



# STUDIO TECNICO – SCIENTIFICO SUL FUNZIONAMENTO DEI FILTRI ANTIPARTICOLATO PER MOTORI DIESEL – FAP (DPF)

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti  
Dipartimento per i Trasporti terrestri, la navigazione,  
gli affari generali ed il personale  
3 marzo 2016

Carlo Beatrice  
Maria Antonietta Costagliola  
Chiara Guido  
Maria Vittoria Prati



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

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

1. PREMESSA
2. OBIETTIVO DELLO STUDIO
3. ATTIVITA' DELLO STUDIO
4. INTRODUZIONE
5. METODOLOGIA DELLO STUDIO DI LETTERATURA
6. RISULTATI DELLO STUDIO DI LETTERATURA
7. METODOLOGIA DELLE ANALISI SPERIMENTALI
8. RISULTATI DEI TEST SPERIMENTALI
9. CONCLUSIONI

# 1. PREMESSA

L'Istituto Motori del CNR ha condotto 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.

Le attività dell'Istituto Motori sono state espletate attraverso sia lo studio di dati di letteratura scientifica sia attraverso attività sperimentali nei propri laboratori.

## 2. OBIETTIVO DELLO STUDIO

- Obiettivo dello studio è la valutazione dell'efficacia di abbattimento del particolato allo scarico, mediante l'impiego del FAP, prodotto dai motori diesel. Le valutazioni espresse nel seguito 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 basa 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.

# 3. ATTIVITA' DELLO STUDIO

- ATTIVITA' 1

Studio sul funzionamento dei sistemi DPF e sul processo di rigenerazione degli stessi. Analisi tecnico-scientifica delle caratteristiche di funzionamento dei sistemi DPF e delle loro prestazioni in termini di abbattimento delle emissioni di particolato in massa e in numero di particelle sulla base della letteratura scientifica disponibile.

- ATTIVITA' 2

Caratterizzazione delle emissioni di particolato e nanoparticelle in esperimento dedicato durante eventi di rigenerazione del DPF installato su veicolo diesel a norma Euro 5b e provato sul banco a rulli dinamometrico dell'Istituto Motori.

- ATTIVITA' 3

Analisi dei dati e stesura Relazione Tecnica.

# 4 INTRODUZIONE

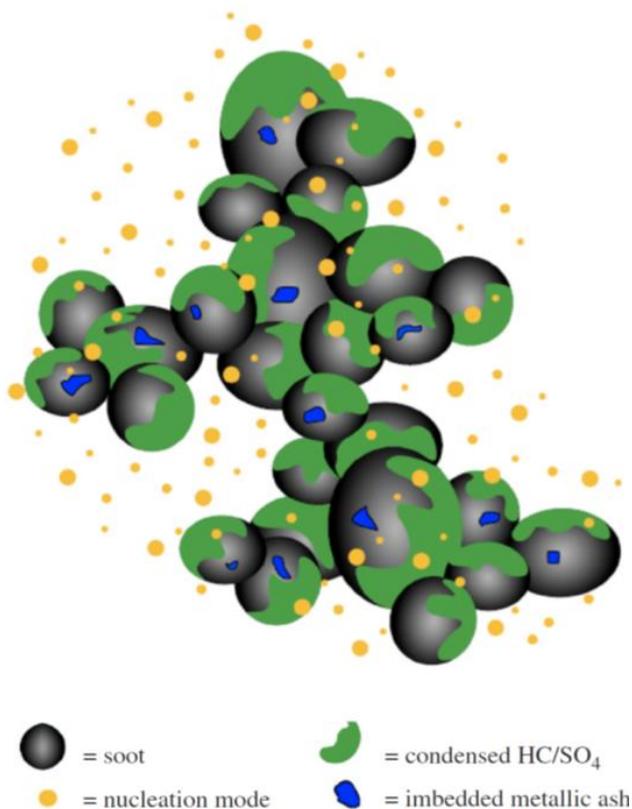
## COSA È IL PARTICOLATO E COME SI FORMA



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.



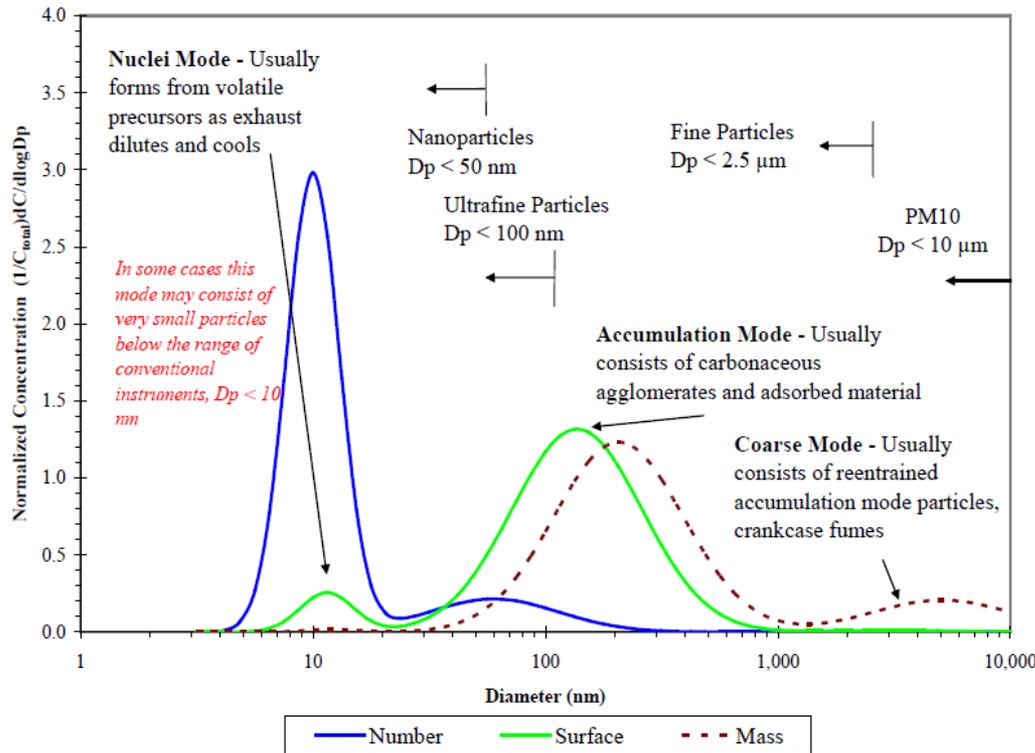
# 4.1 NATURA DEL PARTICOLATO



- 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)

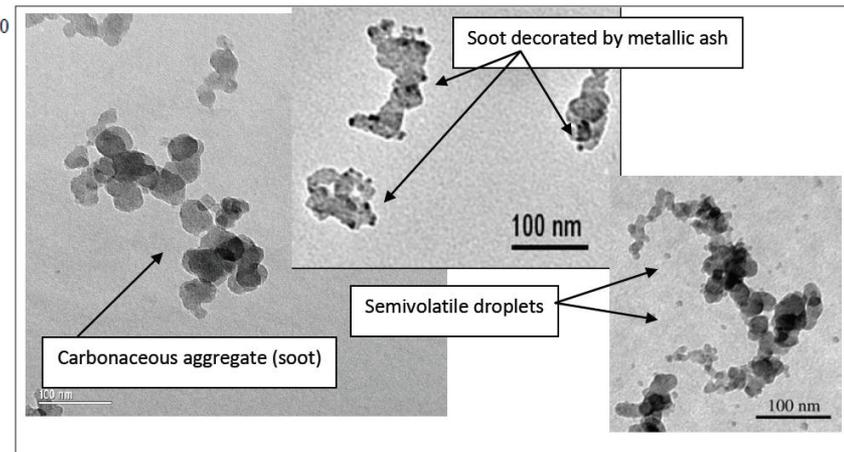
Ref: M. Mariq, Chemical characterization of particulate emissions from diesel engines: a review, Journal of aerosol science, 38 (2007) 1079-1118

# 4.2 DIMENSIONI, CLASSI E NUMERO DELLE PARTICELLE



Spettro dimensionale del particolato emesso da motori diesel

Immagini della morfologia e dimensione delle classi di particelle emesse allo scarico dei motori diesel.



Ref: Kittelson and Kraft, Particle Formation and Models in Internal Combustion Engines, Cambridge Univ., ISSN 1473 – 4273

## 4.3 Dati di letteratura sulla misura del PM e del PN in EU

- The standards are based on “solid” particles larger than 23 nm
  - Light-duty, Euro 5b, September 2011
    - The standard is  $6 \times 10^{11}$  particles/km
    - The mass emission standard is 4.5 mg/km, but the number standard corresponds to about 0.15 to 0.7 mg/km, depending on DGN – a much tighter standard!
    - An interim standard of  $6 \times 10^{12}$  has been set for gasoline vehicles, through 2017, after that they must meet diesel standard
  - Heavy-duty, Euro VI, January 2013
    - The standards are  $6 \times 10^{11}$  and  $8 \times 10^{11}$  particles/kWh on the WHTC and the WHSC, respectively
    - The mass emission standard is 10 mg/kWh, but the number standard corresponds to about 0.2 to 0.9 mg/kWh, depending on DGN – again a much tighter standard!
- Meaningful filter mass measurements are impossible at levels corresponding to these number standards
- New US light-duty standard of 0.6 mg/km
  - Measurement challenge using filter mass (CRC E99)
  - Corresponds to from 5 to  $30 \times 10^{11}$  particles/km, easily measured by number

Ref: Kittelson, Prospects of meeting EU number emission standards with a diesel engine without a DPF, 2014

[http://www.cambridgeparticlemeeting.org/sites/default/files/Presentations/2014/CPM\\_Kittelson\\_2014\\_Prospects%20of%20meeting%20EU%20number%20emission%20standards%20with%20a%20diesel%20engine%20without%20a%20DPF.pdf](http://www.cambridgeparticlemeeting.org/sites/default/files/Presentations/2014/CPM_Kittelson_2014_Prospects%20of%20meeting%20EU%20number%20emission%20standards%20with%20a%20diesel%20engine%20without%20a%20DPF.pdf)

# 4.4 GENERAZIONE DELLE NANOPARTICELLE VOLATILI

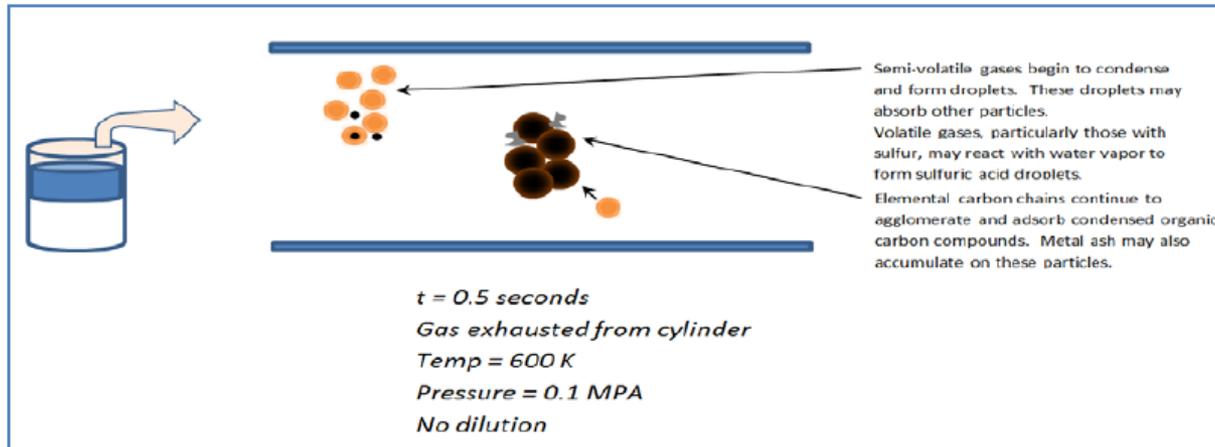


Figure 5. Particle condensation, nucleation, and adsorption in the exhaust

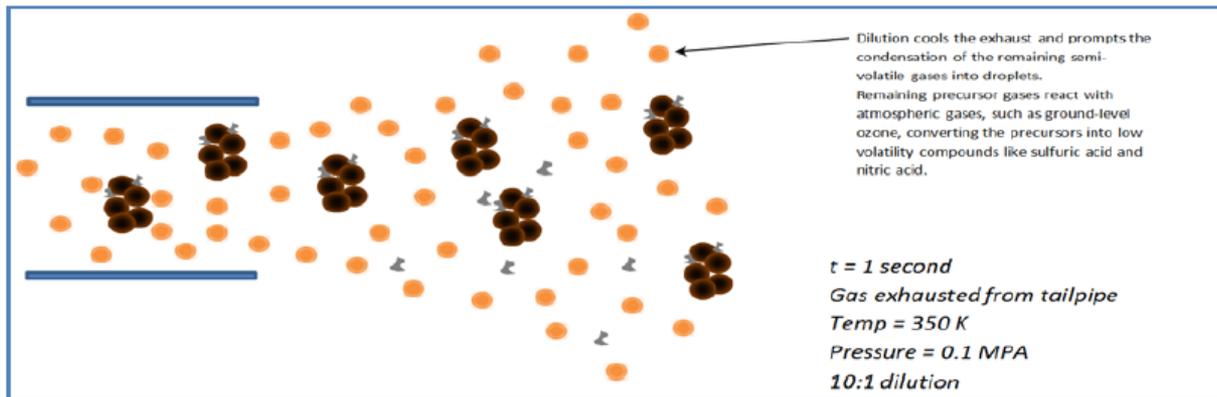
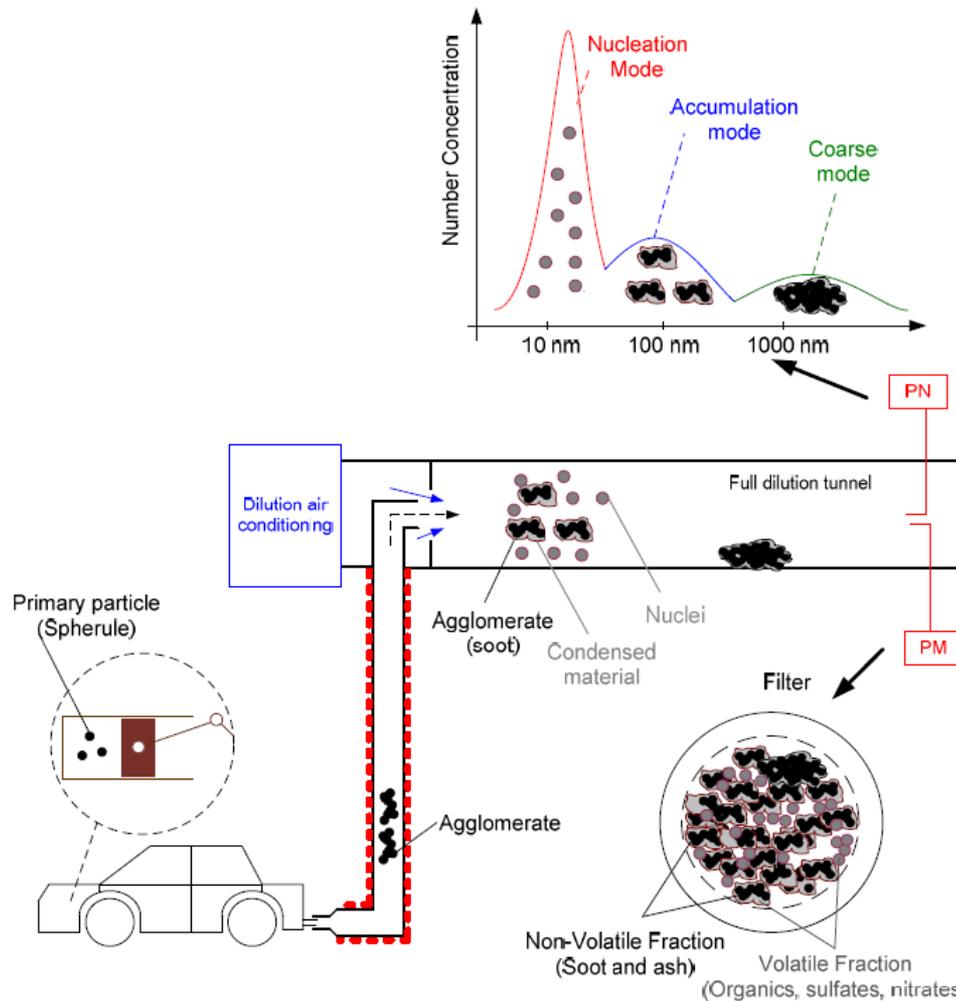


Figure 6. Exhaust of complex mixtures of UFPs and secondary aerosol precursors

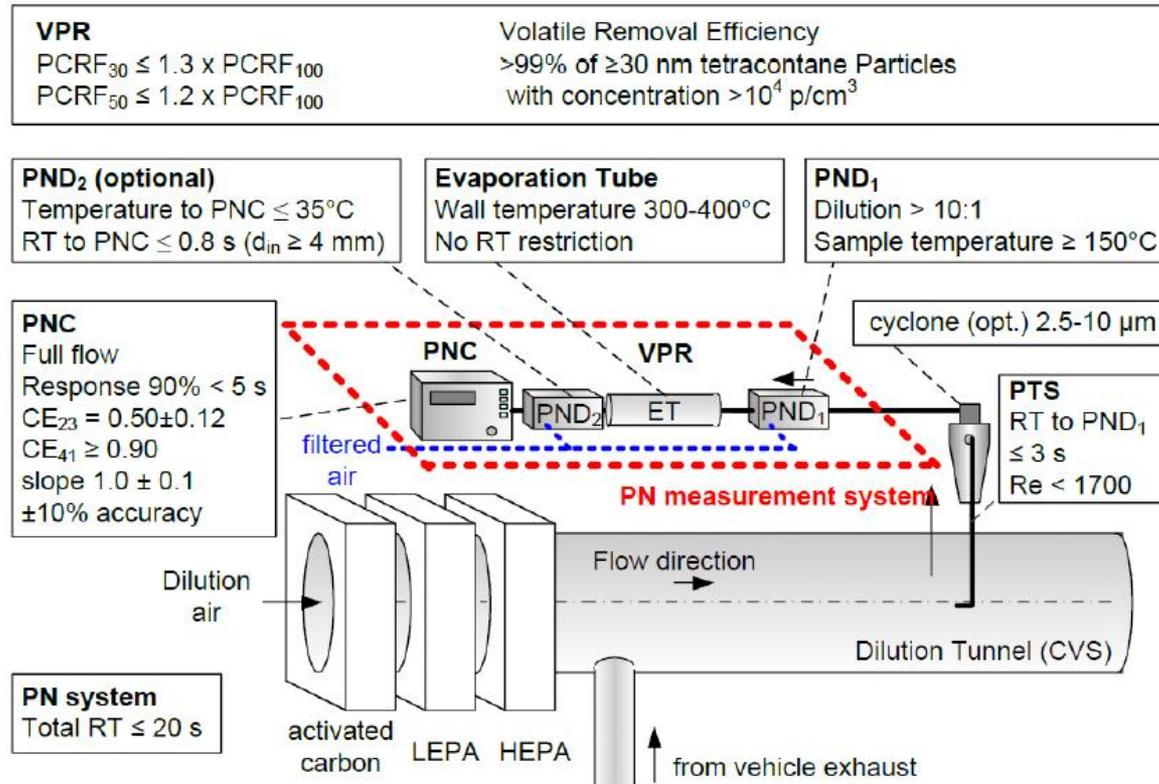
# 4.5 COSA SUCCEDDE DALLO SCARICO DEL VEICOLO ALLA MISURA



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

# 4.6 Procedura di misura del PN a norma UNECE PMP (Particle Measurement Programme)

Giechaskiel, B. and Martini, G., "Engine Exhaust Solid Sub-23 nm Particles: II. Feasibility Study for Particle Number Measurement Systems," SAE Int. J. Fuels Lubr. 7(3):2014, doi:10.4271/2014-01-2832

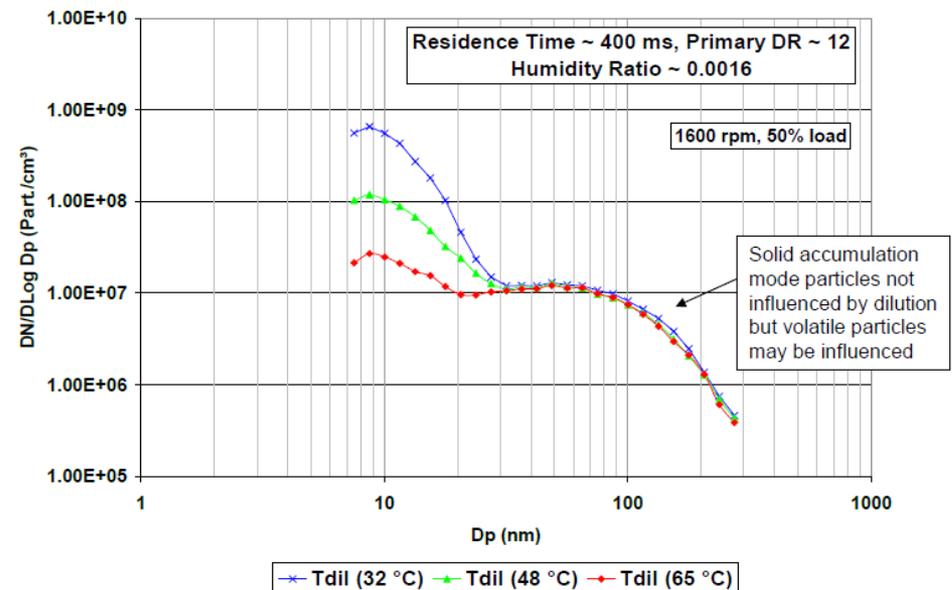


Dal veicolo

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  $> 23$  nm.

