

**Politecnico di Milano**

Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



**POLITECNICO**  
MILANO 1863

**TEST DI EMISSIONI ALLO SCARICO SU  
AUTOVETTURE GPL EURO 6**

Relatore: Prof. Ing. Giovanni Lonati

Correlatore: Ing. Simone Casadei

Tesi di laurea di:  
Tommaso Bellin  
Matricola 883636

Anno Accademico 2018-2019



## RINGRAZIAMENTI

---

*Ringrazio il Professor Giovanni Lonati, sempre disponibile e cortese, per avermi dato la fiducia e l'opportunità di intraprendere questo percorso.*

*Ringrazio tutto il team del Laboratorio di Emissioni Autoveicolari di Innovhub-SSI, Simone, Tommaso e Claudio, per avermi insegnato moltissimo e per avermi accolto in un ambiente lavorativo sereno, stimolante ed ospitale. Un ringraziamento particolare a Simone per la sua disponibilità, competenza, precisione e pazienza nell'avermi guidato in tutte le fasi della realizzazione dell'elaborato.*

*Nella speranza che siano orgogliosi di me, desidero ringraziare i miei genitori per la loro pazienza, per aver sempre creduto in me, per avermi permesso di raggiungere questo traguardo e soprattutto per essermi sempre stati accanto nei momenti difficili e in quelli felici, non facendomi mai mancare sostegno e affetto.*

*Ringrazio mia sorella e tutta la mia famiglia per avermi sempre supportato e per essermi sempre stati vicini lungo questo cammino.*

*Qualunque ringraziamento per Francesca non sarebbe sufficiente. Mi limito a ringraziarla per tutto ciò che rappresenta per me, per sopportarmi, per essere sempre al mio fianco e per condividere con me sogni e speranze per il futuro.*

*Ringrazio infine tutti gli amici che mi hanno accompagnato in questi anni universitari.*

Tommaso



<b>PREMESSA.....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUZIONE TRASPORTO STRADALE .....</b>	<b>3</b>
1.1 EMISSIONI .....	3
1.2 NORMATIVA.....	7
1.3 INVENTARIO NAZIONALE DELLE EMISSIONI IN ATMOSFERA .....	17
1.4 GRUPPO ERMES .....	29
<b>2. TAVOLO DELLA MOBILITÀ SOSTENIBILE.....</b>	<b>32</b>
<b>3. MATERIALI E METODI .....</b>	<b>37</b>
3.1 PROTOCOLLO .....	37
3.2 VEICOLI.....	39
3.3 COMBUSTIBILI.....	40
3.4 PROVE DI LABORATORIO .....	41
3.4.1 Strumentazione .....	45
3.4.2 Calibrazione banco dinamometrico .....	56
3.4.3 Cicli di guida.....	59
3.5 PROVE RDE.....	62
3.5.1 Strumentazione.....	63
3.5.2 Ciclo di guida .....	66
<b>4. RISULTATI.....</b>	<b>69</b>
4.1 PROVE DI LABORATORIO .....	69
4.1.1 Emissioni gassose regolamentate, di CO <sub>2</sub> e consumo di combustibile.....	72
4.1.2 Emissioni di PN e PM.....	78
4.1.3 Emissioni gassose non regolamentate .....	83
4.2 PROVE RDE.....	90
<b>5. ELABORAZIONE DATI .....</b>	<b>98</b>
5.1 CONDIVISIONE DATI CON ISPRA .....	98
5.2 CONDIVISIONE DATI CON GRUPPO ERMES .....	106
<b>6. CONCLUSIONI .....</b>	<b>108</b>

<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>110</b>
<b>SITOGRAFIA.....</b>	<b>112</b>
<b>APPENDICE A.....</b>	<b>113</b>
<i>VEICOLO 1.....</i>	114
<i>VEICOLO 2.....</i>	117
<i>VEICOLO 3.....</i>	120
<i>VEICOLO 4.....</i>	123
<i>VEICOLO 5.....</i>	126
<b>APPENDICE B.....</b>	<b>129</b>
<b>APPENDICE C.....</b>	<b>135</b>
<b>APPENDICE D.....</b>	<b>135</b>

In Italia, così come in gran parte dell'Europa, le emissioni allo scarico dei mezzi di trasporto stradali rappresentano un enorme problema dal punto di vista della qualità dell'aria. Il settore del trasporto su strada italiano è infatti responsabile dell'emissione di grandi quantità di inquinanti atmosferici, tra le più rilevanti vi sono quelle di ossidi di azoto (326,85 kt/anno, pari al 46,1% dell'emissione nazionale di NOx), di monossido di carbonio (450,70 kt/anno, pari al 19,3% dell'emissione nazionale di CO) e di composti organici volatili non metanici (111,59 kt/anno, pari al 11,9% dell'emissione nazionale di NMVOC) (ISPRA, *Italian Emission Inventory 1990 – 2017, 2019*).

In considerazione di questo e del crescente impegno riposto nella mitigazione dei cambiamenti climatici e nella riduzione dell'inquinamento atmosferico, negli ultimi anni all'interno dei paesi europei sono stati introdotti nuovi regolamenti, disposizioni e piani per la qualità dell'aria con l'obiettivo di limitare le emissioni generate dal trasporto su strada (Miranda et al., 2016).

