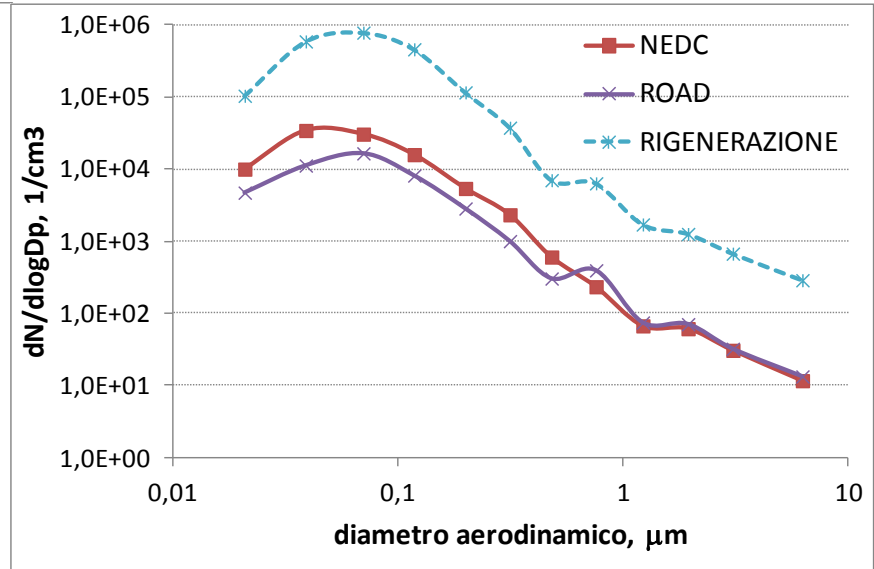
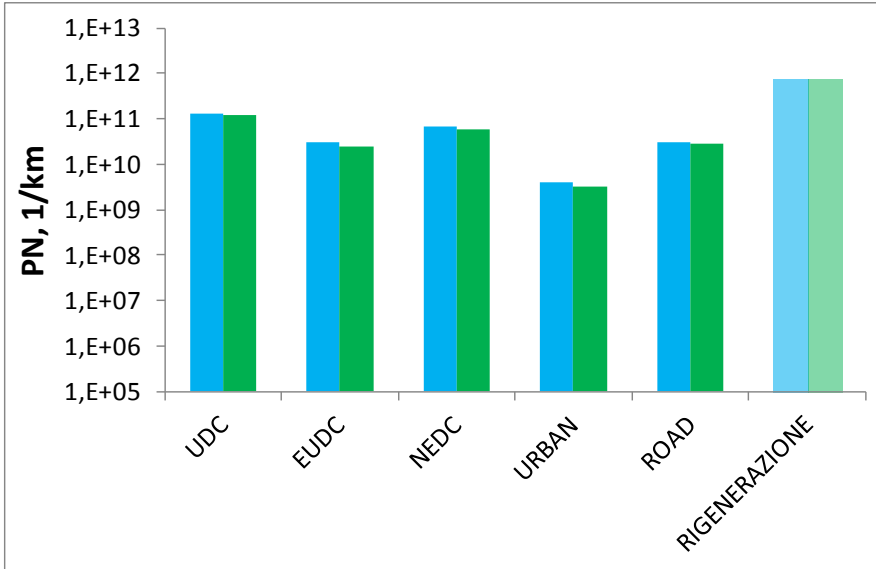
ALFA ROMEO MITO

1	26/05/2010	NEDC	7.9	500	56.8
---	------------	------	-----	-----	------

PN e PM1 – distribuzione dimensionale particelle Nissan Quashquai 1.5.



PN e PM1 – distribuzione dimensionale particelle Alfa Romeo MITO.



Stima emissioni medie di PM e PN includendo l'evento rigenerativo.