# 4.7 PERCHE' LO STANDARD PMP E' PER PARTICELLE SOLIDE Diam. $\geq 23$ nm

- Le particelle con diametro  $\geq 23$  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.

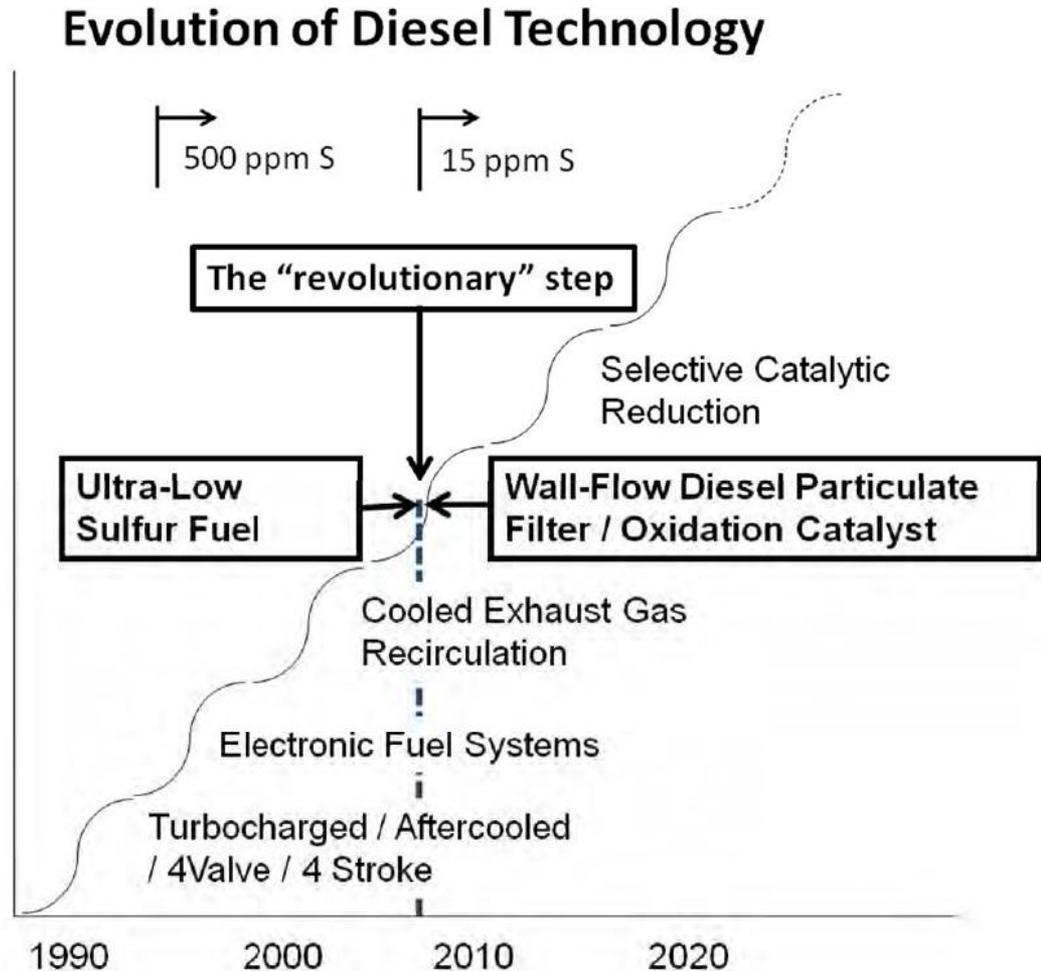


Ref: Kittelson, Prospects of meeting EU number emission standards with a diesel engine without a DPF, 2014

[http://www.cambridgeparticlemeeting.org/sites/default/files/Presentations/2014/CPM\\_Kittelson\\_2014\\_Prospects%20of%20meeting%20EU%20number%20emission%20standards%20with%20a%20diesel%20engine%20without%20a%20DPF.pdf](http://www.cambridgeparticlemeeting.org/sites/default/files/Presentations/2014/CPM_Kittelson_2014_Prospects%20of%20meeting%20EU%20number%20emission%20standards%20with%20a%20diesel%20engine%20without%20a%20DPF.pdf)

# 4.8 Evoluzione tecnologia diesel per controllo emissioni

- Uno step fondamentale nel processo di riduzione delle emissioni dei motori diesel è avvenuto tra il 2006 e 2009 con la diffusione dell'installazione dei FAP wall-flow (chiusi).

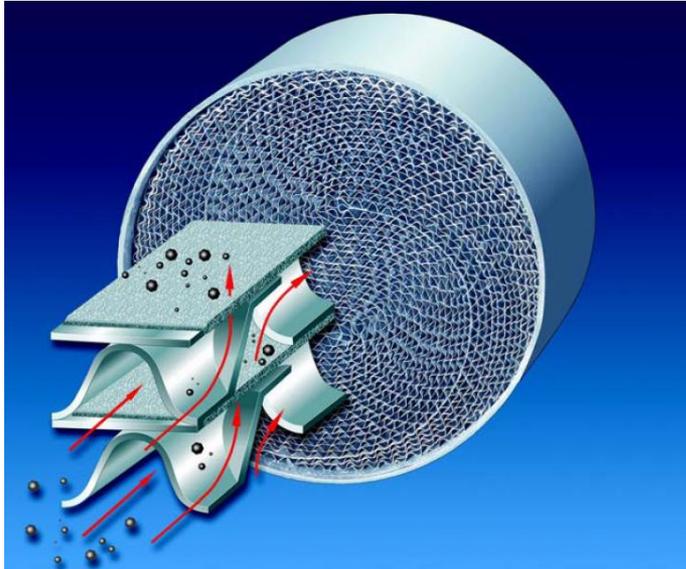


Ref: CONCAWE Report. A global and historical perspective on the exposure characteristics of traditional and new technology diesel exhaust.  
[https://www.concawe.eu/uploads/Modules/Publications/irsg\\_diesel\\_report\\_may\\_7\\_2012\\_final-2012-02105-01-e.pdf](https://www.concawe.eu/uploads/Modules/Publications/irsg_diesel_report_may_7_2012_final-2012-02105-01-e.pdf)

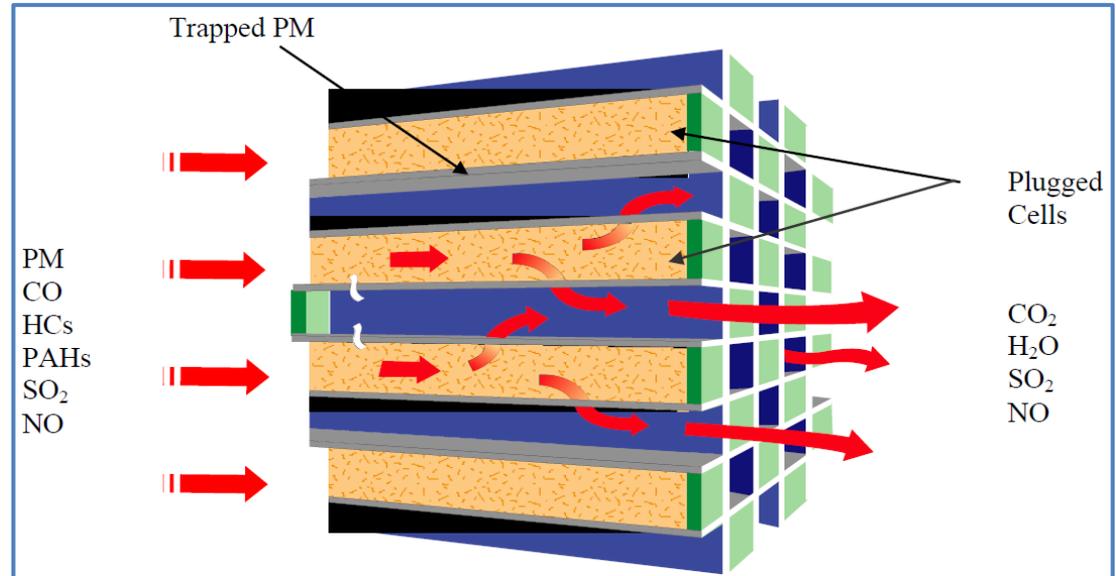
## 4.9 COSA SONO I FAP (Diesel Particulate Filter - DPF)

- 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)

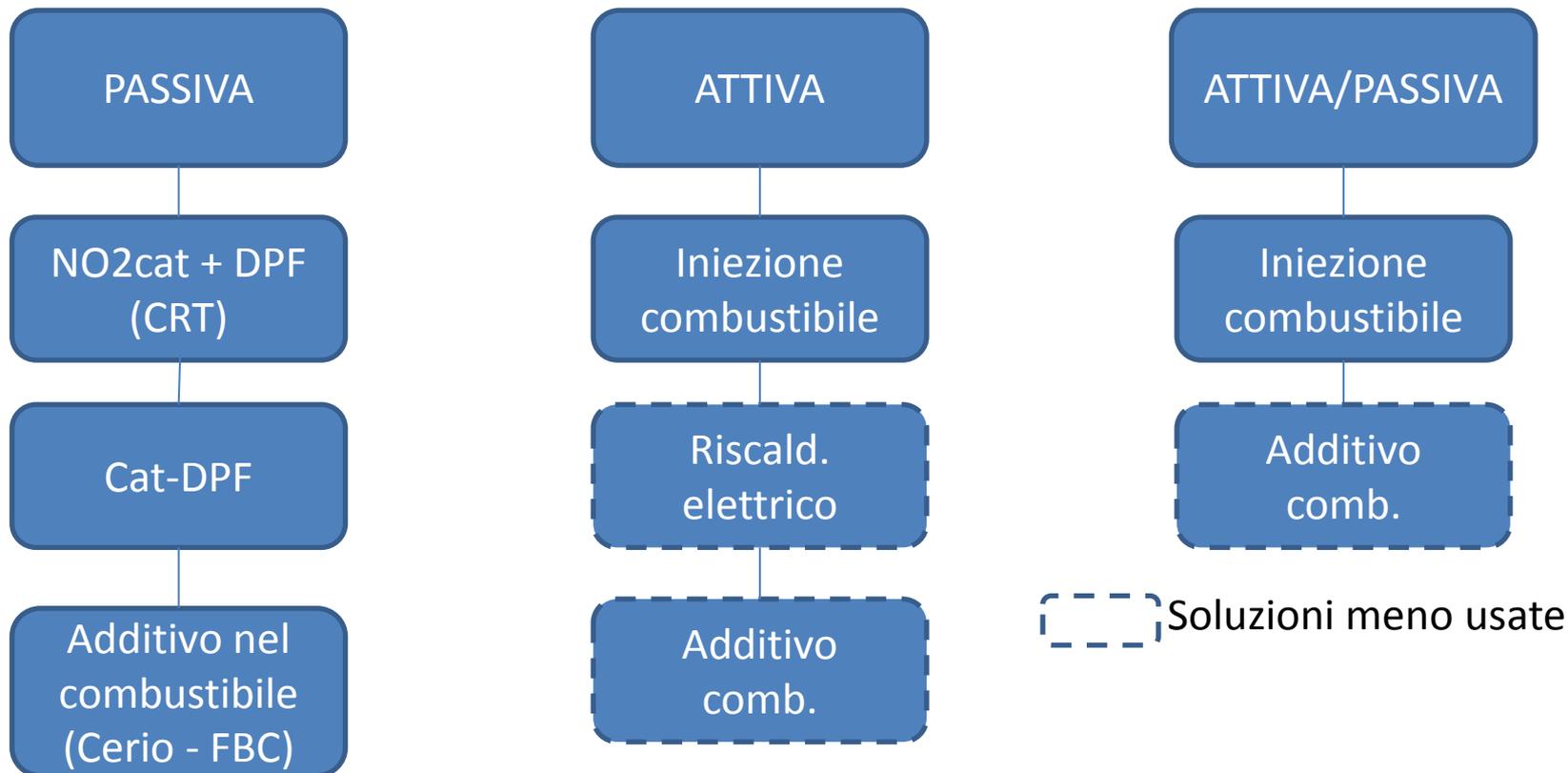


- I Flow-Through-DPF sono filtri costituiti da fogli corrugati in cui il flusso è forzato a passare in un sottile foglio poroso (generalmente catalizzato).
- I Wall-Flow-DPF sono filtri ceramici costituiti da un monolite con canali paralleli alternativamente interrotti in cui il flusso è forzato a passare 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](http://www.meca.org/galleries/files/MECA_Diesel_White_Paper_12-07-07_final.pdf)

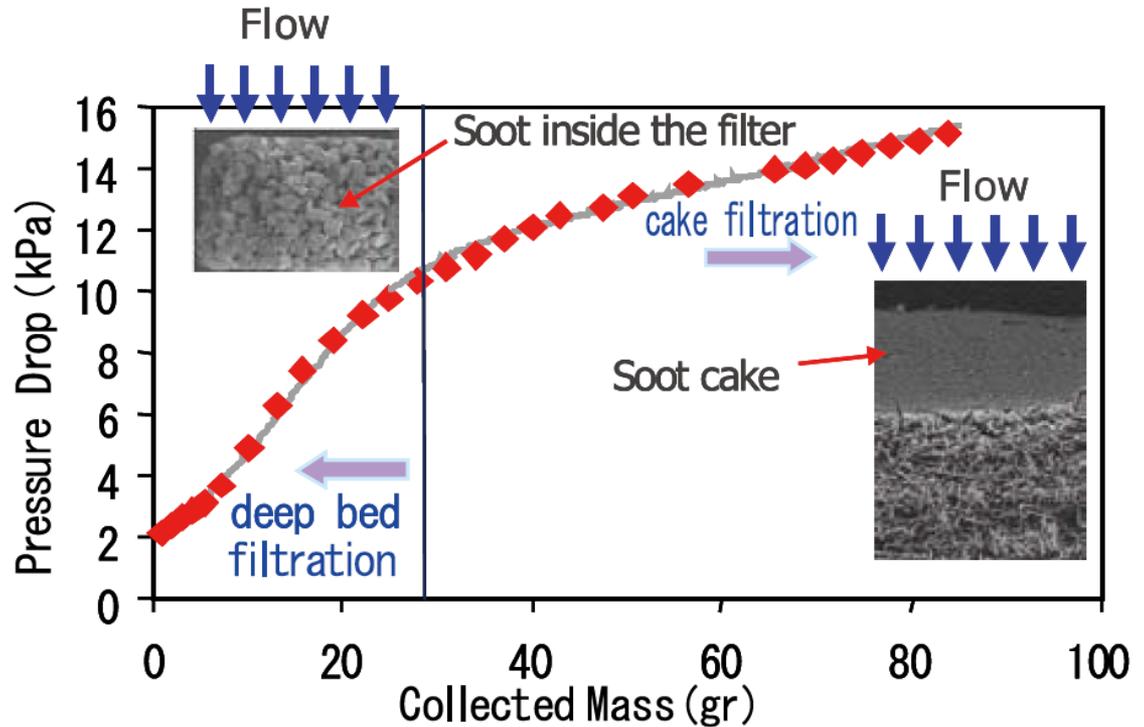
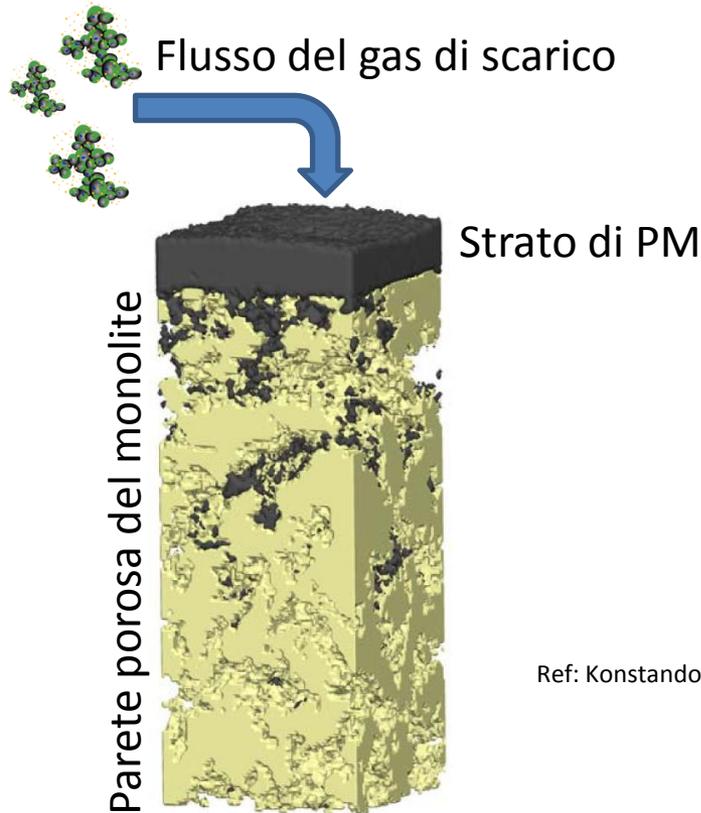
## 4.10 FAP per tipologia di rigenerazione

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.