A livello italiano, tra i punti di riferimento fondamentali per la pianificazione e l'attuazione delle politiche ambientali da parte delle istituzioni competenti, vi è l'inventario nazionale delle emissioni in atmosfera, che viene predisposto, stilato ed annualmente aggiornato, nell'ambito della Convenzione di Ginevra sull'inquinamento atmosferico transfrontaliero UNECE/CLRTAP e delle Direttive Europee sulla limitazione delle emissioni, ad opera di ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) (ISPRA, *Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2017, 2019*).

È quindi di fondamentale importanza che ISPRA abbia a disposizione dati affidabili, accurati e costantemente aggiornati, così da poter realizzare un inventario quanto più rappresentativo delle emissioni italiane.

Nel corso di un Tavolo Tecnico istituito a Giugno 2016 su iniziativa della Presidenza del Consiglio dei Ministri, denominato Tavolo per la mobilità sostenibile, la società Assogasliquidi Federchimica, associazione industriale italiana che promuove l'uso di Gas

di Petrolio Liquefatti (GPL) come combustibile per le autovetture, ha evidenziato, tra i dati utilizzati da ISPRA per la realizzazione dell'inventario nazionale delle emissioni in atmosfera del 2016, una carenza di fattori di emissione (FE) riguardo le autovetture Euro 5 ed Euro 6 con alimentazione a GPL.

Assogasliquidi Federchimica ha quindi commissionato al Laboratorio Emissioni Autoveicolari (LEA) del Laboratorio Emissioni di Innovhub-SSI, una serie di prove sperimentali *super partes* per rilevare le emissioni allo scarico regolamentate e non regolamentate ed il consumo di combustibile su una flotta di autovetture a doppia alimentazione (bifuel GPL/benzina) con omologazione Euro 6 b e c. Le prove sono state eseguite con lo scopo di confrontare le emissioni e i consumi di combustibile tra l'alimentazione a benzina e quella a GPL e di determinare i corrispondenti fattori di emissione, carenti nella letteratura tecnico-scientifica per numerosi inquinanti e gas ad effetto serra da moderne auto bifuel GPL/benzina.

I test sono stati eseguiti da Luglio 2017 a Marzo 2018 seguendo un protocollo concordato e condiviso con Assogasliquidi Federchimica, con ISPRA e con il gruppo ERMES (*European Research on Mobile Emission Sources*), così che i fattori di emissione calcolati potessero essere impiegati nell'aggiornamento, rispettivamente, sia dell'inventario italiano delle emissioni in atmosfera sia dei database dei fattori di emissione utilizzati nei modelli europei di calcolo delle emissioni generate da trasporto stradale.

Il presente lavoro di tesi è stato realizzato nell'ambito di uno stage svolto presso il Laboratorio Emissioni Autoveicolari di Innovhub-SSI da Maggio a Novembre 2019. Dopo una prima descrizione dello stato dell'arte riguardo le emissioni autoveicolari e dell'utilizzo dei fattori di emissione nella redazione dell'inventario nazionale delle emissioni in atmosfera, si descrivono i test eseguiti in laboratorio e su strada per conto di Assogasliquidi Federchimica, si analizzano i risultati ottenuti e se ne fornisce un'elaborazione utile per la condivisione dei dati con ISPRA e gruppo ERMES.

# 1. INTRODUZIONE TRASPORTO STRADALE

## 1.1 EMISSIONI

Nel 2017 il settore del trasporto stradale ha generato complessivamente 92400 kt CO<sub>2</sub>eq, contribuendo al 21,6% del totale delle emissioni italiane di gas-serra e risultando secondo in questa particolare classifica solamente alla categoria delle industrie energetiche (ISPRA, *Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2017*, 2019).

Nella Figura 1 è riportato l'andamento, dal 1990 al 2017, delle emissioni italiane di gas-serra generate dal settore del trasporto stradale.