Distanza tra due rigenerazioni consecutive (ACCUMULO): 500km

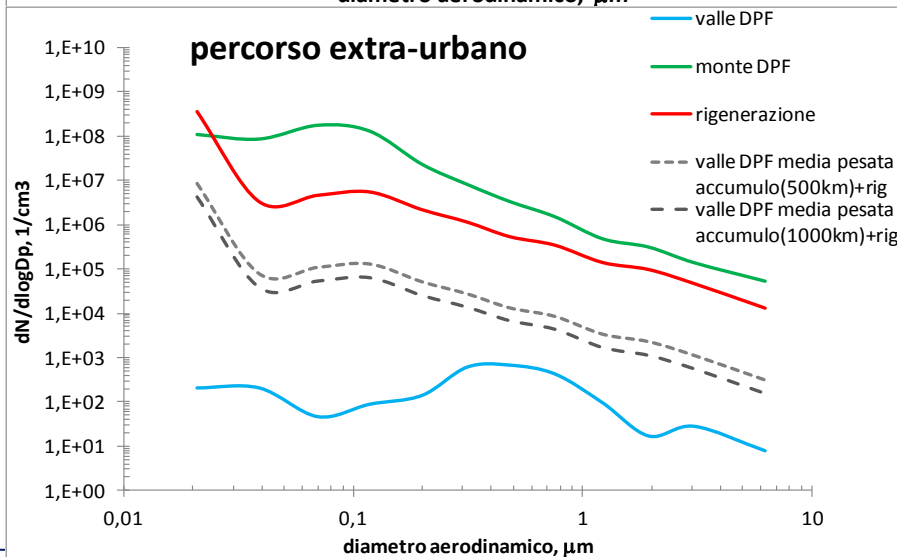
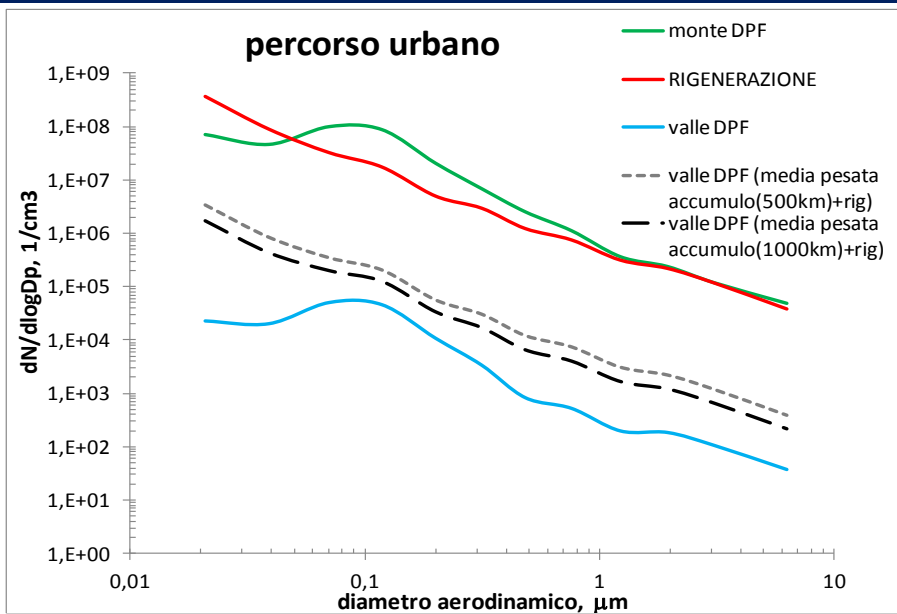
7nm-10µm