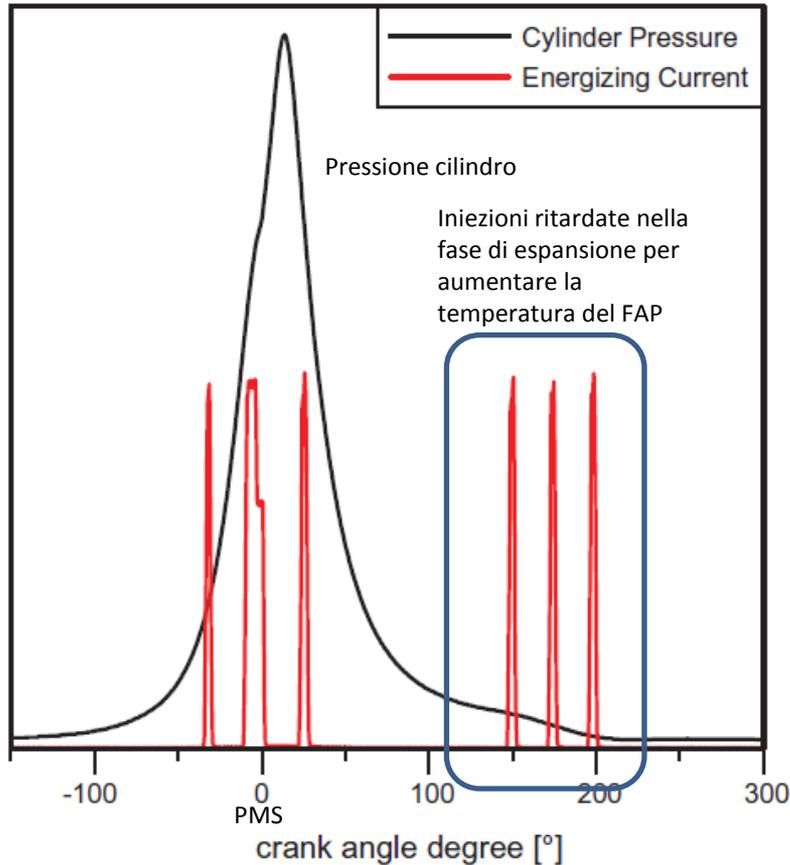
# 4.11 Processo di filtrazione dei FAP



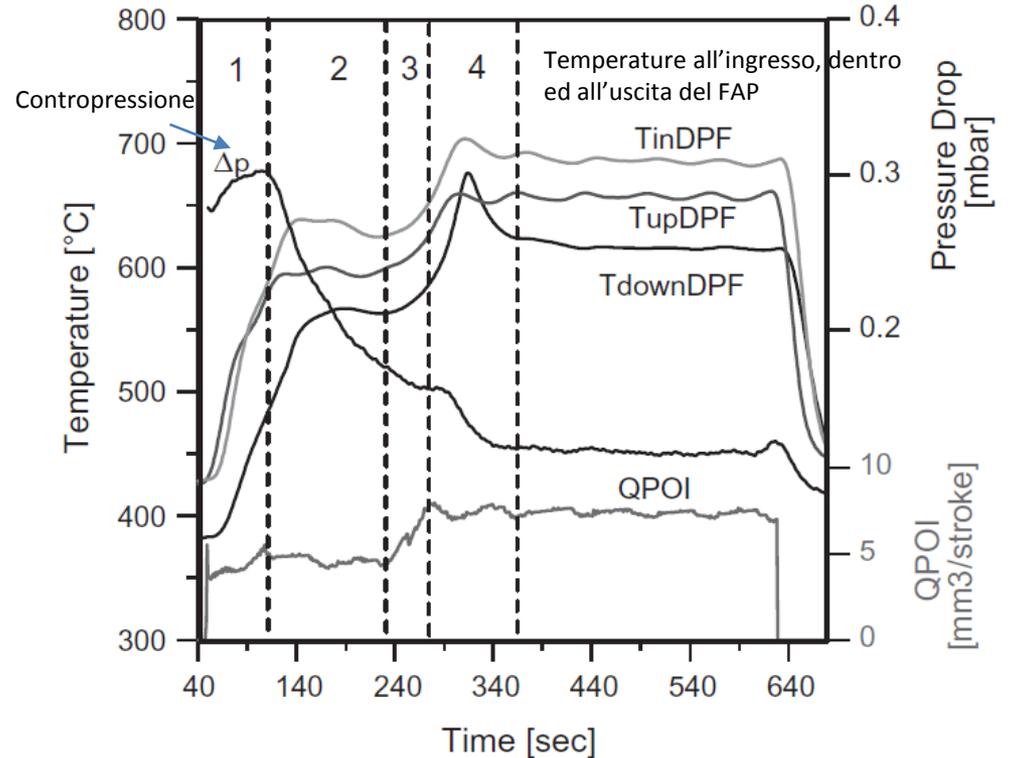
Ref: Konstandopoulos et al., Update on The Science and Technology of DPF. KONA Powder and Particle Journal No.26 (2008)

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 (deep bed filtration), e poi via via sulla superficie di ingresso a causa dello strato di PM che si genera (soot cake filtration). Oltre un certo accumulo il filtro deve essere rigenerato ossidando il PM accumulato.

# 4.12 Rigenerazione attiva dei wall-flow FAP



Ref: C. Beatrice et al. / Experimental Thermal and Fluid Science 39 (2012) 45–53



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».

# 5 METODOLOGIA DELLO STUDIO DI LETTERATURA

I criteri di ricerca bibliografica sono stati definiti al fine di rispondere ai seguenti quesiti:

1. *L'uso del FAP/DPF negli autoveicoli e nei veicoli commerciali, sia esso wall-flow che flow-through, nonché attivo o passivo, migliora l'emissione di particolato in termini di massa ed in termini di numero di particelle?*
2. *Come varia l'emissione di particelle micrometriche e nanometriche durante la rigenerazione per i FAP che necessitano di tale operazione? Se varia, quale tipo di particelle ne è principalmente influenzato? Come si comporta il FAP dopo l'evento rigenerativo?*

## 5.1 METODOLOGIA DELLO STUDIO DI LETTERATURA

- Lo studio bibliografico si è basato su articoli di letteratura riportati sia nelle riviste scientifiche «internazionalmente riconosciute», sia in report tecnici di Università, Enti ed Istituzioni di ricerca specializzate nel settore dei trasporti.
- Data la varietà e il notevole numero di documenti disponibili, si è operata una selezione dei documenti più significativi che rispondessero agli obiettivi dello studio. Pertanto la ricerca si è principalmente focalizzata sugli articoli che avevano come obiettivo la misura dell'efficienza delle varie tipologie di FAP durante il loro funzionamento, tenendo conto anche delle fasi di rigenerazione per i FAP «attivi».
- Sulla base del numero di documenti raccolti, della loro provenienza, e della data di produzione/pubblicazione, gli autori ritengono che il database raccolto è sufficientemente rappresentativo del know-how disponibile sul funzionamento e le prestazioni della tecnologia FAP.

# 6 RISULTATI DELLO STUDIO DI LETTERATURA

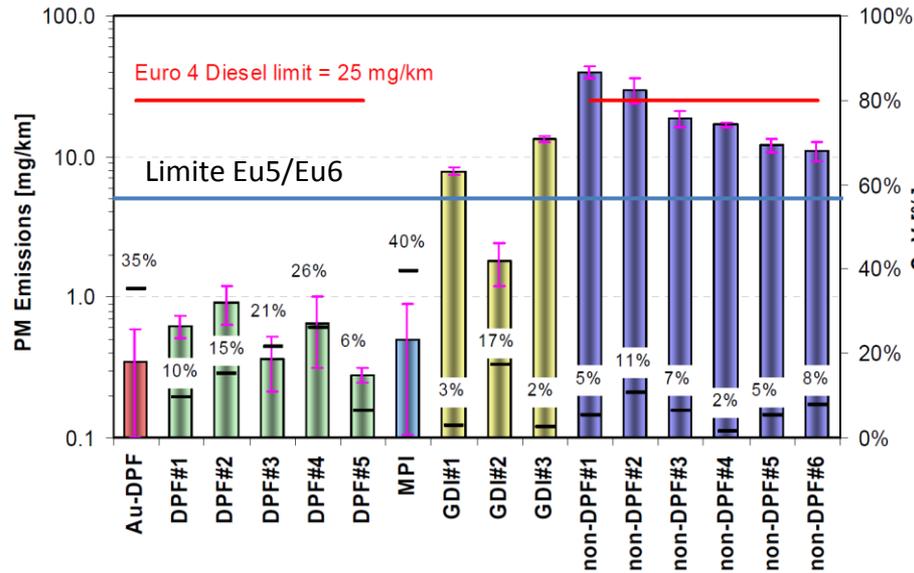
## Tabella dei documenti raccolti

Numero articoli scientifici raccolti sul funzionamento dei FAP	Numero articoli scientifici selezionati per dati utili	N° articoli relativi ad autoveicoli (light-duty)	N° articoli relativi a veicoli commerciali autoveicoli (MD/HD)	Rigenerazione attiva	Rigenerazione passiva
110	50 Articoli originali	20	20	29	11
16 Articoli di Review					

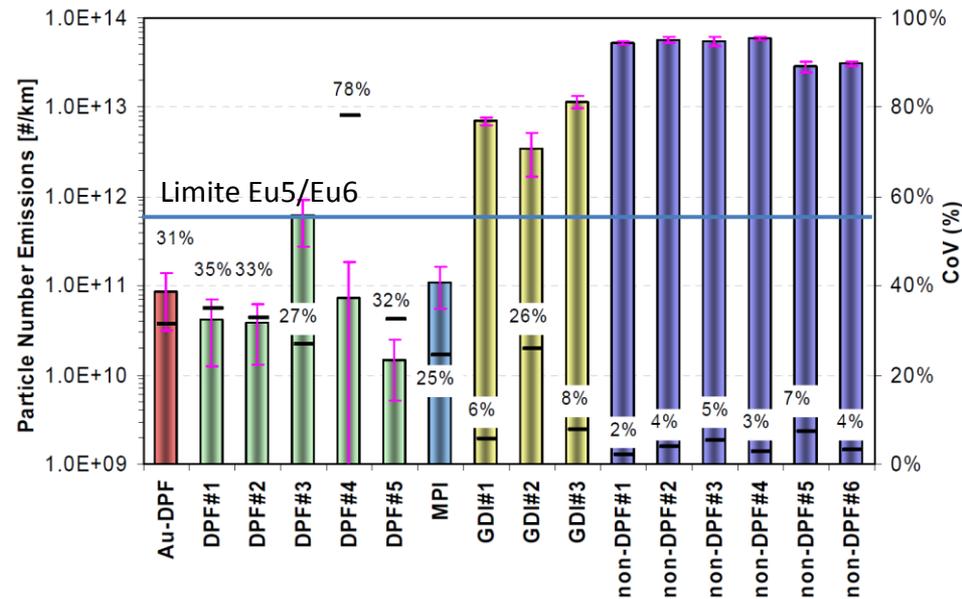
## 6.1 Contenuti dei documenti raccolti

- Gli articoli raccolti includono autovetture e veicoli commerciali di varia taglia (Medium Duty ed Heavy Duty);
- Gli studi eseguiti hanno contemplato test in laboratorio con motore al banco-prova, veicoli in laboratorio su banco a rulli e prove su strada;
- Sono stati impiegati varie strumentazioni (EPLI, EEPS, SMPS, DMS, DMA, CPC ecc.) e procedure (standard PMP ed altre);
- Le metodologie di test hanno considerato sia analisi dell'efficienza del FAP in normale condizione di funzionamento che in fase di rigenerazione (per i FAP attivi);
- Per semplicità di analisi, nelle slide successive sono riportati i grafici più rappresentativi dei risultati rilevati. In ciascuna di esse sono spiegate le tendenze generali riscontrate.

# 6.2 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%.**

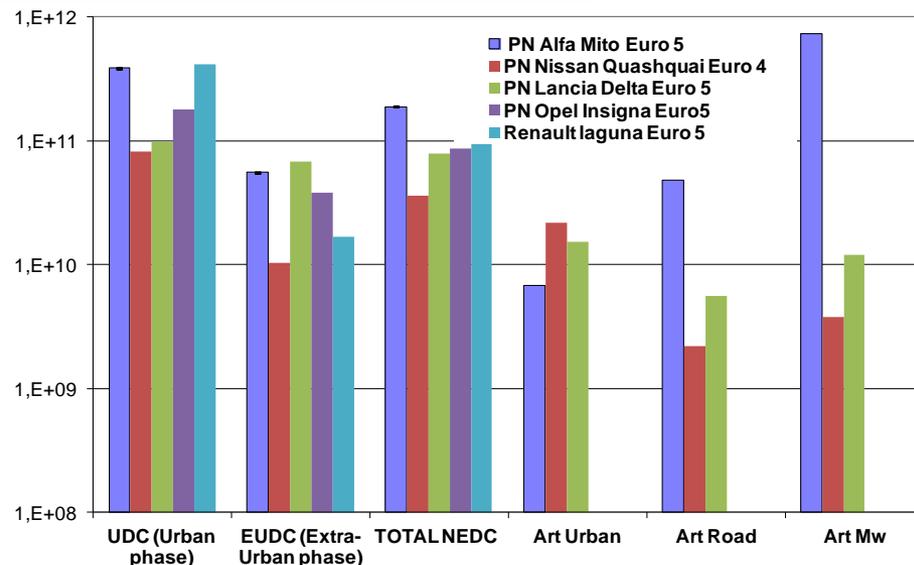
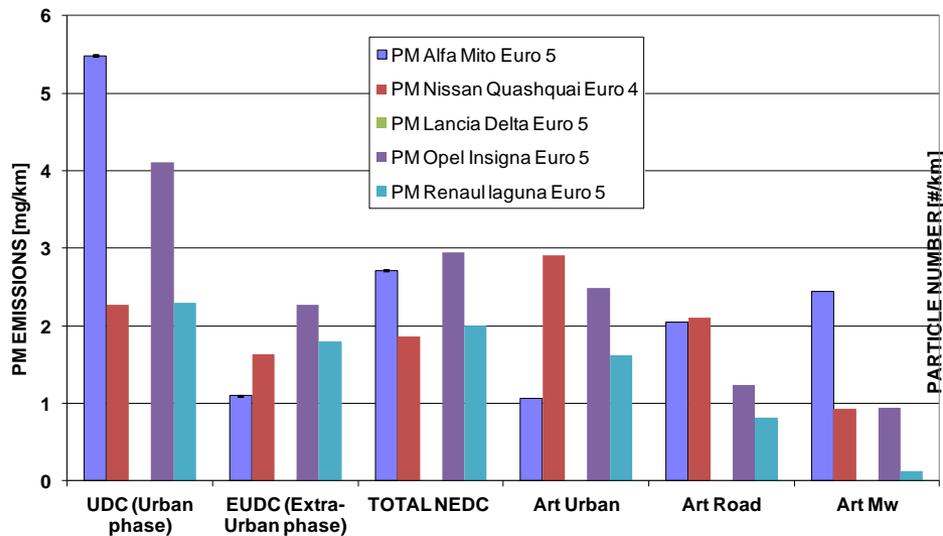


L'uso del FAP abbassa di circa 1000 volte l'emissione di Particelle PN (numero), sul ciclo europeo NEDC. Le tendenze, seppur con possibili differenze, sono conservate se si considera sia l'uso su strada che la prova con ciclo WLTP. Le emissioni di particelle sono comparabili o inferiori ai motori benzina 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%.**

REF: JRC Report 2007 "Particle Measurement Programme (PMP) Light-duty Inter-laboratory Correlation Exercise (ILCE\_LD) Final Report" EUR 22775 EN

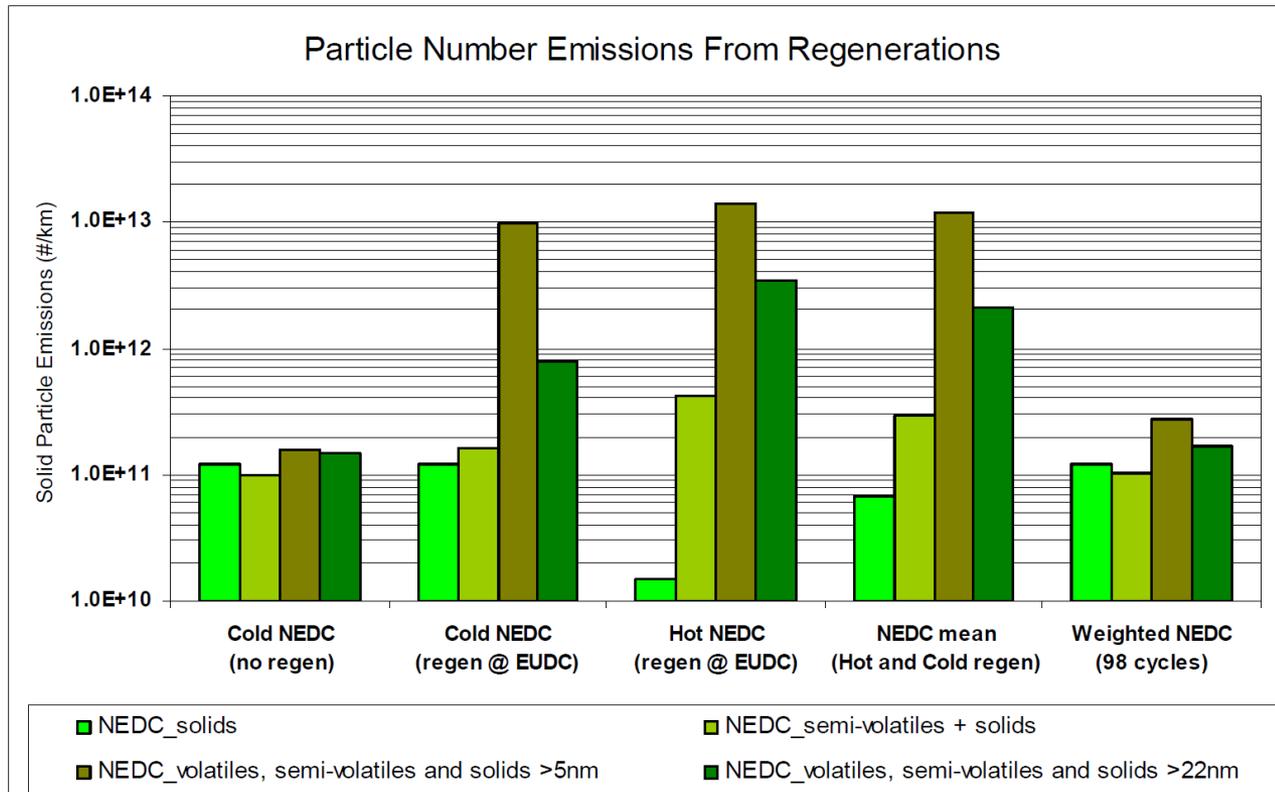
# 6.3 Livelli emissivi medi di PN e PM da veicoli Euro 4/5 dotati di FAP/DPF (veicoli light-duty): dati Sperimentali Istituto Motori CNR

<i>Descrizione tipologia veicoli</i>	<b>Quantità veicoli</b>	<b>Modelli</b>
Autovetture Diesel Euro 4 e Euro 5 dotate di diversi sistemi di trappole per l'abbattimento del particolato già in fase di omologazione (OEM)	5	Alfa Mito 1.6 Euro 5 Nissan Quashqai Euro 4 Lancia Delta Euro 5 Opel Insigna Euro 5 Renault Laguna Euro 5
Veicoli commerciali leggeri Diesel Euro 4 e Euro 5 dotati di trappole per l'abbattimento del particolato già in fase di omologazione (OEM)	2	Iveco Daily Euro 4 Fiat Ducato Euro 5
Autovetture ad accensione comandata a benzina ed iniezione diretta Euro 5 (SI-GDI)	1	Lancia Delta GDI Euro 5



La flotta di veicoli provati nel 2010 è stata composta da 8 veicoli, con le seguenti caratteristiche:  
 Due di questi veicoli (Lancia Delta GDI e Fiat Ducato) sono stati testati presso i laboratori FCA del Sangone.