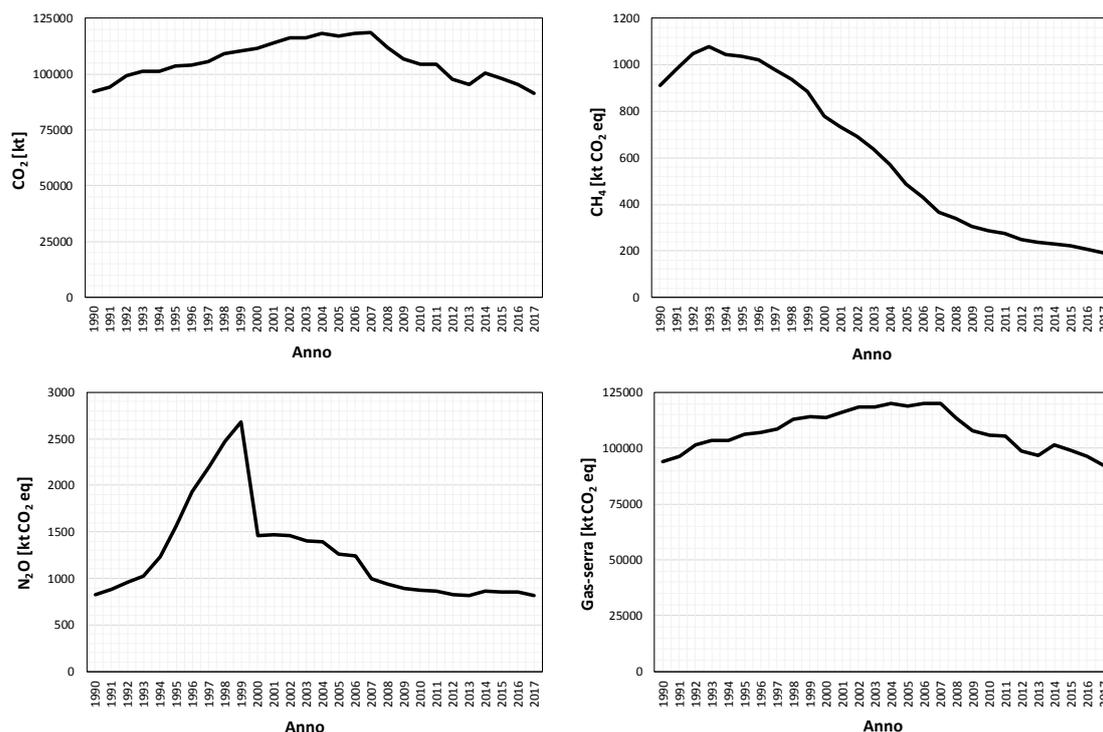


Figura 1 - Emissioni di anidride carbonica, metano, protossido di azoto, e del totale dei gas-serra prodotte dal settore del trasporto stradale italiano nel periodo 1990-2017 ed espresse in migliaia di tonnellate di CO<sub>2</sub> eq. (Fonte: [www.sinanet.isprambiente.it](http://www.sinanet.isprambiente.it)).

Dal 1990 al 2017 le emissioni di gas-serra prodotte dal settore del trasporto stradale sono diminuite complessivamente del 1,8%, attraversando due fasi ben distinte:

- Andamento crescente dal 1990 al 2007 (+27,7% al 2007 rispetto al 1990) dovuto all'aumento della flotta di veicoli circolante, delle percorrenze e dei consumi di combustibile;
- Andamento decrescente dal 2007 al 2017 (-23,1% al 2017 rispetto al 2007) dovuto alla crisi economica, alla diffusione di veicoli a minor consumo di carburante per chilometro percorso e, più in generale, all'introduzione nella flotta nazionale di veicoli dotati di nuove tecnologie dal punto di vista motoristico.

A partire dal 2000, le emissioni di metano e di protossido di azoto sono invece caratterizzate da trend decrescenti, come risultato dell'introduzione nella flotta italiana di veicoli conformi ai nuovi limiti emissivi imposti da normativa (ISPRA, *Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2017*, 2019). In particolare, il brusco calo nel 2000 dell'emissione di N<sub>2</sub>O coincide con l'introduzione dello standard Euro 3 che, per la prima volta, ha introdotto un limite emissivo sugli ossidi di azoto. Questo nuovo limite ha incentivato le case costruttrici ad adottare un sistema in grado di limitare la produzione di NO<sub>x</sub>: il ricircolo dei gas esausti (EGR). L'introduzione dell'EGR ha permesso di ridurre la produzione di NO<sub>x</sub> in fase di combustione e, conseguentemente, la reazione indesiderata di produzione di N<sub>2</sub>O in fase di riduzione catalitica del NO<sub>x</sub> ad azoto molecolare.

Nel 2017, tra i mezzi appartenenti al settore del trasporto stradale italiano, sono le autovetture adibite al trasporto di persone ad aver contribuito maggiormente (67,02%) al totale delle emissioni di gas-serra generate dall'intero settore, a cui seguono i veicoli commerciali pesanti (19,97%) e i veicoli commerciali leggeri (9,89%). In particolare, sono le autovetture alimentate a diesel ad essere responsabili della quota preponderante dell'emissione di gas-serra con 35059 ktCO<sub>2</sub> eq, con le autovetture a benzina e quelle a GPL al secondo e terzo posto, rispettivamente con un'emissione di 19342 ktCO<sub>2</sub> eq e 5047 ktCO<sub>2</sub> eq ([www.sinanet.isprambiente.it](http://www.sinanet.isprambiente.it)).

Nel 2017 il settore del trasporto stradale ha inoltre generato, tra le altre, le seguenti emissioni di inquinanti atmosferici (ISPRA, *Italian Emission Inventory 1990 – 2017, 2019*):

- 326,85 kt NO<sub>x</sub>, contribuendo al 46,1% del totale delle emissioni nazionali di ossidi di azoto;
- 450,70 kt CO, contribuendo al 19,3% del totale delle emissioni nazionali di monossido di carbonio;
- 111,59 kt NMVOC, contribuendo al 11,9% del totale delle emissioni nazionali di composti organici volatili non metanici;
- 21,87 kt PM<sub>10</sub>, contribuendo al 11,2% del totale delle emissioni nazionali di particolato con diametro aerodinamico  $\leq 10\mu\text{m}$ ;
- 16,31 kt PM<sub>2.5</sub>, contribuendo al 9,9% del totale delle emissioni nazionali di particolato con diametro aerodinamico  $\leq 2,5\mu\text{m}$

Nella Figura 2 è riportato l'andamento, dal 1990 al 2017, delle emissioni italiane dei principali inquinanti atmosferici generati dal settore del trasporto stradale.