			PN ACCUMULO (valore medio), 1/km	distanza RIG., km	PN RIG., 1/km	PN ACCUMULO+RIG., 1/km
Veicolo commerciale leggero	Citroen Jumper	caso n°1 (RIG. URBAN)	1,39E+10	3,37	6,89E+13	4,75E+11
		caso n°2 (RIG. NEDC)	1,39E+10	3,60	7,20E+13	5,29E+11
		caso n°3 (RIG. WLTC)	1,39E+10	12,87	2,63E+14	6,62E+12
Autovettura	Nissan	RIG. ROAD	2,56E+10	14,90	1,75E+13	5,32E+11
	Alfa Romeo	RIG. NEDC	5,17E+10	7,90	7,60E+11	6,27E+10
			PM ACCUMULO (valore medio), mg/km	distanza RIG., km	PM RIG., mg/km	PM ACCUMULO+RIG., mg/km
Veicolo commerciale leggero	Citroen Jumper	caso n°1 (RIG. URBAN)	0,043	3,37	118,05	0,83
		caso n°2 (RIG. NEDC)	0,043	3,60	32,81	0,28
		caso n°3 (RIG. WLTC)	0,043	12,87	34,07	0,90
Autovettura	Nissan	RIG. ROAD	0,157	14,90	14,67	0,58
	Alfa Romeo	RIG. NEDC	0,069	7,90	1,08	0,08

28nm-10µm

			PN ACCUMULO (valore medio), 1/km	distanza RIG., km	PN RIG., 1/km	PN ACCUMULO+RIG., 1/km
Veicolo commerciale leggero	Citroen Jumper	caso n°1 (RIG. URBAN)	1,06E+10	3,37	2,00E+13	1,48E+11
		caso n°2 (RIG. NEDC)	1,06E+10	3,60	2,09E+13	1,63E+11
		caso n°3 (RIG. WLTC)	1,06E+10	12,87	1,23E+13	3,24E+11
Autovettura	Nissan	RIG. ROAD	2,26E+10	14,90	9,90E+12	3,11E+11
	Alfa Romeo	RIG. NEDC	4,65E+10	7,90	7,22E+11	6,21E+10

Distribuzioni dimensionali medie di PN includendo l'evento rigenerativo. Citroen Jumper 2.2 Euro 5b



Range dimensionale: 7nm-10μm

Stima distribuzione in accumulo+rigenerazione (rappresentazione in scala log-log)

Percorso

- urbano
- extra-urbano

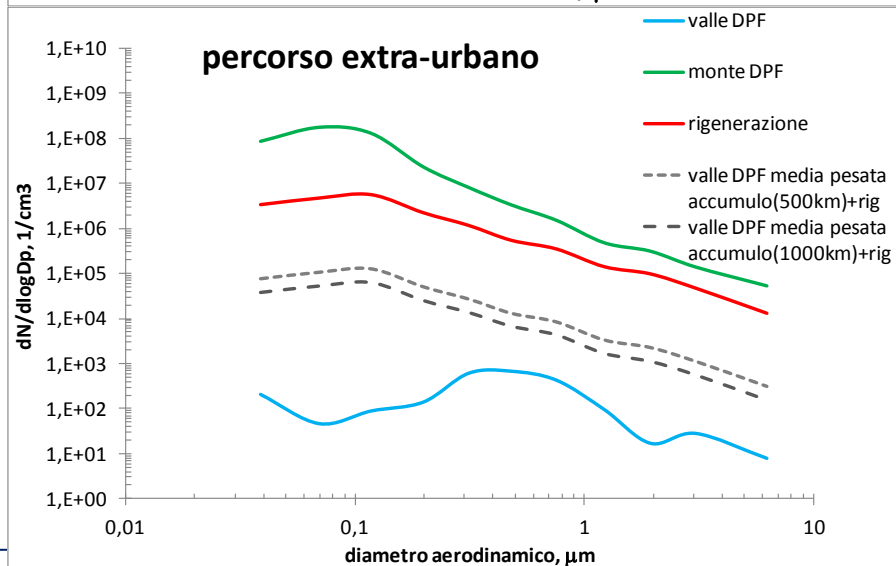
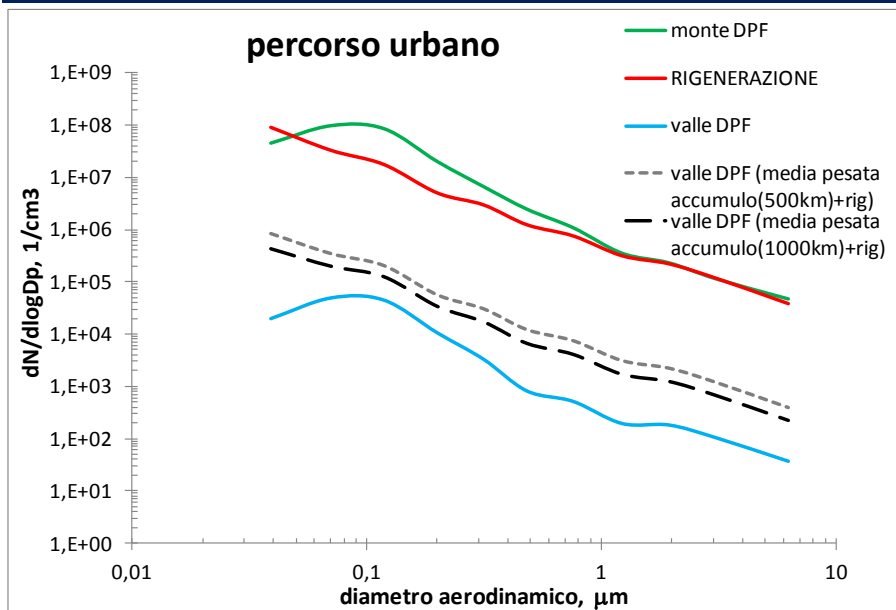
Durata fase di accumulo