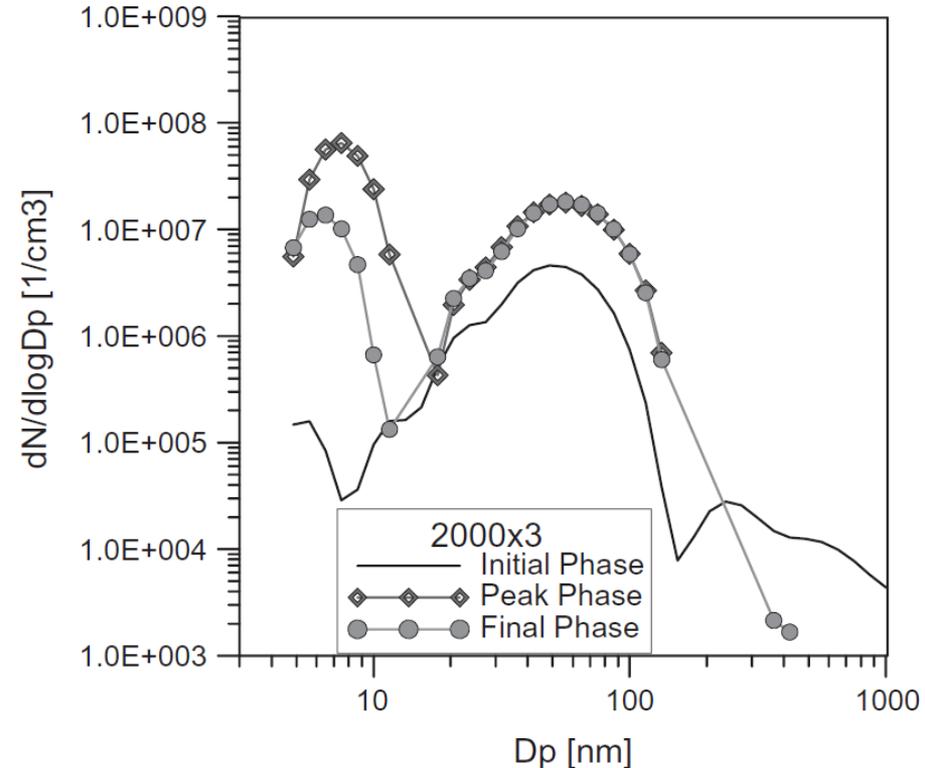
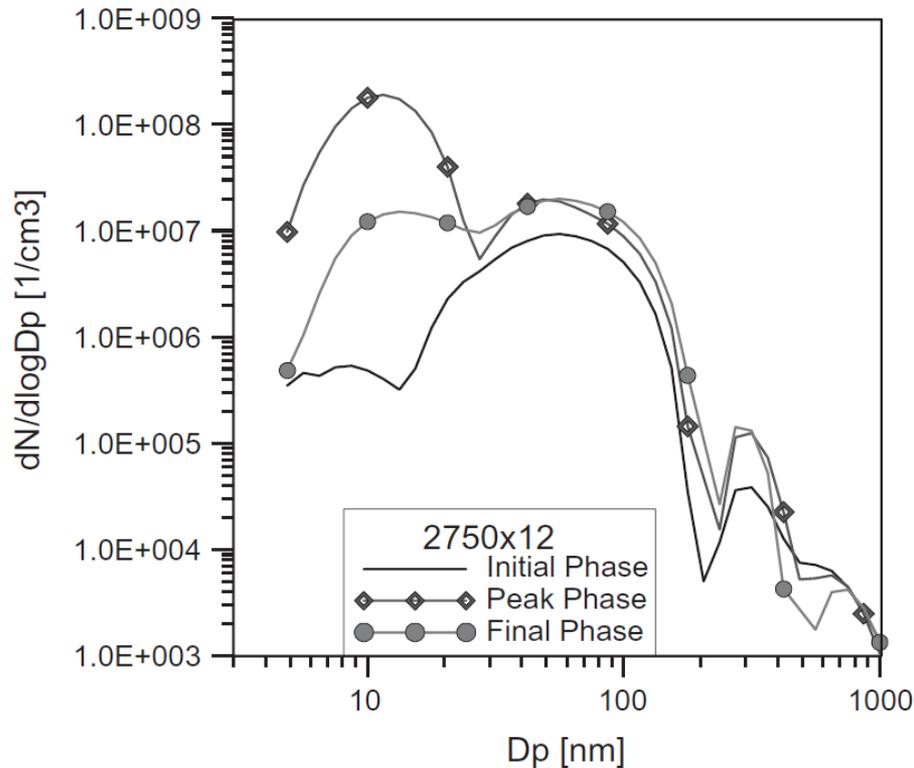
# 6.4 Influenza della rigenerazione dei FAP wall-flow «attivi» su emissioni PN in numero allo scarico del veicolo



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.

REF: JRC Report 2007 "Particle Measurement Programme (PMP) Light-duty Inter-laboratory Correlation Exercise (ILCE\_LD) Final Report" EUR 22775 EN

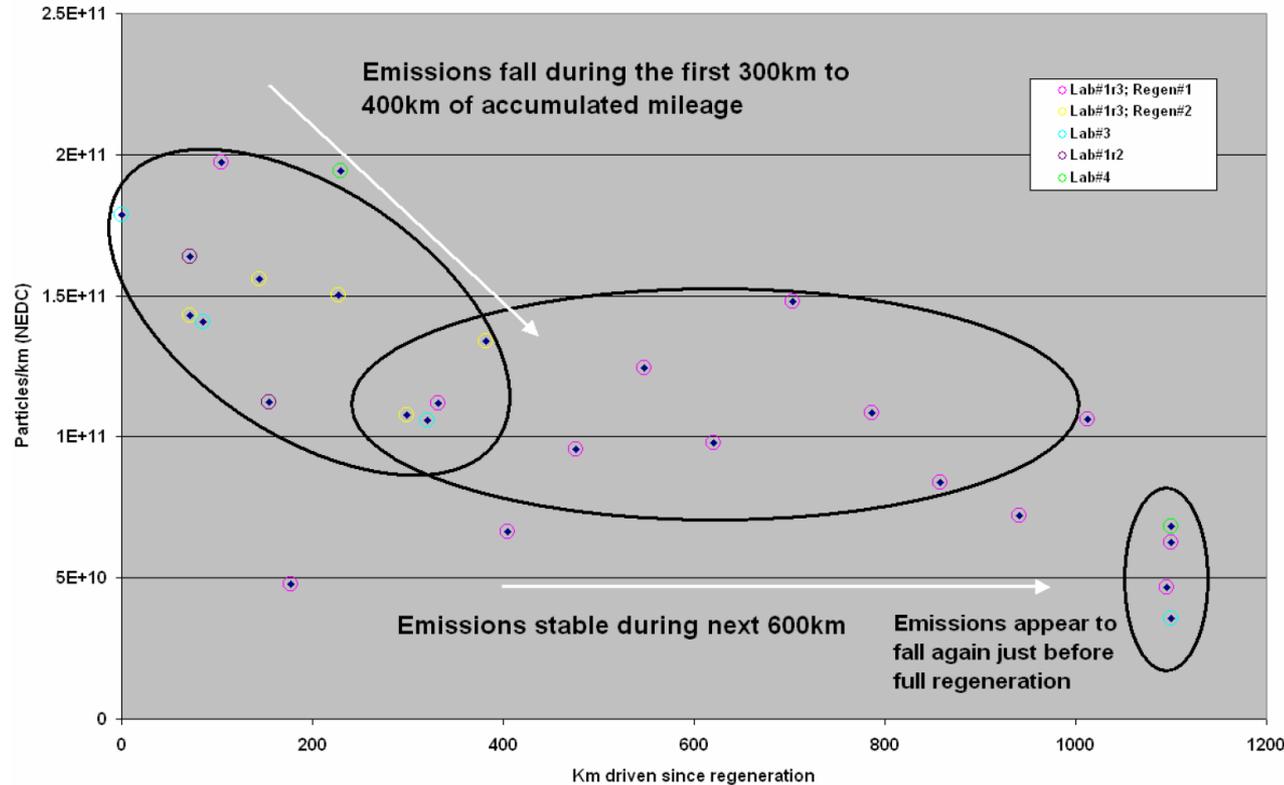
# 6.5 Influenza della rigenerazione dei FAP wall-flow «attivi» su emissioni PN allo scarico del veicolo. Dati Istituto Motori



La maggior parte degli studi, indicano che durante la rigenerazione del FAP si ha generalmente un rilascio di particelle (prevalentemente) volatili e semivolatili quando il filtro raggiunge la massima temperatura (600-650°C in caso di rigenerazione «attiva»).

REF: C. Beatrice et al., "Detailed characterization of particulate emissions of an automotive CDPF using actual regeneration strategies. Experimental Thermal and Fluid Science 39 (2012) 45-53

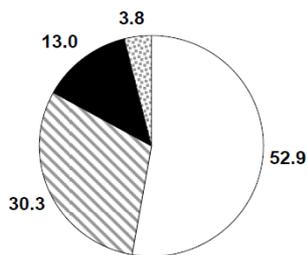
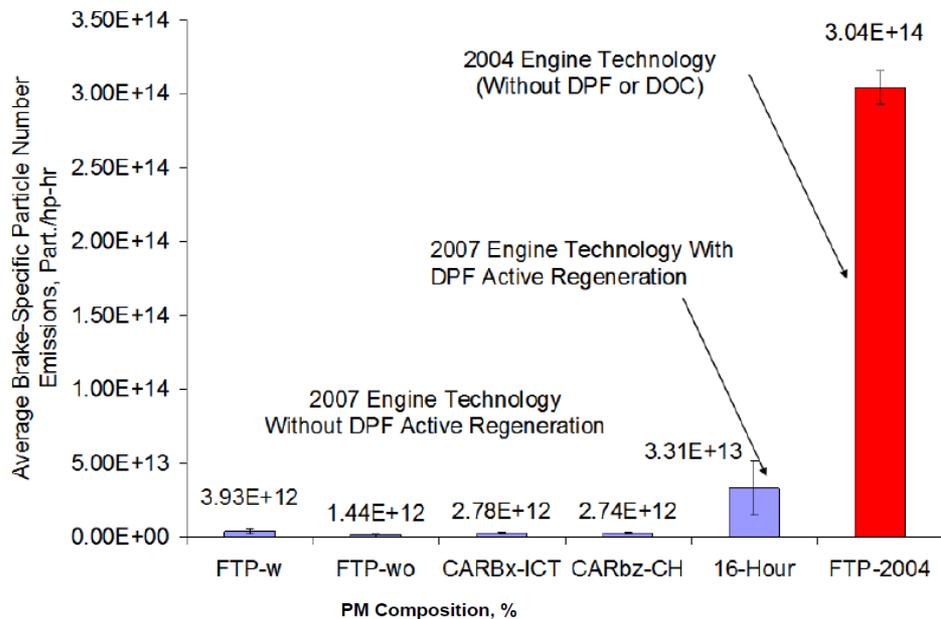
# 6.6 Efficienza del FAP wall-flow «attivo» su emissioni di PN dopo rigenerazione



L'efficienza del FAP è lievemente ridotta immediatamente dopo la rigenerazione raggiungendo efficienze nel range del 90-98% e garantendo comunque il rispetto dei limiti normativi di approvazione degli autoveicoli.

REF: JRC Report 2007 "Particle Measurement Programme (PMP) Light-duty Inter-laboratory Correlation Exercise (ILCE\_LD) Final Report" EUR 22775 EN

# 6.7 Efficienza del FAP wall-flow «attivo» su motori HD 2007 su PN e PAH (componenti tossici).



Compounds	% Reduction Relative to 2004 Technology Engine
Single Ring Aromatics	82
PAH	79
NitroPAH	81
Alkanes	85
Polar	81
Hopanes/Steranes	99
Carbonyls	98
Inorganic Ions	38
Metals and Elements	98
Organic Carbon	96
Elemental Carbon	99
Dioxins/Furans <sup>a</sup>	99

<sup>a</sup> Relative to 1998 technology engine

Analisi di efficienza di FAP in USA hanno mostrato analoghi risultati in termini di emissione di PN, durante e fuori la fase di rigenerazione. L'utilizzo del FAP consente inoltre un drastica riduzione dei PAH (componenti tossici) sia in fase gassosa che adsorbiti sul PM.

Legend for PM Composition, %:  
 □ Sulfate   □ Organic Carbon   ■ Elemental Carbon   □ Metals & Elements

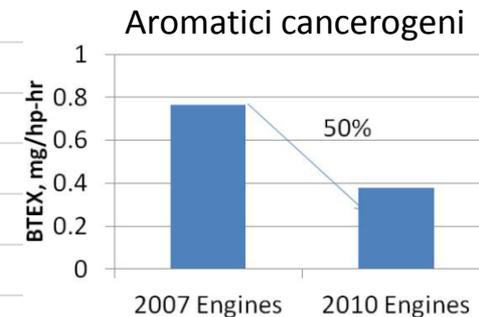
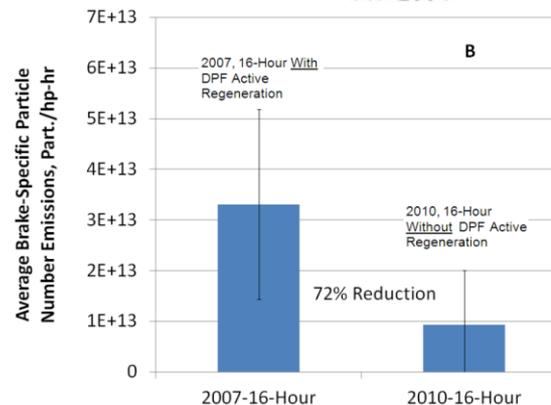
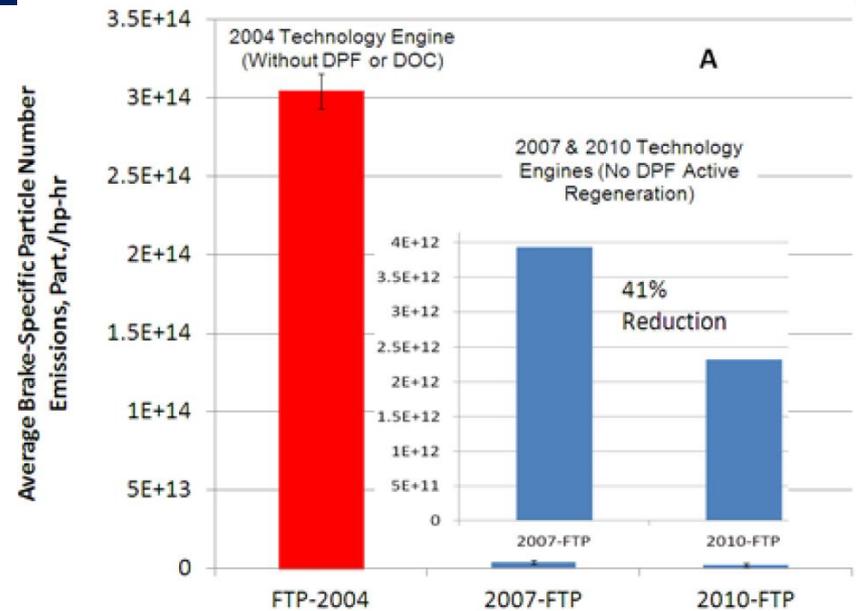
REF: CRC Report 2009 "Detailed chemical characterization of exhaust species emitted from four 2007 model-year HD diesel engines (HHDDE)".  
<http://www.crcao.org/reports/recentstudies2009/ACES%20Phase%201/ACES%20Phase1%20Final%20Report%2015JUN2009.pdf>

# 6.8 Efficienza del FAP/DPF wall-flow «attivo» su motori HD 2007 e 2010

	2010 % reduction relative to 2007 engines	2010 % reduction relative to 2004 engine
Single Ring Aromatics	50	91
PAH	97	99
NitroPAH	99	100
Alkanes	93	99
Polar	96	99
Hopanes & Steranes	89	100
Carbonyls	80	100
Inorganic Ions	87	92
Metals and Elements	81	100
Organic Carbon	36	97
Elemental Carbon	53	100
Dioxins and Furans <sup>a</sup>	88	100

<sup>a</sup>Relative to 1998 Technology Engine

Uno studio condotto dal SouthWest Research Institute (Texas, USA) su motori HD nel 2007 e nel 2010 mostra come l'evoluzione ulteriore del FAP tra il 2007 ed il 2010, eliminando la necessità della rigenerazione per alcuni tipi di FAP, ha prodotto un'ulteriore riduzione (circa il 72%) del PN emesso su ciclo US-FTP. Ciò ha portato l'efficienza di cattura delle particelle prossima al 100% nel range 6-560 nm (EEPS).



REF: CRC Report 2013 "Detailed chemical characterization of exhaust species emitted from four 2007 model-year HD diesel engines (HHDDE)".  
<http://www.crcao.org/reports/recentstudies2009/ACES%20Phase%201/ACES%20Phase1%20Final%20Report%2015JUN2009.pdf>

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

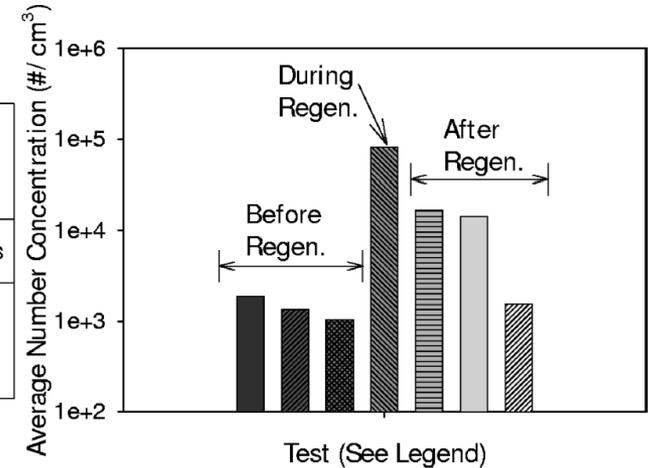
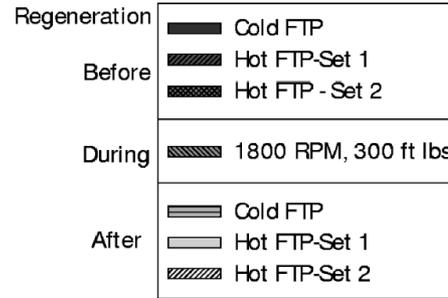
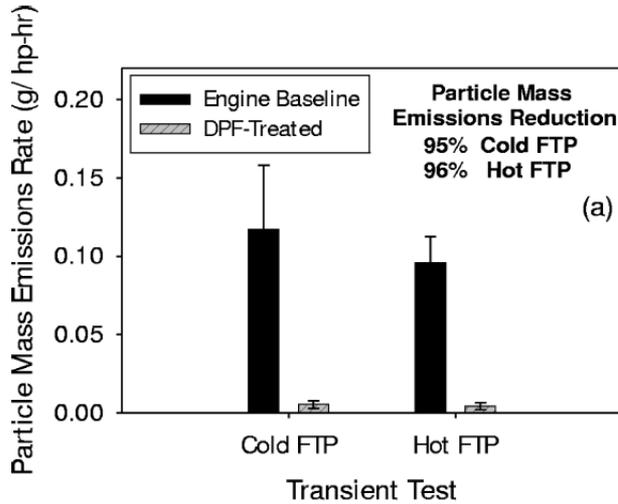
Dalla letteratura scientifica si evince che :

- 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.