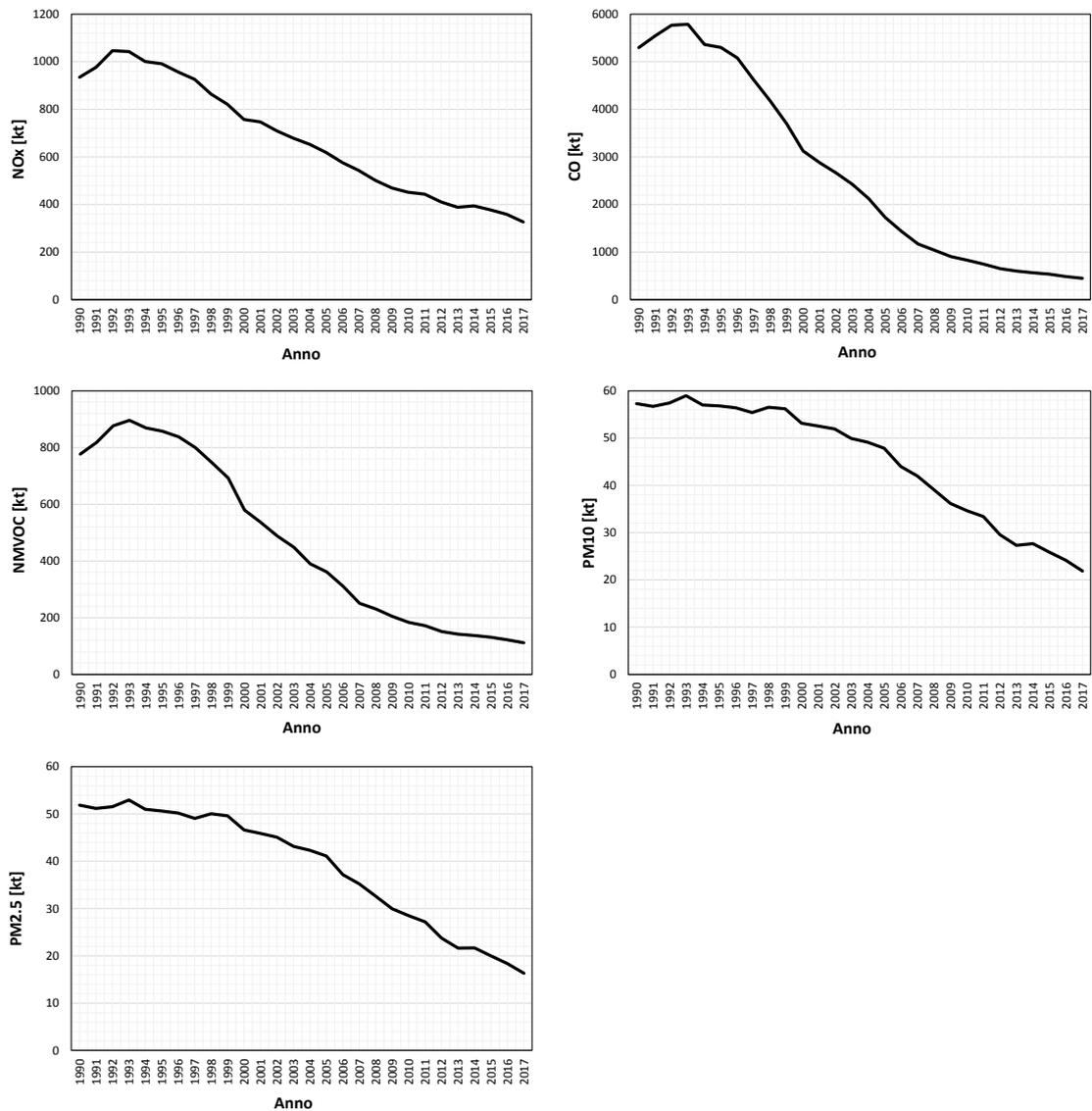


Figura 2 - Emissioni di ossidi di azoto, monossido di carbonio, composti organici volatili non metanici, PM10 e PM2.5 prodotte dal settore del trasporto stradale italiano nel periodo 1990-2017. (Fonte: [www.sinanet.isprambiente.it](http://www.sinanet.isprambiente.it)).

Le serie temporali proposte in Figura 2 mostrano un trend che riflette, da un lato, il risultato di una forte crescita generale della domanda di mobilità (+18,4% al 2017 rispetto al 1990 del totale dei chilometri percorsi dall'insieme dei mezzi di trasporto stradali con alimentazione a benzina, diesel, bifuel GNC [Gas Naturale Compresso]/benzina, bifuel GPL/benzina ed ibrida, fonte: [www.sinanet.isprambiente.it](http://www.sinanet.isprambiente.it)) e dall'altro, il frutto dell'introduzione sui nuovi veicoli di tecnologie in grado di ridurre

sempre più le emissioni inquinanti dell'intero settore del trasporto stradale italiano (ISPRA, *Italian Emission Inventory 1990 – 2017*, 2019).

Nel 2017 le emissioni di ossidi di azoto, generate principalmente dai veicoli a motore diesel, sono diminuite del 65% rispetto ai valori del 1990.

Le emissioni di NMVOC nel 2017 hanno subito una riduzione del 84% rispetto al 1990. Nonostante questo, il settore del trasporto stradale è comunque tra le più grandi fonti di NMVOC nazionali, con i ciclomotori, i motocicli e le emissioni evaporative della benzina a fornire il contributo maggiore.

Le emissioni di CO nel 2017 sono diminuite del 91,5% rispetto al 1990, con il contributo principale prodotto dalla circolazione dei veicoli alimentati a benzina.