- 500 km
- 1000 km

Evento rigenerativo ogni 106 cicli urbani o 21 cicli extra-urbani di accumulo (500km)

Evento rigenerativo ogni 212 cicli urbani o 43 cicli extra-urbani di accumulo (1000km)

Distribuzioni dimensionali medie di PN includendo l'evento rigenerativo. Citroen Jumper 2.2 Euro 5b



Range dimensionale: 28nm-10 μm

**Stima distribuzione in
accumulo+rigenerazione**
(rappresentazione in scala log-log)

Percorso

- urbano
- extra-urbano

Durata fase di accumulo

- 500 km
- 1000 km

Evento rigenerativo ogni 106 cicli urbani o 21 cicli extra-urbani di accumulo (500km)

Evento rigenerativo ogni 212 cicli urbani o 43 cicli extra-urbani di accumulo (1000km)

CONCLUSIONI

In definitiva si ha evidenza che le emissioni di particolato misurate (con protocollo PMP) in un intervallo di funzionamento del veicolo (rispondente alla norma Euro 5/Euro 6) che comprenda anche una fase di rigenerazione, rispetto alle motorizzazioni senza FAP/DPF (Euro 4):

- sono ridotte in termini di massa (PM) di almeno il 95%;
- sono ridotte in termini di numero (PN) di almeno il 95%.

Nel caso dei FAP wall-flow, sia essi attivi che passivi, durante il processo di rigenerazione si ha una tendenza generale ad un'emissione maggiore di particelle nanometriche. Una buona parte delle particelle emesse è di natura volatile o semivolatile con dimensioni al di sotto della soglia di normativa (23nm).

Comunque le emissioni di nano-particelle di un veicolo valutate in una percorrenza media (inclusa una rigenerazione) risultano notevolmente inferiori a quelle che verrebbero emesse nell'atmosfera, dallo stesso motore, in assenza di filtro.

La velocità di evoluzione tecnologica dei FAP è pari a quella motoristica e, per alcuni aspetti, pari a quella della strumentazione diagnostica. E' pertanto lecito aspettarsi un progressivo miglioramento delle prestazioni dei FAP.

Le attività di ricerca in corso sono orientate principalmente allo sviluppo di strumentazione diagnostica, in grado di misurare con accuratezza qualità e quantità le particelle con diametro <23nm (con contestuale definizione della procedura normata di misura), allo sviluppo di FAP in grado di ridurre ulteriormente le emissioni di particelle in tutto lo spettro dimensionale ed evitare o ridurre al minimo il processo di rigenerazione.