## 6.10 Effetto del FAP «passivo» su emissioni di PM e PN allo scarico del veicolo

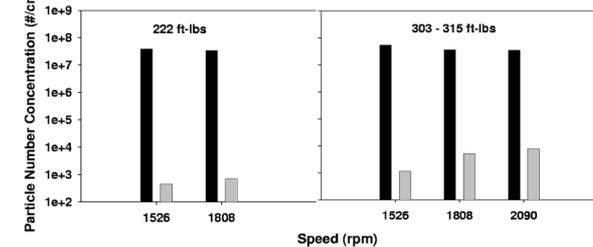
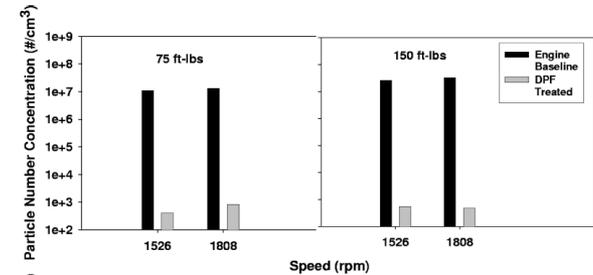
- La casistica degli esperimenti analizzati in letteratura indica un'efficienza del FAP wall-flow passivo (CRT-DPF) mediamente superiore al 90%, sia in termini di PM che PN.
- Per la rigenerazione continua i FAP passivi richiedono una temperatura  $>300^{\circ}\text{C}$ , per tale motivo sono generalmente usati in veicoli commerciali in uso a carichi medio alti e in applicazioni off-road.
- Diversi articoli hanno riscontrato un aumento di particelle nanometriche quando il filtro raggiunge temperature elevate  $>350^{\circ}\text{C}$ . Per i FAP passivi, la maggioranza dei ricercatori correla l'emissione di nanoparticelle all'ossidazione di solfati nel catalizzatore con produzione di  $\text{SO}_4$ . In vari casi si è osservata una riduzione delle particelle con diametro  $<23\text{nm}$  riducendo il contenuto di zolfo nel combustibile.
- Per i FAP flow-through passivi, i lavori raccolti indicano un'efficienza di filtrazione mediamente più bassa dei wall-flow, e abbastanza variabile, tra il 30 ed il 90%, con un valore medio dell'ordine del 50%. La variabilità deriva dalla tipologia di filtro adottato: matrice filtrante, presenza catalizzatore, tipo di motore e qualità del combustibile (soprattutto dal contenuto di zolfo che può inficiare l'efficienza di conversione dell'NO ad  $\text{NO}_2$  per l'ossidazione del PM). La stessa variabilità si riscontra nella misura del PN allo scarico.

# 6.11 Effetto del FAP wall-flow «passivo» (CRT-con catalizzatore) su emissioni di PM e PN allo scarico del veicolo



I FAP wall-flow passivi hanno anch'essi un'efficienza molto elevata (>90% e mediamente del 97-99%) sia in termini di PM che PN. La loro utilizzazione come retrofit consente di far rientrare i motori nelle normative di riferimento più stringenti.

Anch'essi durante ed immediatamente dopo la rigenerazione mostrano tendenzialmente un aumento del PN allo scarico.

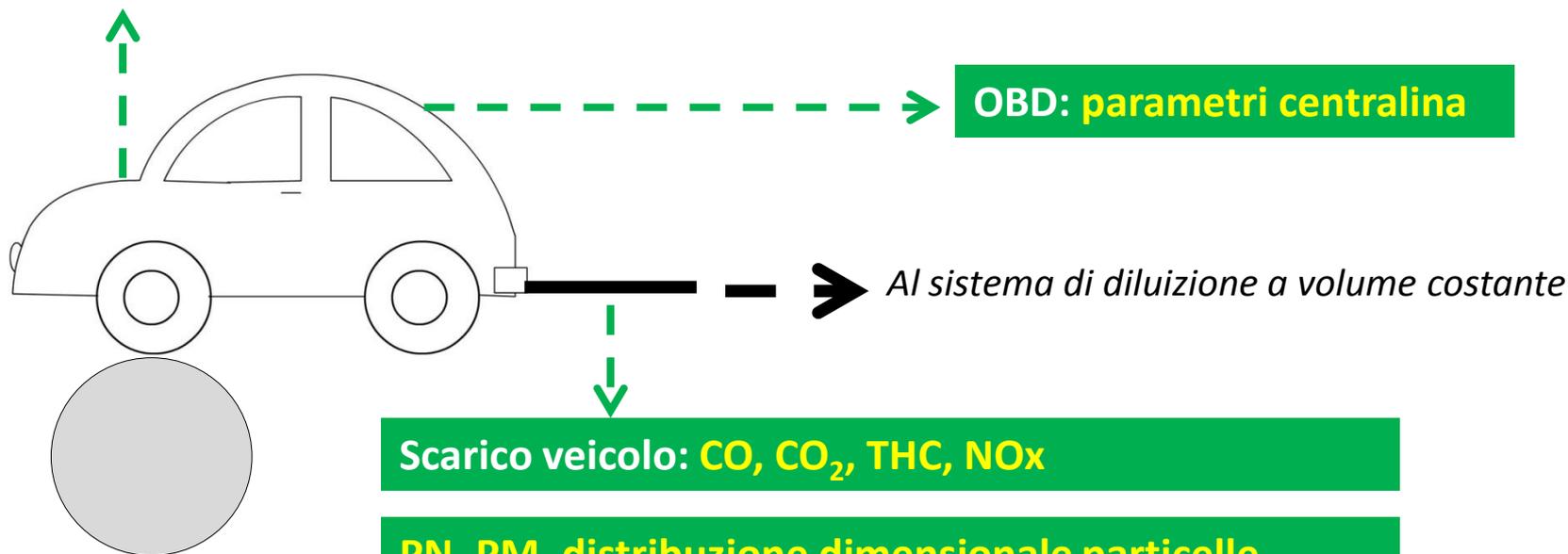


REF: Barone , et al. (2010) An Analysis of Field-Aged Diesel Particulate Filter Performance: Particle Emissions before, during, and after Regeneration, Journal of the Air & Waste Management Association, 60:8, 968-976, DOI:10.3155/1047-3289.60.8.968

# 7 METODOLOGIA DELLE ANALISI SPERIMENTALI

Laboratorio Emissioni – Istituto Motori CNR

Scarico motore: **CO, CO<sub>2</sub>, THC, NO<sub>x</sub>**



OBD: **parametri centralina**

Al sistema di diluizione a volume costante

Scarico veicolo: **CO, CO<sub>2</sub>, THC, NO<sub>x</sub>**

**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  $\mu\text{m}$

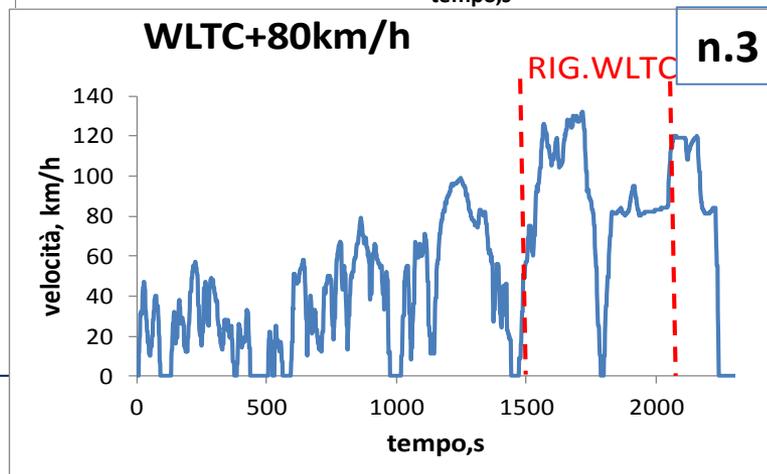
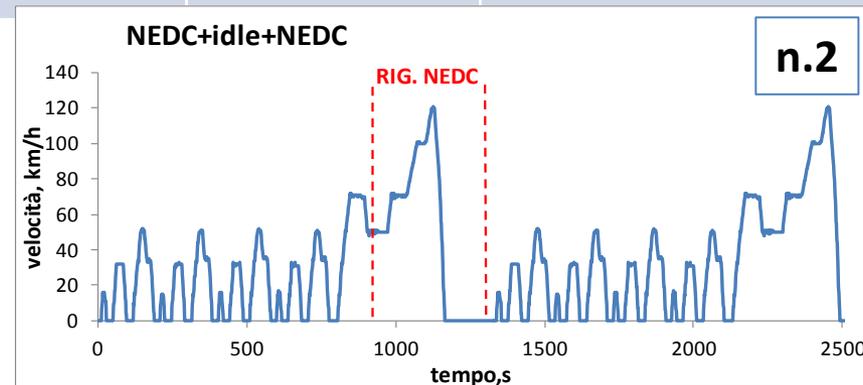
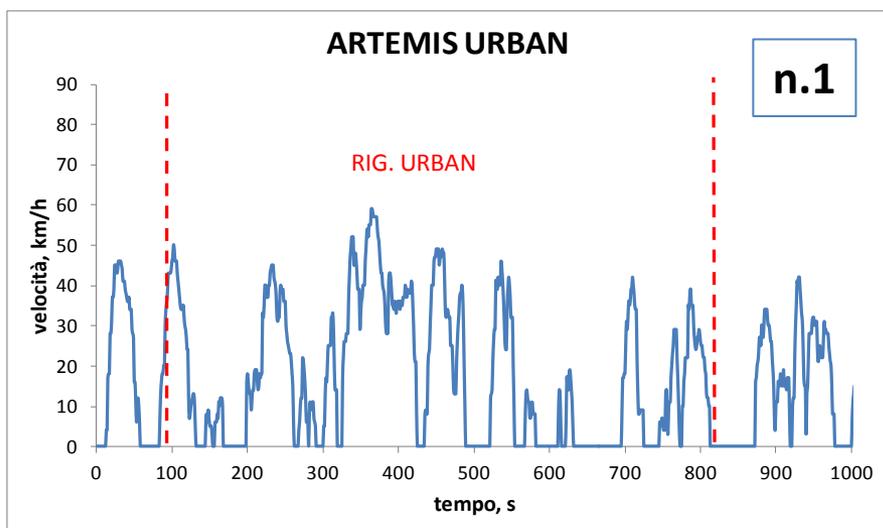
PMP comunemente utilizzato nei laboratori di  
ricerca per studi di base

# 7.1 Case-studies prodotti da IM su contratto in corso e su attività pregresse

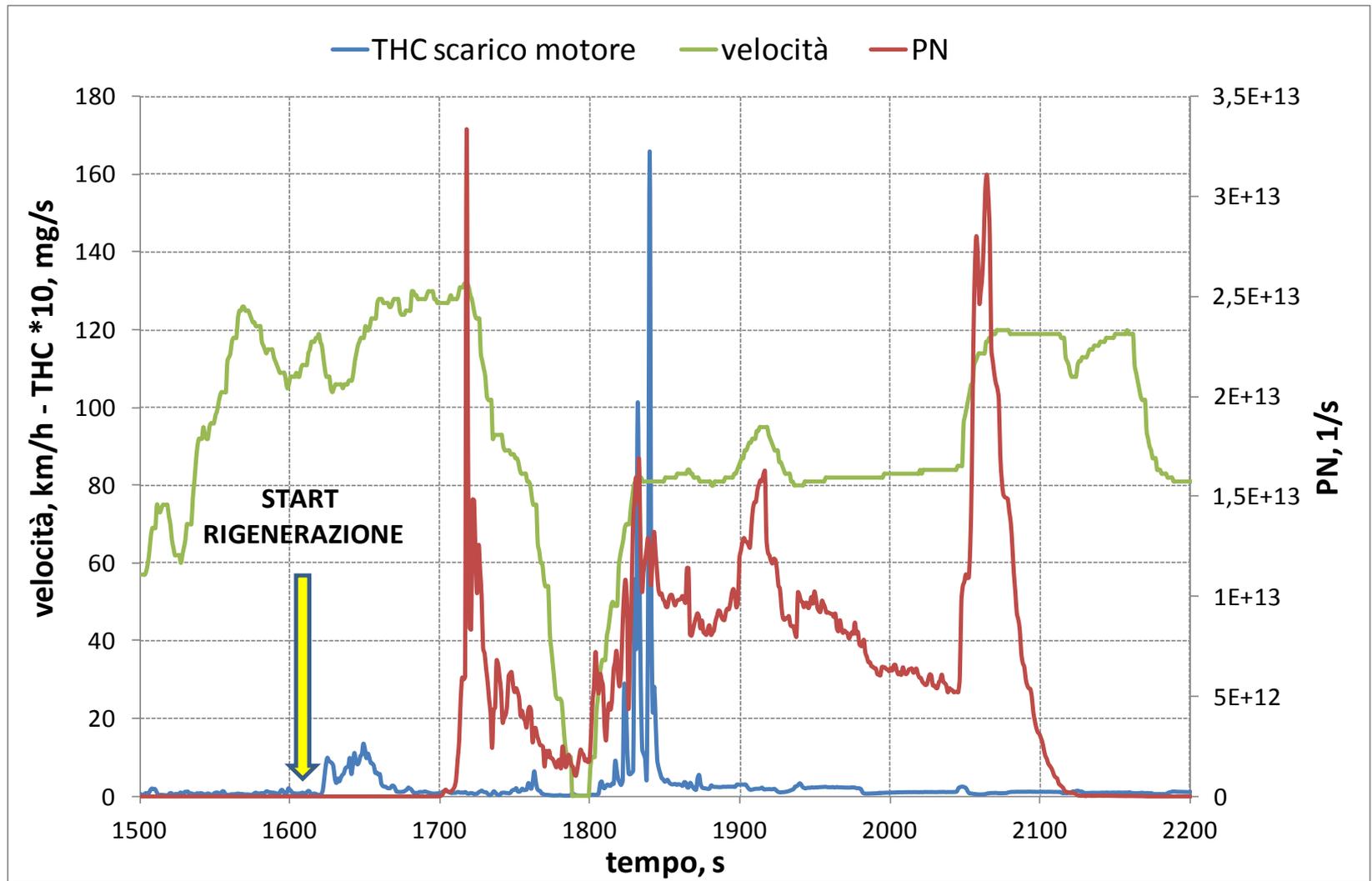
			Sistema controllo emissioni
Light-duty (veicoli commerciali)	Citroen Jumper 2.2	Euro5b	EGR, Pre-cat-+DPF (rigenerazione attiva tramite post-iniezioni in camera di combustione)
Passenger cars (autovetture)	Nissan Quashquai 1.5	Euro 4	EGR, Pre-cat-+DPF (rigenerazione attiva tramite post-iniezioni allo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

# 7.2 Eventi rigenerativi -Citroen Jumper 2.2 EURO5b

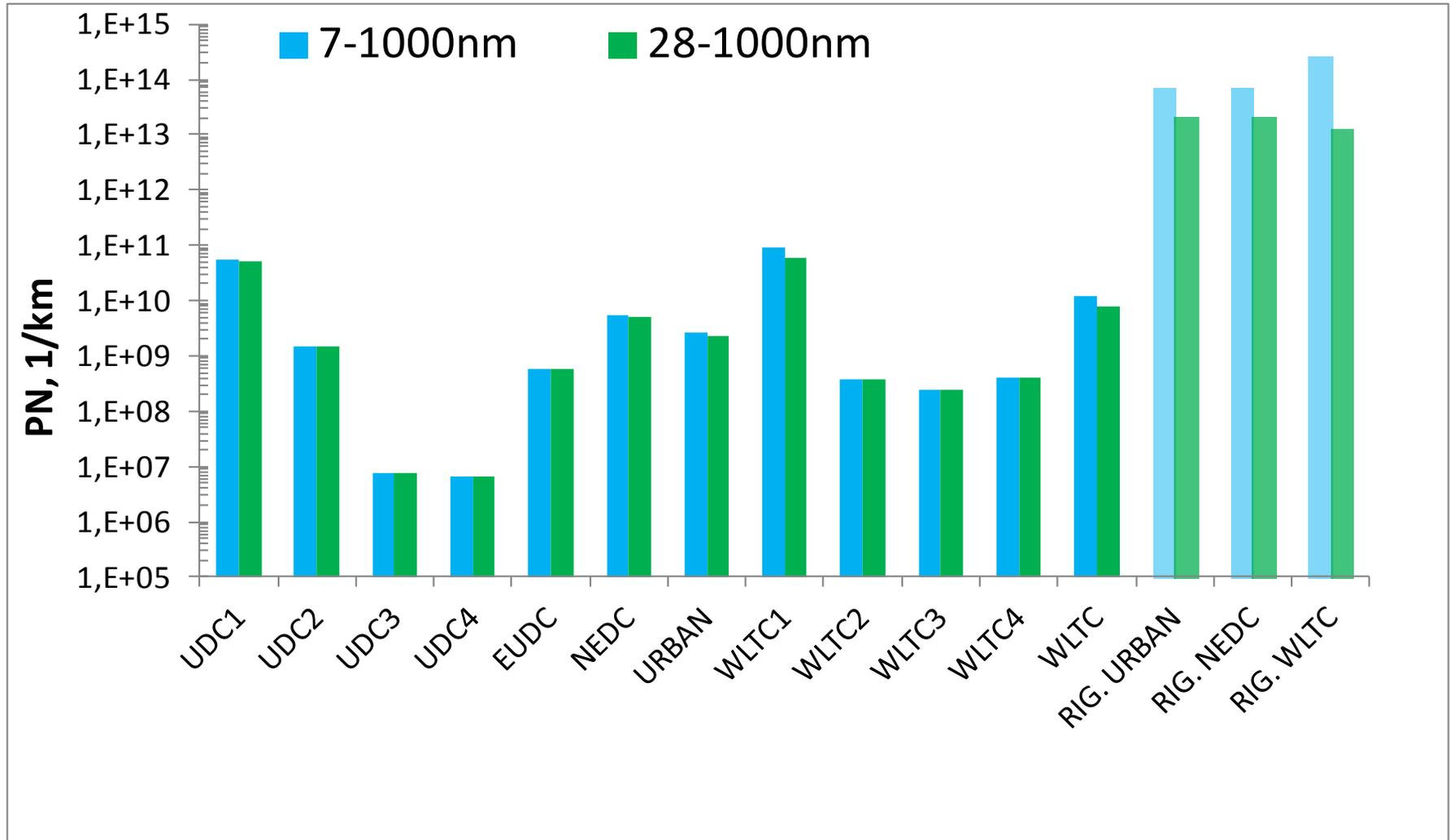
N°	data	Ciclo di guida	Distanza, km	Durata, s	Velocità media, km/h
1	11/12/2015	ARTEMIS URBAN	3.4	700	17.2
2	05/02/2016	NEDC	3.6	850	15.0
3	08/01/2016	WLTC+80km/h	12.9	510	90.8