Infine le emissioni di PM10 e PM2.5, per la cui stima vengono prese in considerazione anche l'abrasione stradale, delle gomme e dei freni, nel 2017 sono diminuite rispettivamente di 61,8% e 68,6% rispetto al 1990.

## **1.2 NORMATIVA**

Nonostante la continua riduzione delle emissioni, il settore del trasporto stradale rappresenta ancora un'importante fonte di inquinamento atmosferico, specialmente nelle aree urbane (Ntziachristos et al., 2009). La circolazione di veicoli all'interno dell'ambiente urbano, in particolar modo in condizioni di traffico intenso e per via della vicinanza con le attività umane, incrementa il rischio associato all'esposizione agli inquinanti atmosferici (JRC, 2014). È infatti ampiamente documentato che l'esposizione, sia a breve che a lungo termine, ad inquinanti atmosferici solidi e gassosi può portare a contrarre malattie prematuramente, in particolare legate al sistema respiratorio e a quello cardiovascolare (World Health Organization, 2013). È quindi di fondamentale importanza ridurre le emissioni prodotte dalla circolazione dei veicoli su strada e, di conseguenza, le concentrazioni di inquinanti presenti in atmosfera (JRC, 2014).

Per raggiungere questo obiettivo, in Europa, a partire dagli inizi degli anni '70 con la direttiva europea 220/1970, sono state introdotte limitazioni sempre più stringenti alle emissioni dei veicoli stradali.

La continua evoluzione della normativa europea in materia di emissioni stradali trova riscontro nei diversi standard emissivi, chiamati standard “Euro” ed inizialmente introdotti tramite la direttiva europea 441/1991 ([www.dieselnet.com](http://www.dieselnet.com)). Queste regolamentazioni hanno ridotto, col passare degli anni, i limiti emissivi allo scarico di un numero crescente di inquinanti atmosferici, incentivando così la graduale implementazione di nuove soluzioni tecnologie a livello motoristico e di post combustione (JRC, 2014).

Nella Tabella 1 sono riportati gli standard Euro con i rispettivi limiti allo scarico imposti per i veicoli di categoria M1, a cui appartengono le autovetture adibite al trasporto di persone.

Standard	Data	CO	THC	NMHC	HC + NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PM	PN
		g/km						
<b>Accensione comandata</b>								
<b>Euro 1</b>	07/1992	2,72 (3,16)	-	-	0,97 (1,13)	-	-	-
<b>Euro 2</b>	01/1996	2,2	-	-	0,5	-	-	-
<b>Euro 3</b>	01/2000	2,3	0,2	-	-	0,15	-	-
<b>Euro 4</b>	01/2005	1,0	0,1	-	-	0,08	-	-
<b>Euro 5</b>	09/2009 <sup>b</sup>	1,0	0,1	0,068	-	0,06	0,005 <sup>e,f</sup>	-
<b>Euro 6</b>	09/2014	1,0	0,1	0,068	-	0,06	0,005 <sup>e,f</sup>	6,0x10 <sup>11e,d</sup>
<b>Accensione spontanea</b>								
<b>Euro 1</b>	07/1992	2,72 (3,16)	-	-	0,97 (1,13)	-	0,14 (0,18)	-
<b>Euro 2, DI</b>	01/1996 <sup>a</sup>	1,0	-	-	0,9	-	0,1	-
<b>Euro 2, IDI</b>	01/1996	1,0	-	-	0,7	-	0,08	-
<b>Euro 3</b>	01/2000	0,64	-	-	0,56	0,5	0,05	-
<b>Euro 4</b>	01/2005	0,5	-	-	0,3	0,25	0,025	-
<b>Euro 5a</b>	09/2009 <sup>b</sup>	0,5	-	-	0,23	0,18	0,005 <sup>f</sup>	-
<b>Euro 5b</b>	09/2011 <sup>c</sup>	0,5	-	-	0,23	0,18	0,005 <sup>f</sup>	6,0x10 <sup>11</sup>
<b>Euro 6</b>	09/2014	0,5	-	-	0,17	0,08	0,005 <sup>f</sup>	6,0x10 <sup>11</sup>

I valori tra parentesi sono i limiti COP (Conformity Of Production)

a. Dopo il 30/09/1999 i motori DI devono rispettare i limiti imposti per i motori IDI

b. Dal 09/2009 per i nuovi modelli, dal 01/2011 per tutti i modelli

c. Dal 09/2011 per i nuovi modelli, dal 01/2013 per tutti i modelli

d. 6,0x10<sup>12</sup> #/km per i primi 3 anni dall'entrata in vigore dell'Euro 6

e. Applicabile solo ai motori ad iniezione diretta

f. 0,0045 g/km usando la procedura di misura PMP (Particulate Measurement Programme)

Tabella 1 - Euro standard con i rispettivi limiti allo scarico imposti per i veicoli di categoria M1  
(Fonte: [www.dieselnet.com](http://www.dieselnet.com))

Come si evince dalla Tabella 1, le regolamentazioni dell'Unione Europea prevedono differenti limiti emissivi per i motori ad accensione comandata (alimentati con benzina, metano, GPL, etanolo, etc) e per quelli ad accensione spontanea (motori diesel a gasolio). Tra le divergenze più evidenti vi sono le soglie imposte per il monossido di carbonio e per gli ossidi di azoto: rispetto a quanto accade per le autovetture ad accensione comandata, alle autovetture diesel è prescritto un limite inferiore di CO ed uno maggiore di NOx. Tale differenza si spiega per via delle diverse caratteristiche dei due motori: quello a diesel prevede una combustione tendenzialmente più completa (che implica un'emissione inferiore di CO) ma con condizioni più favorevoli alla formazione di NOx e viceversa accade per quello a benzina.