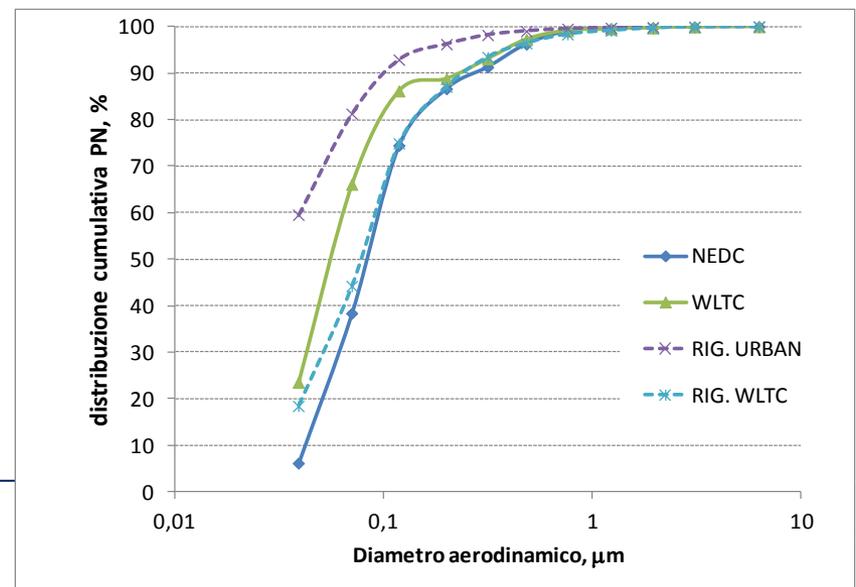
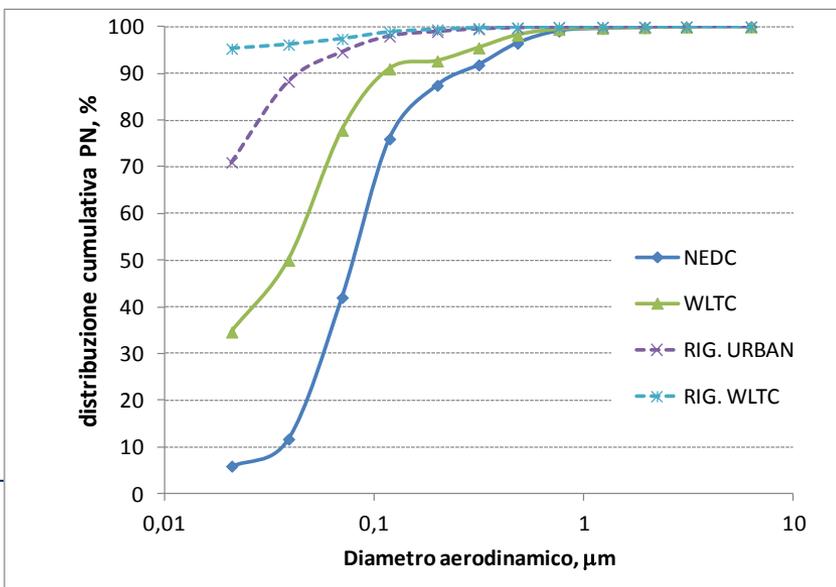
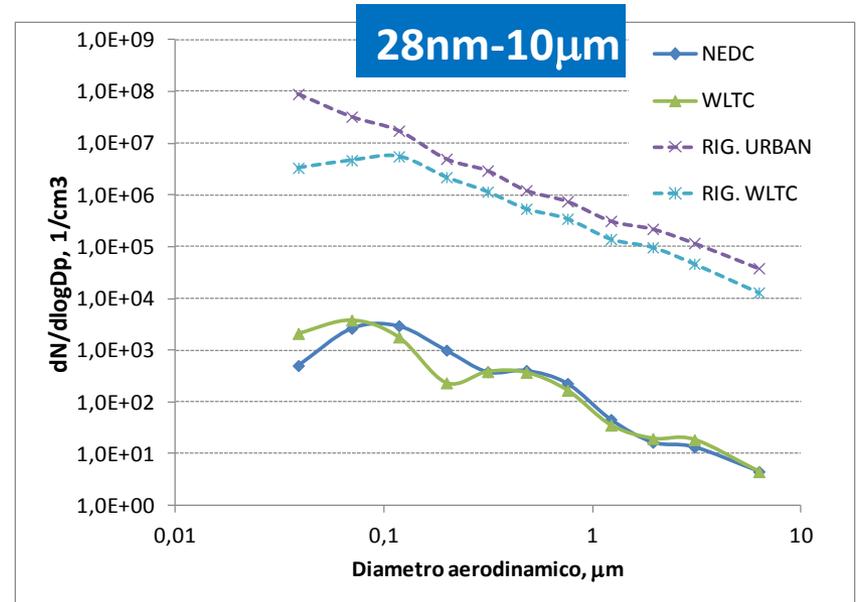
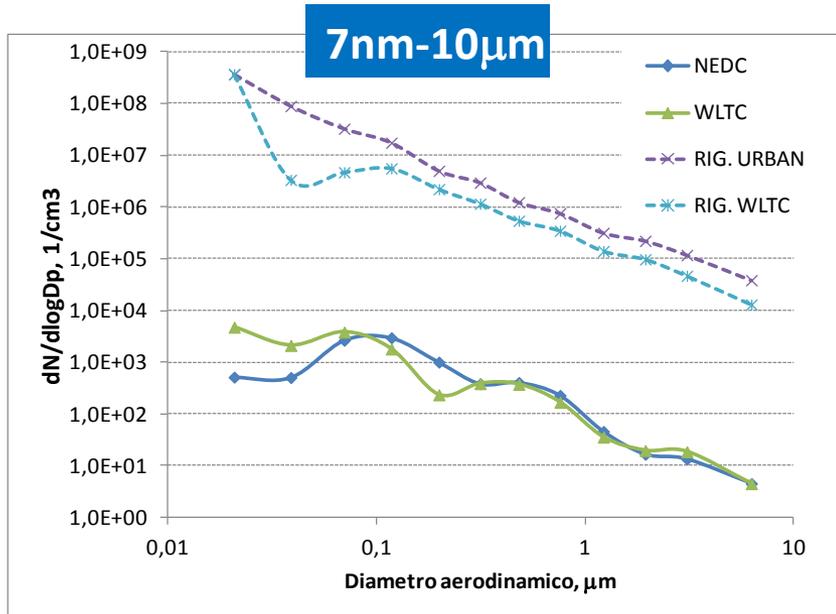
# 7.3 Andamento parametri caratteristici durante la rigenerazione. Veicolo Citroen Jumper Eu5b



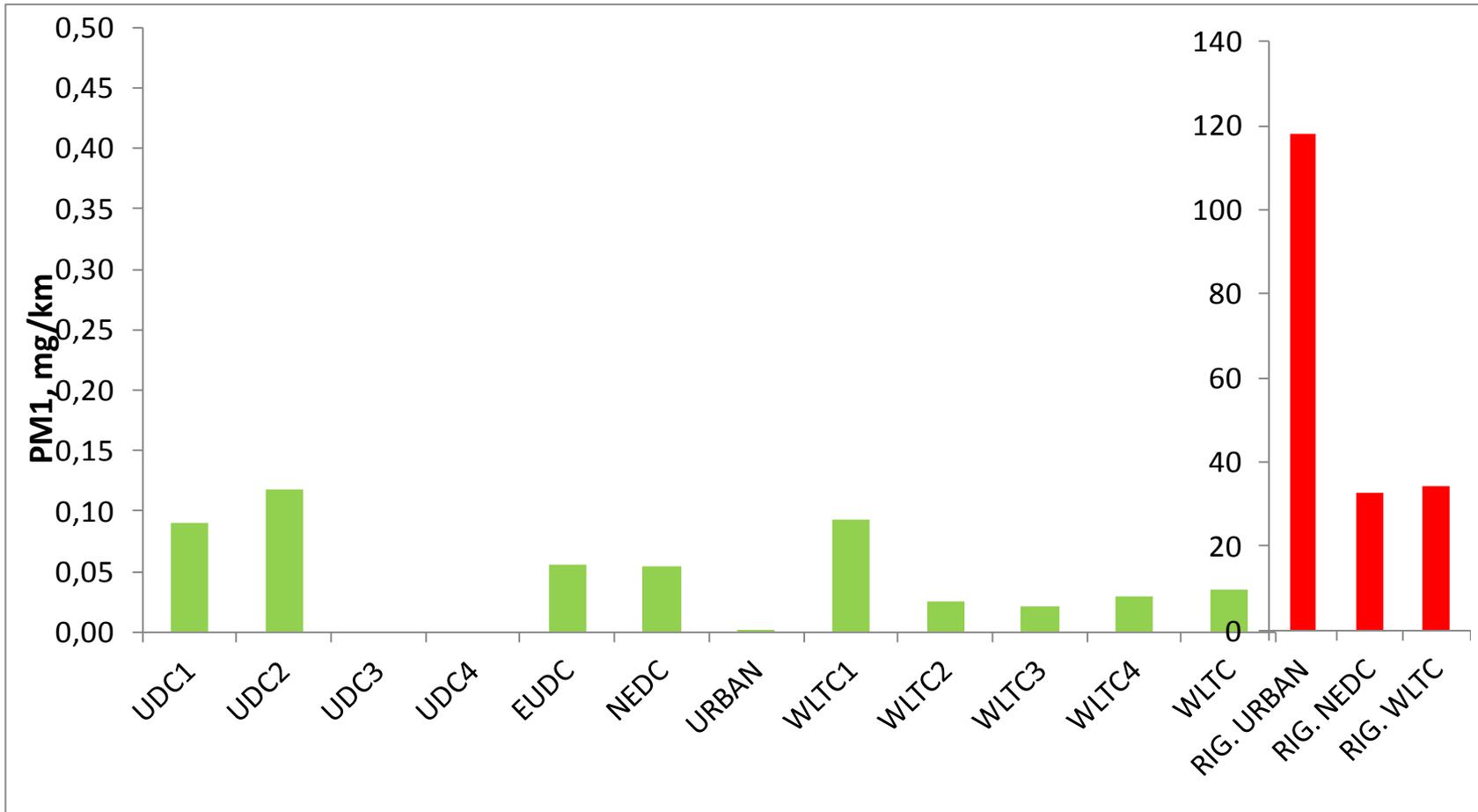
# 8. Risultati. Emissione PN per tipo di ciclo, frazione di ciclo e range dimensionale delle particelle. Veicolo Citroen Jumper Eu5b



# 8.1 Distribuzione dimensionale per tipo di ciclo, frazione di ciclo e range dimensionale delle particelle. Veicolo Citroen Jumper



## 8.2 Emissione PM1 (stimato da ELPI) per tipo di ciclo e frazione di ciclo. Veicolo Citroen Jumper

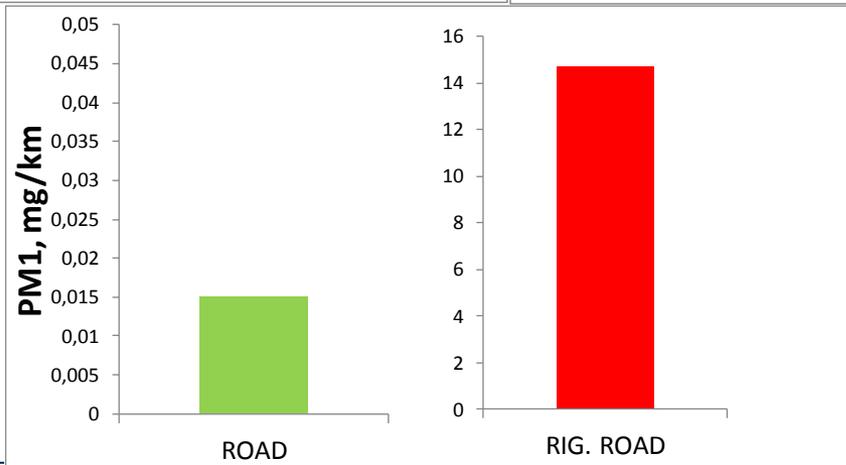
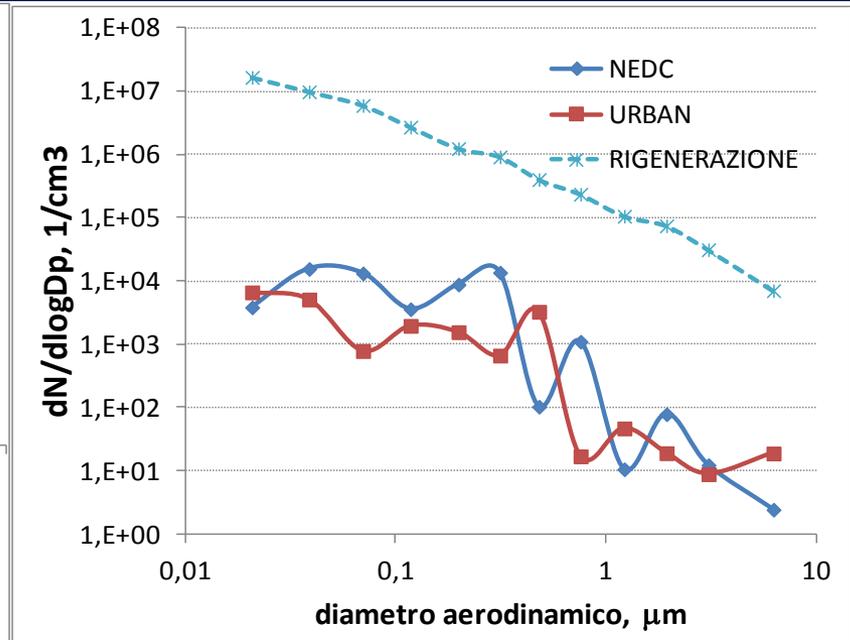
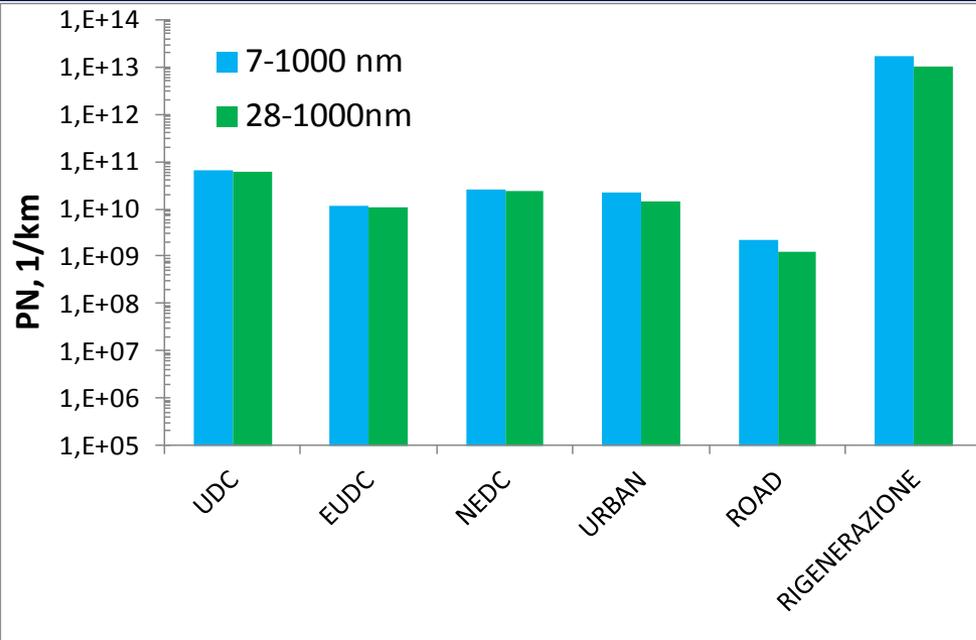


\* PM1 stimato dal numero di particelle misurate dall'ELPI

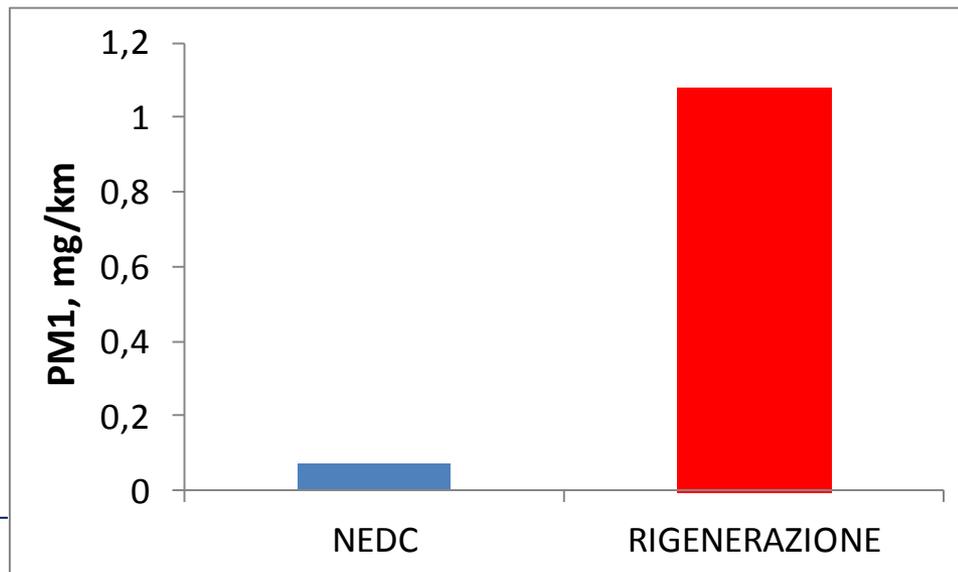
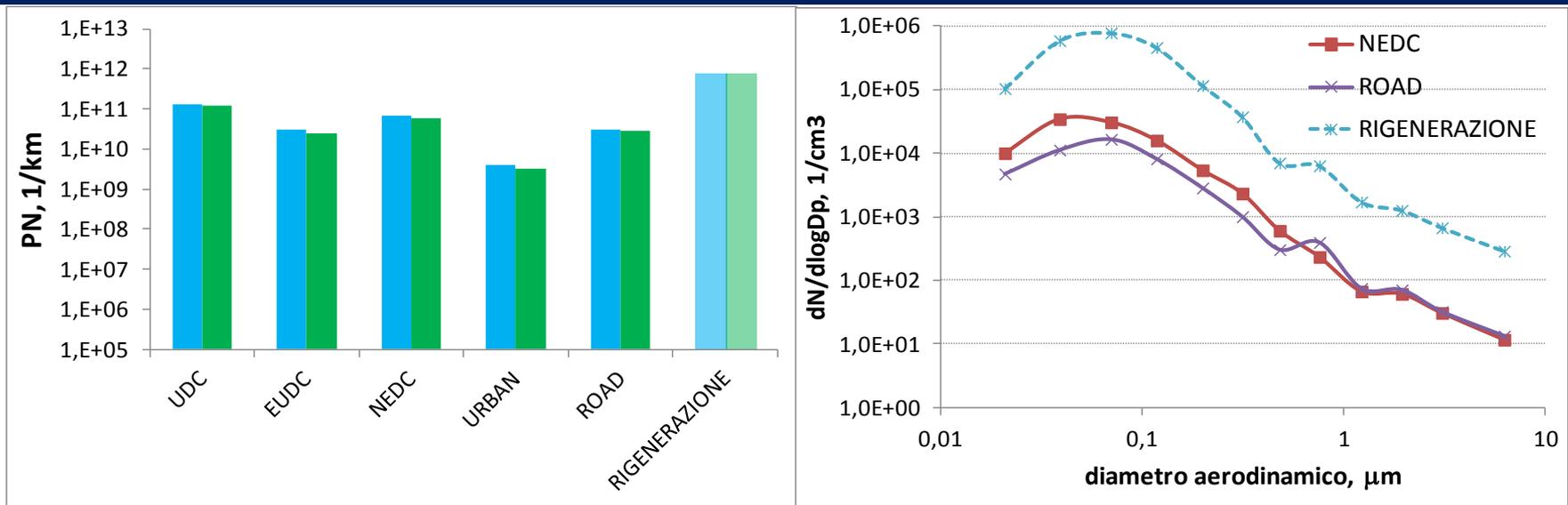
## 8.3 Eventi rigenerativi analizzati su autovetture (2010).

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

# 8.4 PN e PM1 – distribuzione dimensionale particelle Nissan Quashquai 1.5.



# 8.5 PN e PM1 – distribuzione dimensionale particelle Alfa Romeo MITO.



# 8.6 Stima emissioni medie di PM e PN includendo l'evento rigenerativo. Distanza tra due rigenerazioni consecutive (ACCUMULO): 500km

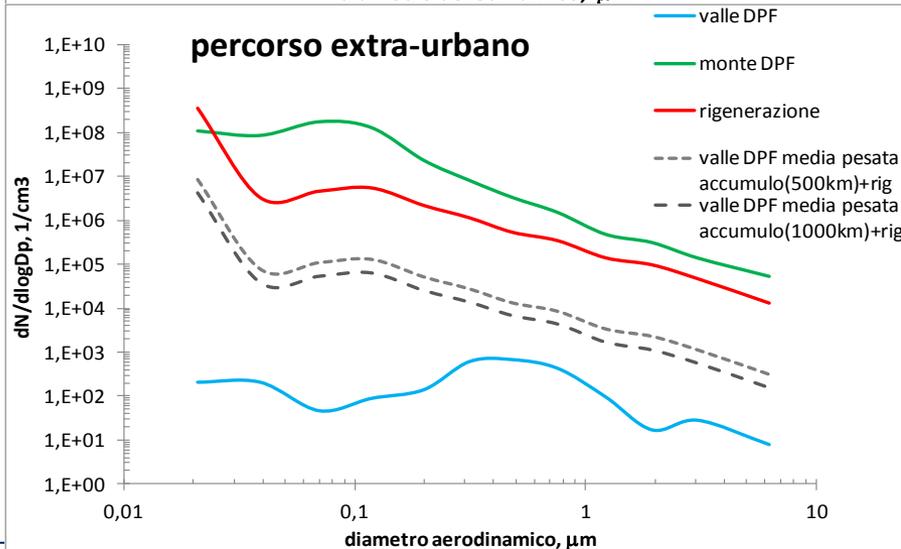
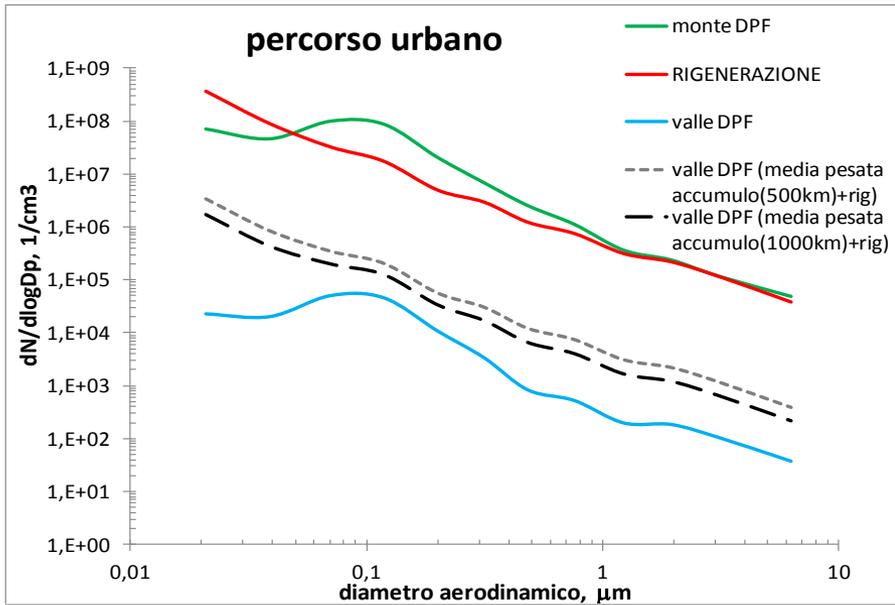
## 7nm-10µm

			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

# 8.6 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

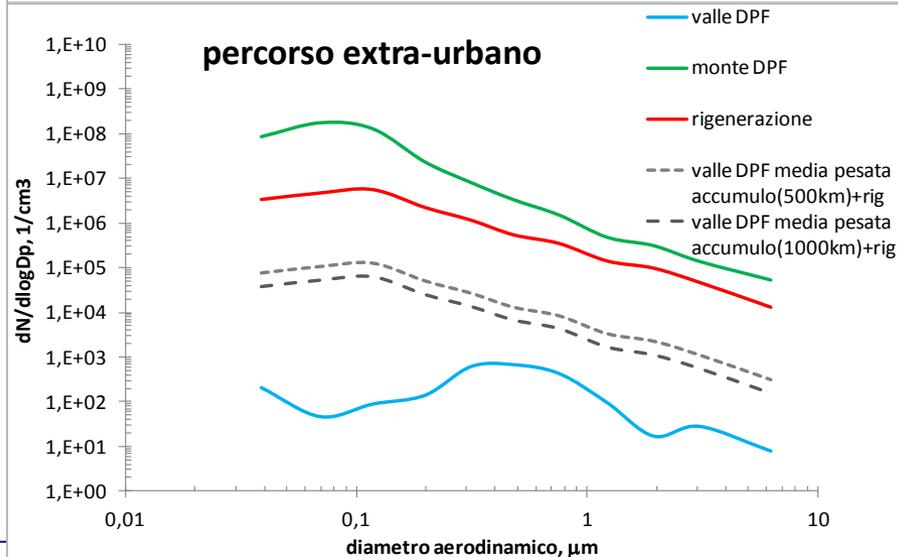
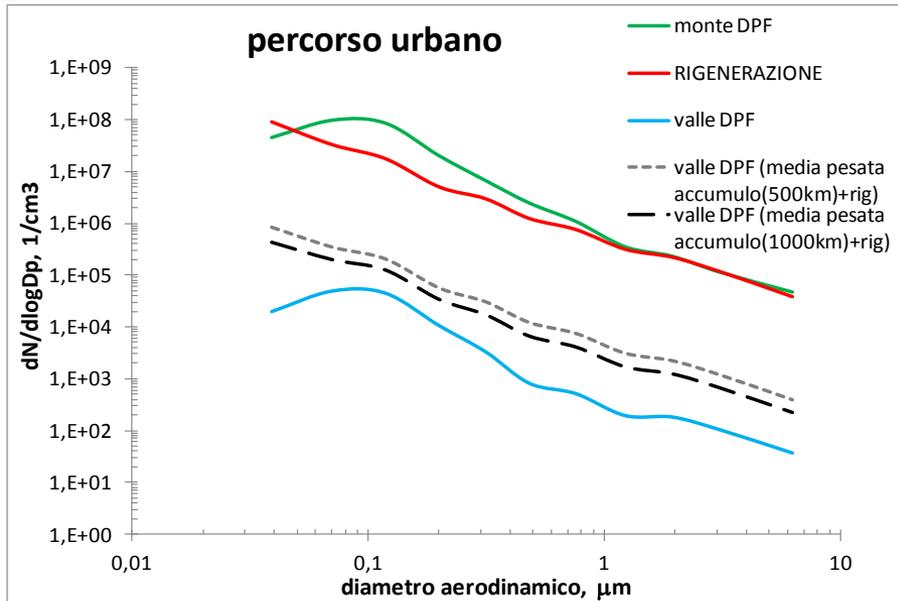
## Durata fase di accumulo

- 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)*

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



**Range dimensionale: 28nm-10μm**

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

### Percorso

- urbano
- extra-urbano

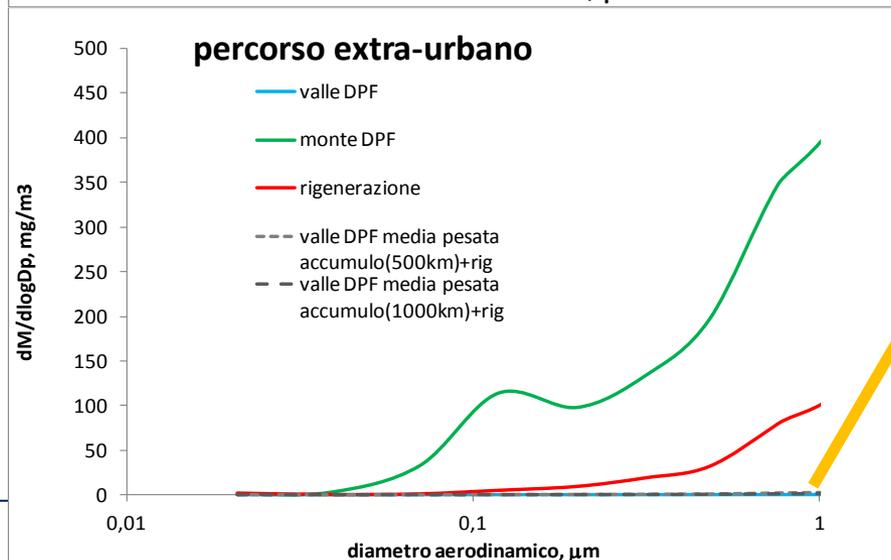
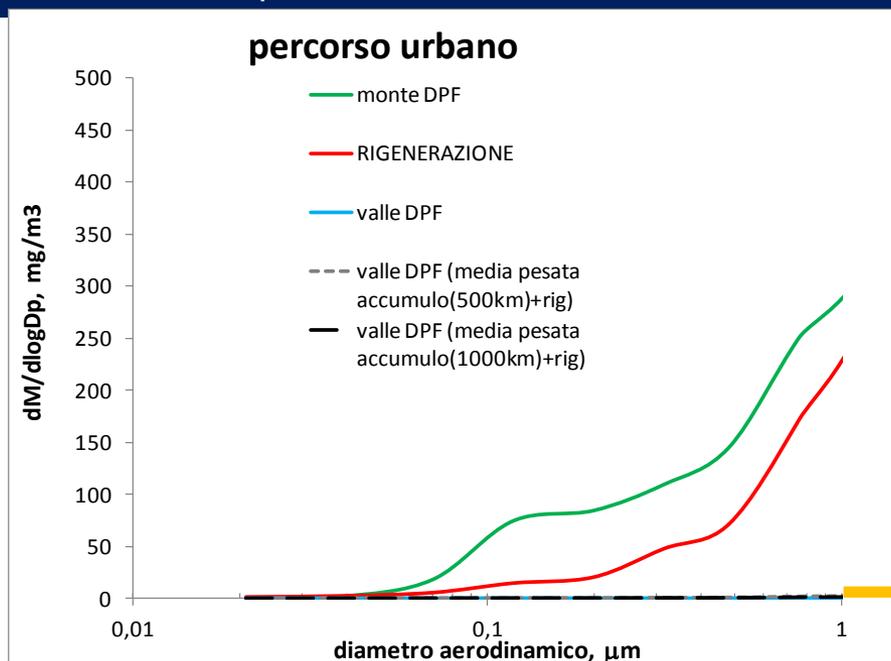
### Durata fase di accumulo

- 500 km
- 1000 km

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

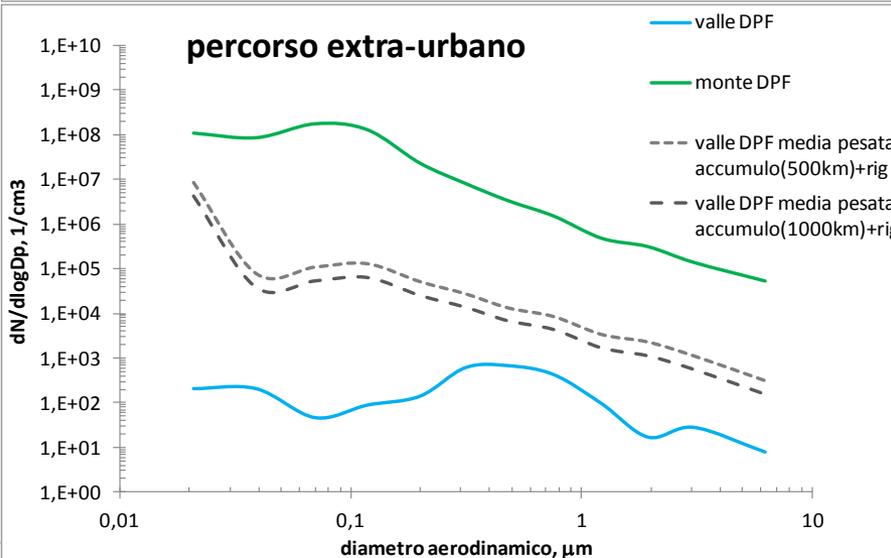
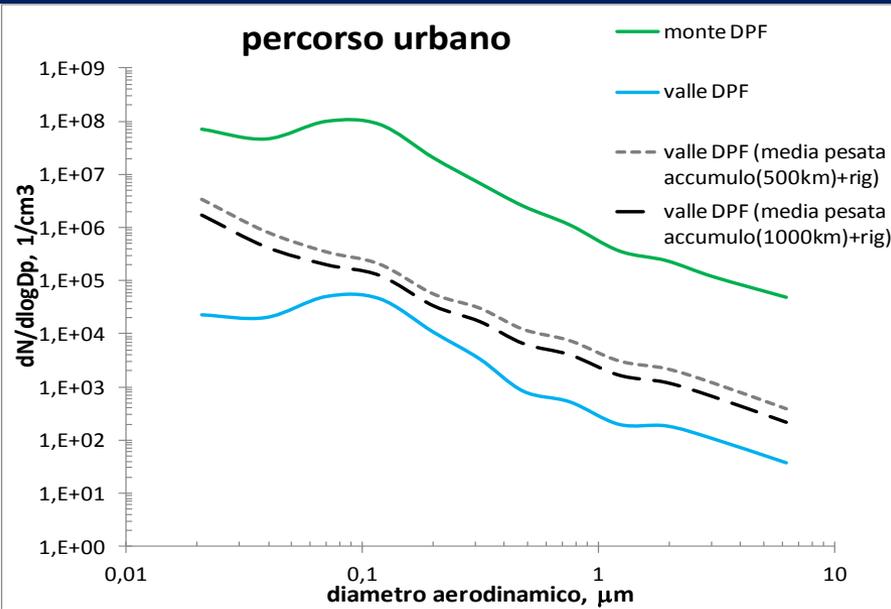
*Evento rigenerativo ogni 212 cicli urbani o 43 cicli extra-urbani di accumulo (1000km)*

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



**Distribuzione  
minore di  
2.5 mg/m<sup>3</sup>**

# 8.6 Distribuzioni dimensionali medie di PN includendo l'evento rigenerativo (non rappresentato nel grafico). Citroen Jumper 2.2 Euro 5b



**Range dimensionale: 7nm-10μm**

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

## Percorso

- urbano
- extra-urbano

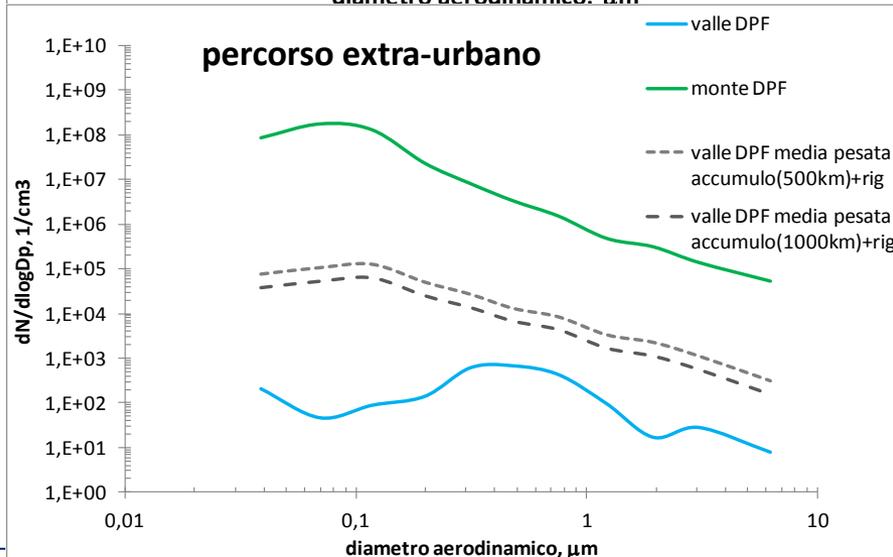
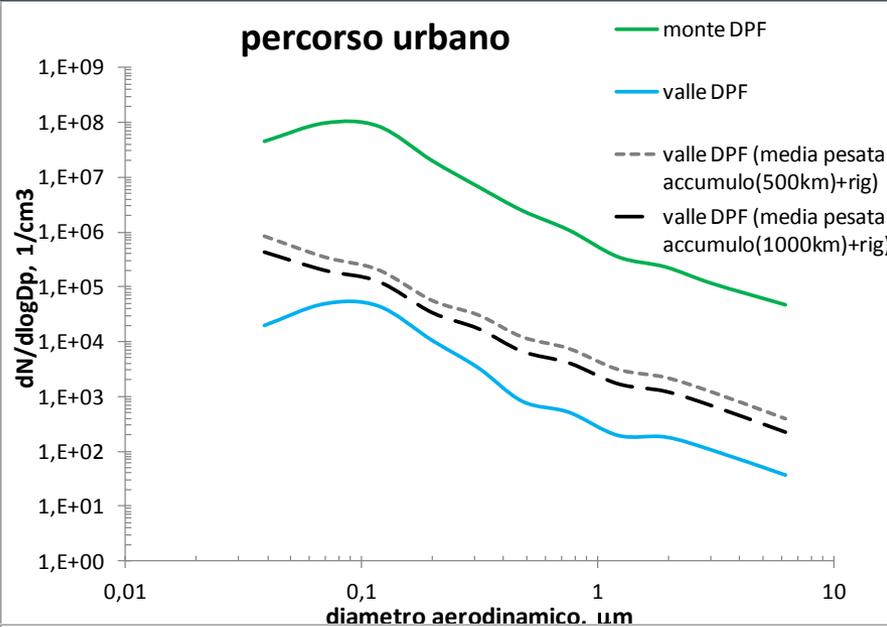
## Durata fase di accumulo

- 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)*

# 8.6 Distribuzioni dimensionali medie di PN includendo l'evento rigenerativo (non rappresentato nel grafico). Citroen Jumper 2.2 Euro 5b