Oltre al rispetto dei limiti imposti dagli standard emissivi Euro 6 riguardo gli inquinanti atmosferici, le nuove autovetture, così come i nuovi veicoli commerciali leggeri, devono rispettare i livelli emissivi di CO<sub>2</sub> imposti dal nuovo regolamento UE 631/2019 (che abroga i regolamenti CE 443/2009 e UE 510/2011) del Parlamento Europeo del 17 Aprile 2019 ed in vigore dal 1 Gennaio 2020:

- 95 g CO<sub>2</sub>/km al 2021 per le autovetture;
- 147 g CO<sub>2</sub>/km al 2020 per i veicoli commerciali leggeri;

valori da intendersi come emissione media dell'intera flotta di ogni casa costruttrice.

Un'ulteriore prova della continua evoluzione della normativa in tema di emissioni stradali è rappresentata dal Regolamento UE 1151/2017 del 1 Giugno 2017. Questa normativa ha introdotto una nuova procedura per i test di emissione allo scarico in laboratorio su banco dinamometrico: la *Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure* (WLTP) a cui corrisponde il nuovo ciclo di guida *Worldwide harmonized Light vehicles Test driving Cycle* (WLTC), che ha sostituito il vecchio *New European Driving Cycle* (NEDC) (Valverde et al., 2019).

Il ciclo WLTC permette di testare le emissioni veicolari in un maggior numero di condizioni di guida rispetto a quanto si facesse precedentemente con il vecchio ciclo NEDC, ampiamente criticato per essere poco realistico e antiquato (Mock et al., 2013).

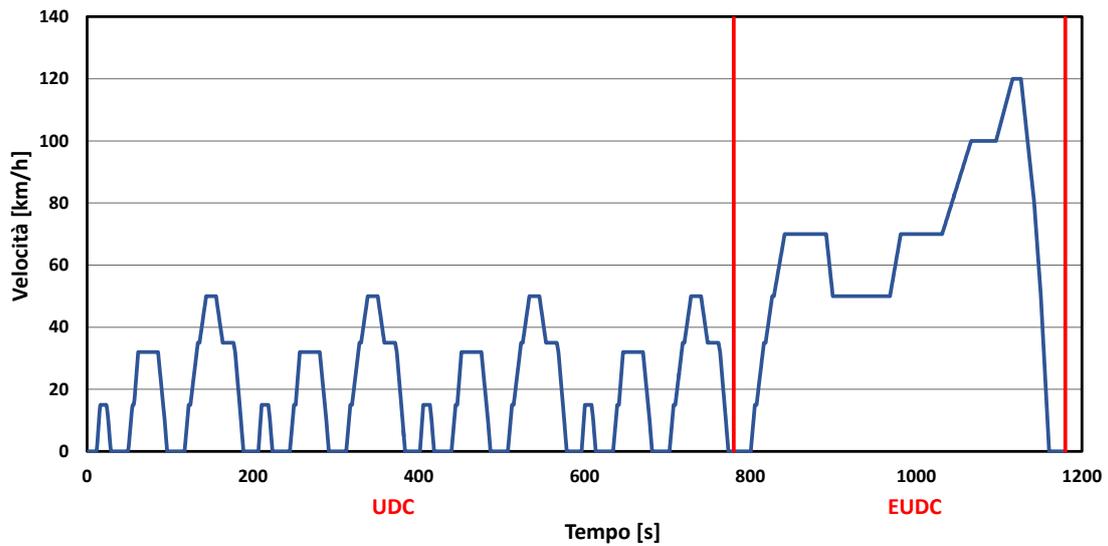


Figura 3 - Ciclo di guida NEDC

		NEDC	
		UDC	EUDC
<b>Durata</b>	s	780	400
<b>Velocità massima</b>	km/h	50,0	120,0
<b>Velocità media</b>	km/h	19,5	62,7
<b>Distanza</b>	km	4,05	6,96
<b>Tempo in IDLE</b>	%	30,8	10,0

Tabella 2 - Principali caratteristiche del ciclo NEDC

Il NEDC è stato il ciclo di omologazione in vigore fino al 31 Agosto 2017 per i nuovi modelli di auto e fino al 31 Agosto 2018 per i vecchi modelli. Il ciclo è suddiviso in una fase urbana (UDC, *Urban Driving Cycle*) e in una extra-urbana (EUDC, *Extra-Urban Driving Cycle*), con una durata complessiva di 1180 secondi. Il NEDC, oltre ad imporre una strategia di marcia predefinita a prescindere dal veicolo testato, è caratterizzato da un profilo di velocità non rappresentativo delle guida reale (Mock et al., 2013).

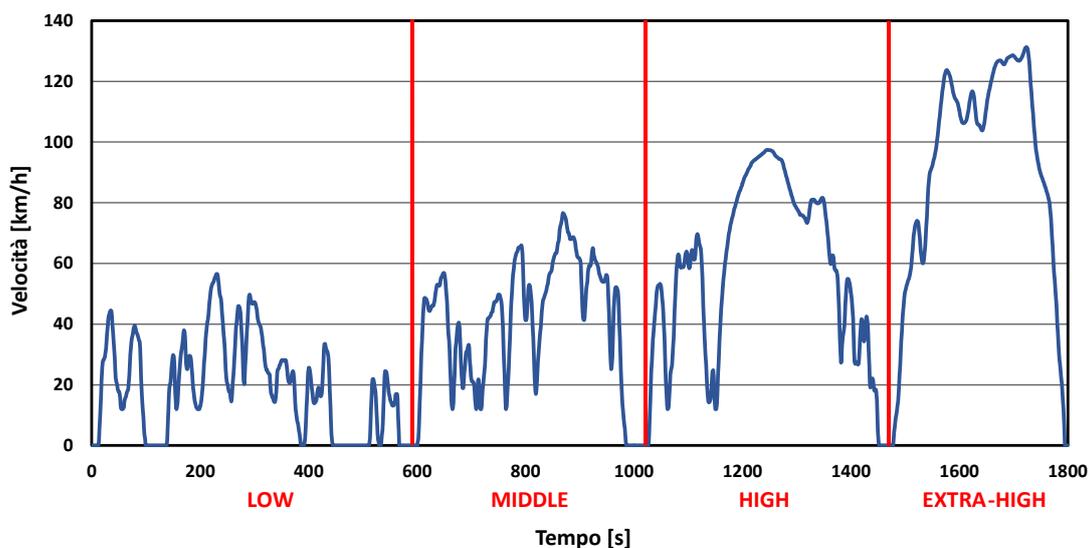


Figura 4 - Ciclo di guida WLTC

		WLTC			
		LOW	MIDDLE	HIGH	EXTRA-HIGH
<b>Durata</b>	s	593	431	455	323
<b>Velocità massima</b>	km/h	56,5	76,6	97,4	131,3
<b>Velocità media</b>	km/h	18,8	39,7	56,5	92,0
<b>Distanza</b>	km	3,09	4,75	7,14	8,24
<b>Tempo in IDLE</b>	%	25,3	10,7	6,6	2,2

Tabella 3 - Principali caratteristiche del ciclo di guida WLTC

Il WLTC è suddiviso in 4 fasi e ha una durata complessiva di 1800 secondi. Questo ciclo è caratterizzato da un profilo di velocità molto più rappresentativo della guida reale rispetto a quello imposto dal ciclo NEDC e prevede, per le autovetture con trasmissione manuale, il calcolo di una strategia di marcia diversificata per ogni veicolo in base a parametri quali la potenza nominale (kW), i giri del motore nominali e in IDLE (cambio in posizione folle), il numero di marce, il peso a vuoto e quello in fase di test ([www.acea.be](http://www.acea.be)).

Nella Tabella 4 sono schematicamente riportate le principali differenze tra i due cicli.

	<b>NEDC</b>	<b>WLTC</b>
<b>Test</b>	Ciclo singolo	Ciclo dinamico più rappresentativo della guida reale
<b>Durata</b>	1180 s	1800 s
<b>Distanza</b>	11 km	23,25 km
<b>Fasi</b>	2 fasi, 66% urbana e 34% non urbana	4 fasi più dinamiche, 52% urbane e 48% non urbane
<b>Velocità media</b>	34 km/h	46,5 km/h
<b>Velocità massima</b>	120 km/h	131,3 km/h
<b>Strategia di marcia</b>	Cambi marcia prefissati ed uguali per ogni veicolo	Cambi marcia calcolati ad hoc per ogni veicolo

Tabella 4 - Principali differenze tra i cicli di guida NEDC e WLTC. (Fonte: [www.acea.be](http://www.acea.be))

Il WLTC è il nuovo ciclo di omologazione in vigore dal 1 Settembre 2017 per i nuovi modelli e dal 1 Settembre 2018 per tutti i veicoli nuovi. A partire dall'omologazione Euro 6c tutte le autovetture sono state testate, per ciò che concerne la prova eseguita in laboratorio, secondo la nuova procedura WLTP in sostituzione del vecchio ciclo NEDC, con cui sono state testate le autovetture in fase di omologazione fino all'Euro 6b.

Un'ulteriore svolta dal punto di vista normativo riguardo le emissioni autoveicolari è rappresentato dall'introduzione dei test di emissione allo scarico in condizione di guida reale: le prove RDE (*Real Driving Emissions*), eseguite su strada tramite l'uso di un sistema di misurazione portatile delle emissioni chiamato "PEMS" (*Portable Emission Measurement System*).

In Unione Europea, a partire da Settembre 2017, il test RDE è infatti parte integrante della procedura di omologazione delle nuove autovetture e dei nuovi veicoli commerciali leggeri. La prova RDE ha l'obiettivo di integrare il test di laboratorio e di verificare che i livelli emissivi in condizioni di guida reale restino inferiori a determinate soglie (ICCT, 2018).

I requisiti e gli aggiornamenti per l'esecuzione delle prove RDE sono stati progressivamente introdotti attraverso una serie di emendamenti chiamati "pacchetti RDE":

- Primo pacchetto RDE adottato a Maggio 2015 e pubblicato a Marzo 2016 (Regolamento UE 427/2016);
- Secondo pacchetto RDE adottato a Maggio 2015 e pubblicato ad Aprile 2016 (Regolamento UE 646/2016);
- Terzo pacchetto RDE adottato a Dicembre 2016 e pubblicato a Giugno 2017 come parte del Regolamento UE 1154/2017;
- Quarto pacchetto RDE adottato a Maggio 2018 e pubblicato a Novembre 2018 (Regolamento UE 1832/2018).