**Range dimensionale: 28nm-10 $\mu\text{m}$**

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

## Percorso

- urbano
- extra-urbano

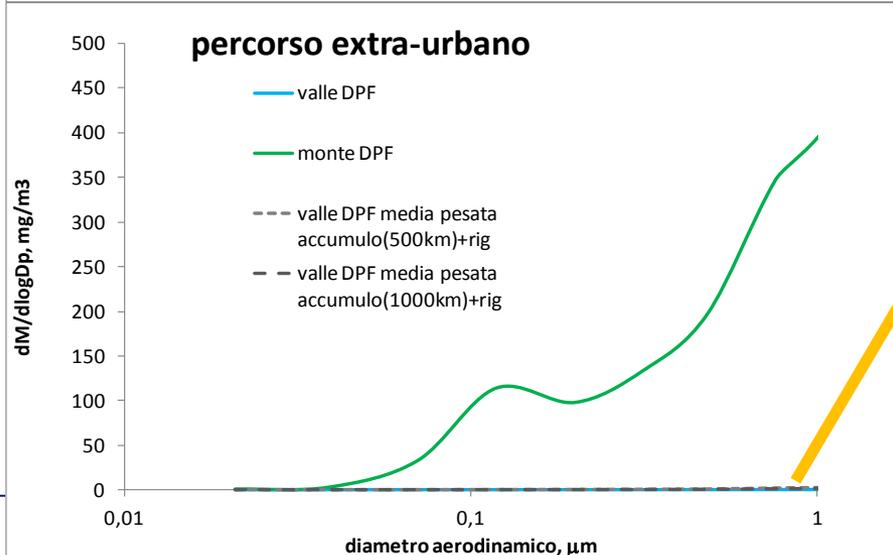
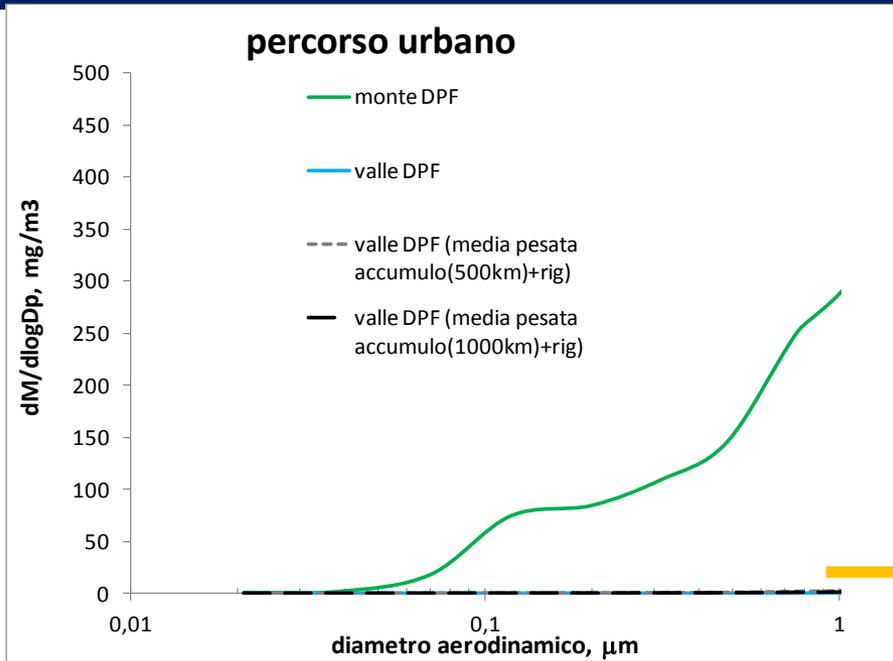
## Durata fase di accumulo

- 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)*

# 8.6 Distribuzioni dimensionali medie di PM includendo l'evento rigenerativo (non rappresentato nel grafico). Citroen Jumper 2.2 Euro 5b



**Distribuzione  
minore di  
2.5 mg/m<sup>3</sup>**

# 8.6 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 semi-log)

Percorso

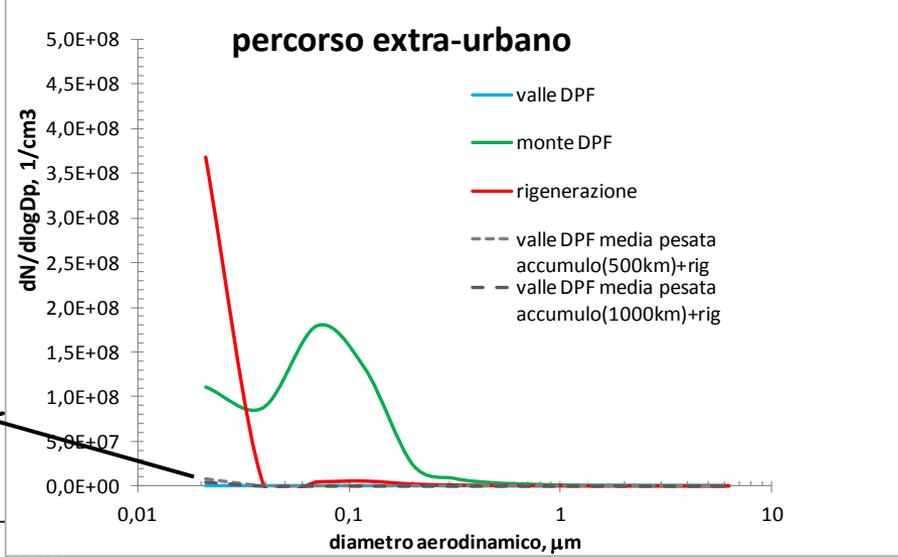
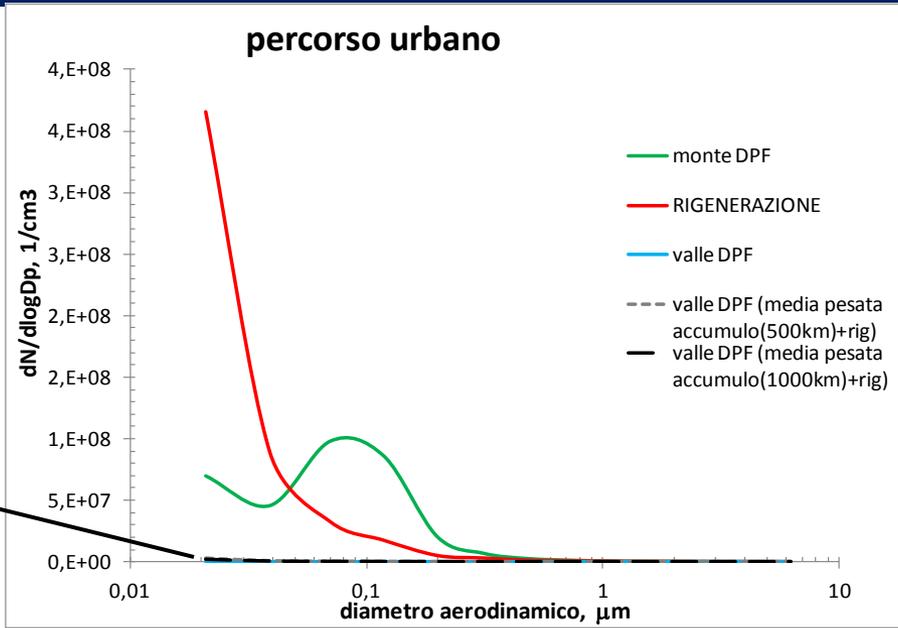
- urbano
- extra-urbano

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 minori di  $4 \times 10^6$   $1/cm^3$

Distribuzioni minori di  $1 \times 10^7$   $1/cm^3$

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

Range dimensionale: 28nm-10 $\mu$ m

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

Percorso

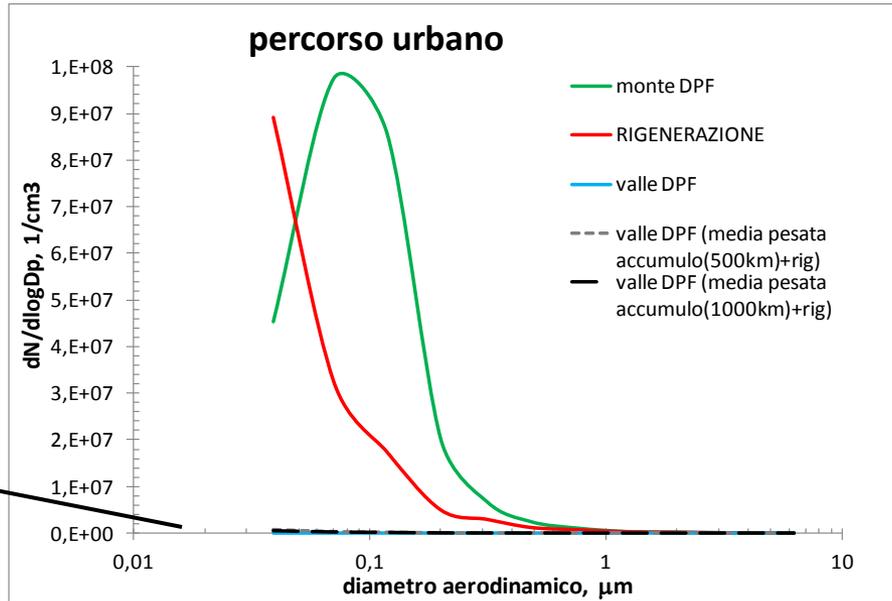
- urbano
- extra-urbano

Durata fase di accumulo

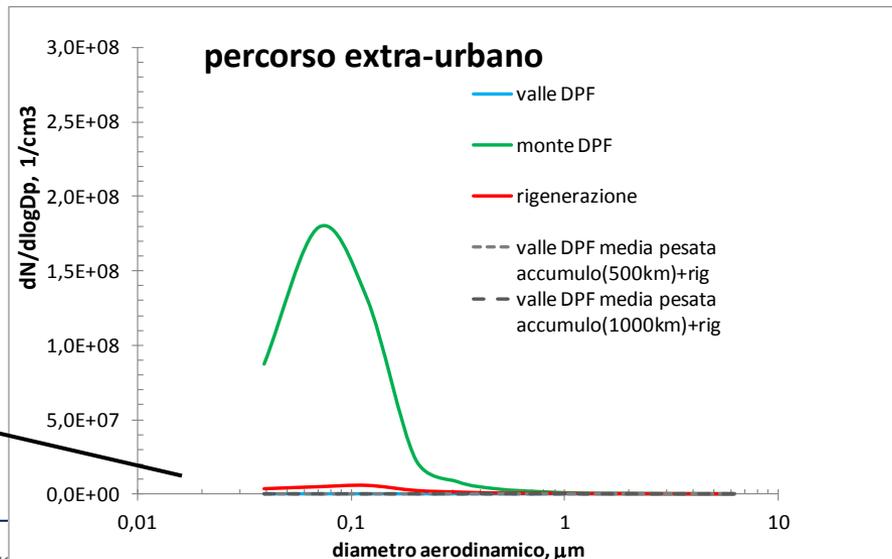
- 500 km
- 1000 km

*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 minori di  $1 \times 10^6$   $1/cm^3$



Distribuzioni minori di  $2 \times 10^5$   $1/cm^3$

# 8.6 Stima emissioni medie di PN includendo l'evento rigenerativo (non rappresentato nel grafico). Citroen Jumper 2.2 Euro 5b

Range dimensionale: 7nm-10µm

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

### Percorso

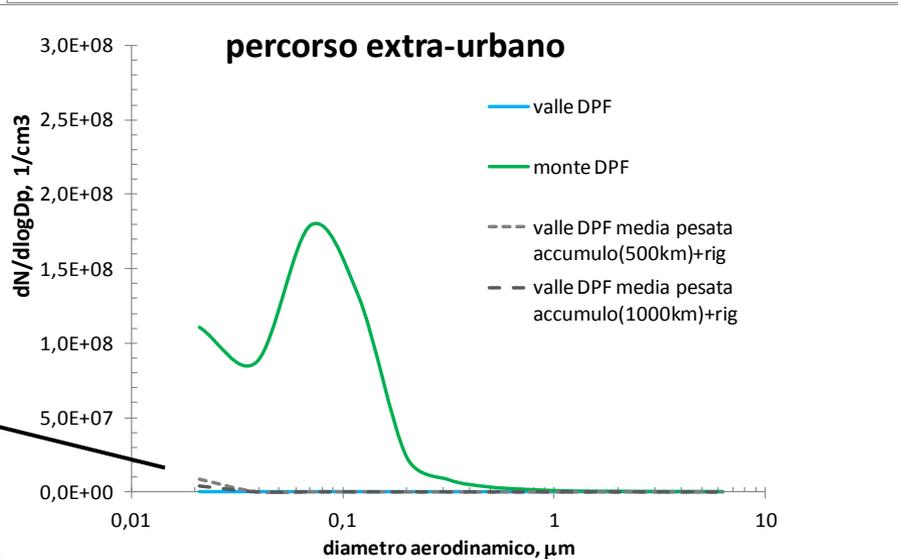
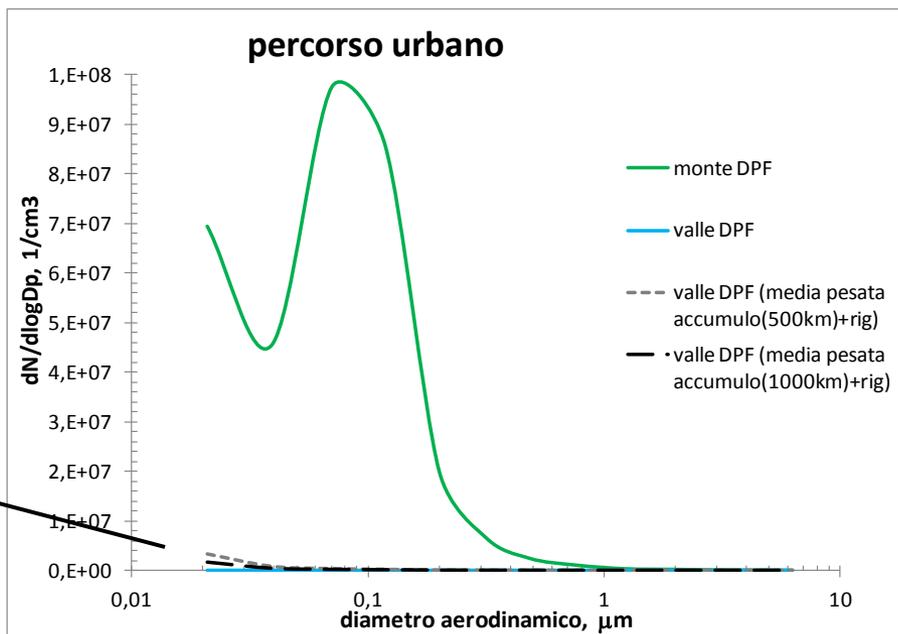
- urbano
- extra-urbano

### 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 minori di  $4 \times 10^6$   $1/cm^3$

Distribuzioni minori di  $1 \times 10^7$   $1/cm^3$

# 8.6 Stima emissioni medie di PN includendo l'evento rigenerativo (non rappresentato nel grafico). Citroen Jumper 2.2 Euro 5b

**Range dimensionale: 28nm-10µm**

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

Percorso

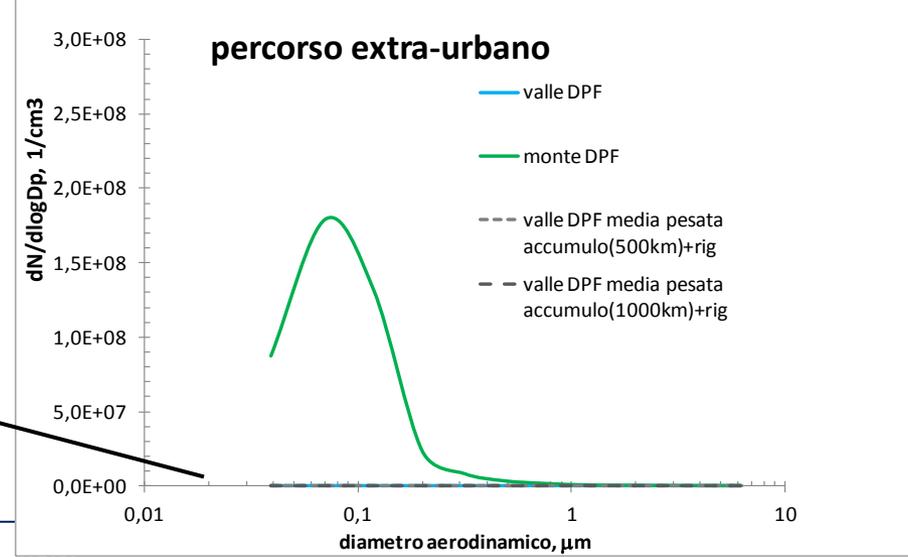
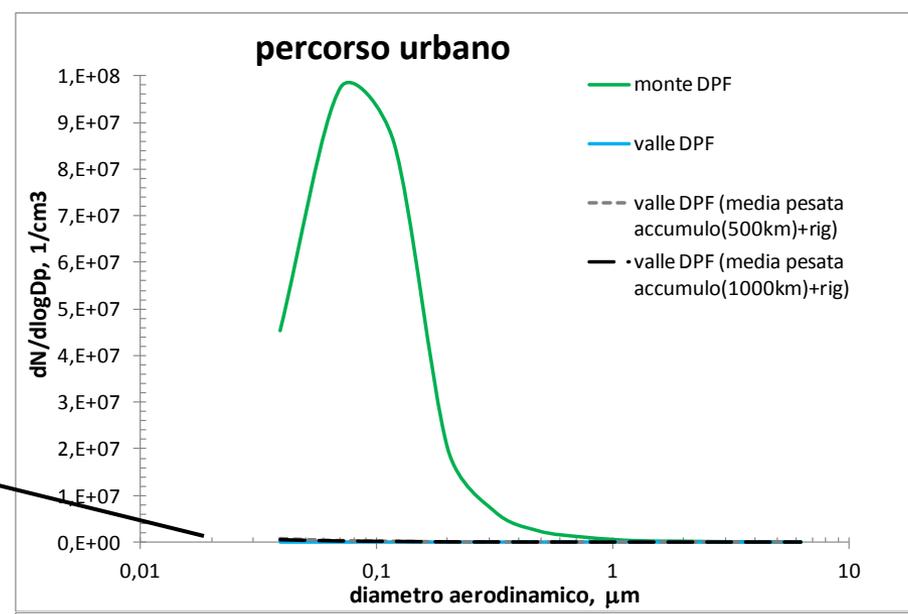
- urbano
- extra-urbano

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 minori di  $1 \times 10^6$   $1/cm^3$

Distribuzioni minori di  $2 \times 10^5$   $1/cm^3$

## 9.1 CONCLUSIONI

*L'uso del FAP/DPF negli autoveicoli e nei veicoli commerciali, sia esso wall-flow che flow-through, nonché attivo o passivo, migliora l'emissione di particolato in termini di massa PM ed in termini di numero di particelle PN?*

Tutti gli articoli analizzati danno dimostrazione che l'uso dei FAP a filtrazione totale (wall-flow), sia «di serie» che retrofit, ha praticamente «quasi» azzerato le emissioni di PM dei motori diesel.

Il livello di PM emesso in condizioni di normale utilizzo degli autoveicoli in presenza di FAP/DPF è talmente basso che è al limite della misurabilità con gli attuali strumenti di misura disponibili.

Alla riduzione del PM in termini di massa allo scarico del FAP, corrisponde anche analogo riduzione di emissione di composti riconosciuti tossici (PAH) che è in genere ridotta del 97-99% .

Anche per quanto concerne le emissioni in termini di PN misurate, secondo la procedura PMP ed in generale anche con strumentazione da ricerca, i valori risultanti sono molto bassi. Infatti, in uso normale, la concentrazione di PN allo scarico è prossima o addirittura inferiore a quella ambientale.

In uso normale la concentrazione di PN allo scarico è paragonabile o inferiore a quella di tutte le altre motorizzazioni, incluse quelle a metano.

## 9.2 CONCLUSIONI

*Come varia l'emissione di particelle micrometriche e nanometriche durante la rigenerazione per i FAP che necessitano di tale operazione? Se varia, quale tipo di particelle ne è principalmente influenzato? Come si comporta il FAP dopo l'evento rigenerativo?*

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). I risultati di letteratura indicano comportamenti molto variabili in funzione di numerosi fattori legati al motore, al combustibile, al sistema di post-trattamento ed alla metodologia di campionamento.

In ogni caso il valore delle emissioni in termini di PN su ciclo NEDC (ciclo di prova europeo utilizzato nelle prove di omologazione degli autoveicoli leggeri), anche tenendo conto dell'evento di rigenerazione, è inferiore a quello previsto dalla norma. La rigenerazione avviene, in media, ogni 500-1000 km, e dura mediamente dieci minuti e pertanto per un periodo limitatissimo, circa 1-2 %, rispetto all'intero intervallo di tempo che intercorre tra due rigenerazioni.

Dopo l'evento rigenerativo si ha una minore efficienza di filtrazione ma che rimane tra il 90-98% in genere.

## 9.3 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%.

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.