La Figura 5 riassume la serie temporale dei pacchetti normativi delle prove RDE.



Figura 5 - Serie temporale dei 4 pacchetti normativi RDE. (Fonte: ICCT, 2018).

Il primo pacchetto RDE ha introdotto le caratteristiche basilari del test, quali la caratterizzazione della prova, la descrizione degli strumenti di acquisizione dei dati, il concetto di famiglia di veicoli (classificazione degli autoveicoli in famiglie caratterizzate dallo stesso gruppo motopropulsore e blocco motore oppure dallo stesso numero di cilindri) e i requisiti tecnici dell'equipaggiamento PEMS (ICCT, 2018).

Il secondo pacchetto RDE ha invece introdotto il limite *Not-To-Exceed* (NTE) per gli ossidi di azoto, le condizioni al contorno dinamiche della prova e il limite riguardo la variazione di altitudine (ICCT, 2018).

Il terzo pacchetto RDE ha introdotto il limite NTE per il numero di particolato, una nuova procedura per la partenza a freddo, le specifiche per il testing di veicoli ibridi e la

procedura di calcolo per tenere in considerazione degli eventi di rigenerazione dei filtri antiparticolato (ICCT, 2018).

Il quarto pacchetto RDE ha apportato modifiche al limite NTE per gli ossidi di azoto e al metodo di determinazione di validità del test (ICCT, 2018).

Nelle Tabelle 5-6 sono riportati i requisiti e le condizioni al contorno dei test RDE, definiti nei primi due pacchetti legislativi.

<b>Durata totale del test</b>		Tra 90 e 120 minuti
<b>Distanza</b>	Urbano	> 16 km
	Extra-urbano	> 16 km
	Autostradale	> 16 km
<b>Composizione</b>	Urbano	Da 29% a 44% della distanza
	Extra-urbano	Da 23% a 43% della distanza
	Autostradale	Da 23% a 43% della distanza
<b>Velocità medie</b>	Urbano	Tra 15 e 40 km/h
	Extra-urbano	Tra 60 e 90 km/h
	Autostradale	> 90 km/h (> 100 km/h per almeno 5 minuti)

Tabella 5 - Requisiti di distanza e velocità distinti per ambito urbano, extra-urbano ed autostradale per i test RDE. (Fonte: ICCT, 2017).

<b>Altitudine</b>	Moderata	Da 0 a 700 m
	Estesa	Tra 700 m e 1300 m
<b>Δ Altitudine</b>		< 100 m tra inizio e fine
<b>Aumento di altitudine cumulata</b>		1200 m / 100 km
<b>Temperatura ambiente</b>	Moderata	Da 0°C a 30°C
	Estesa	Tra (da -7°C a 0°C) e (da 30°C a 35°C)
<b>Stop (v &lt; 1 km/h)</b>		Tra 6 % e 30 % del tempo urbano
<b>Velocità massima</b>		145 km/h (nel rispetto dei limiti locali)
<b>Condizioni al contorno dinamiche</b>	Massima	95° percentile di (velocità*accelerazione positiva)
	Minima	RPA (Relative Positive Acceleration)

Tabella 6 - Condizioni al contorno per i test RDE. (Fonte: ICCT, 2017).

Le soglie NTE sono calcolate moltiplicando i limiti emissivi Euro 6 per dei coefficienti chiamati Conformity Factors (CF):

- CF = 2,1 per NOx da Settembre 2017 per i nuovi modelli che arrivano per la prima volta sul mercato e da Settembre 2019 per tutti i veicoli nuovi in vendita;
- CF = 1,43 per NOx da Gennaio 2020 per i nuovi modelli che arrivano per la prima volta sul mercato e da Gennaio 2021 per tutti i veicoli nuovi in vendita;
- CF = 1,5 per PN da Settembre 2017 per tutti i nuovi modelli che arrivano per la prima volta sul mercato e da Settembre 2018 per tutti i veicoli nuovi in vendita.

([www.dieselnet.com](http://www.dieselnet.com)).

I limiti NTE sono quindi calcolati per mezzo della seguente equazione:

$$NTE_{INQUINANTE\ i} = CF_{INQUINANTE\ i} \times \text{limite Euro 6}_{INQUINANTE\ i}$$

Con l'introduzione del quarto pacchetto legislativo, il *Moving Average Window* (MAW) è l'unico metodo riconosciuto per la validazione delle prove RDE. Questo criterio si basa sul confronto tra l'emissione di CO<sub>2</sub> generata durante la prova su strada e delle curve di riferimento calcolate sulla base delle emissioni di CO<sub>2</sub> misurate nel test WLTP in laboratorio. I test RDE sono considerati validi se almeno il 50% delle emissioni di CO<sub>2</sub> rilevate per l'ambito stradale urbano, extra-urbano e autostradale si trovano all'interno delle rispettive finestre di tolleranza calcolate sulla base delle emissioni di CO<sub>2</sub> misurate nel test WLTP in laboratorio (ICCT, 2018).

Il diagramma di Figura 6 riassume i passi di validazione delle prove RDE.

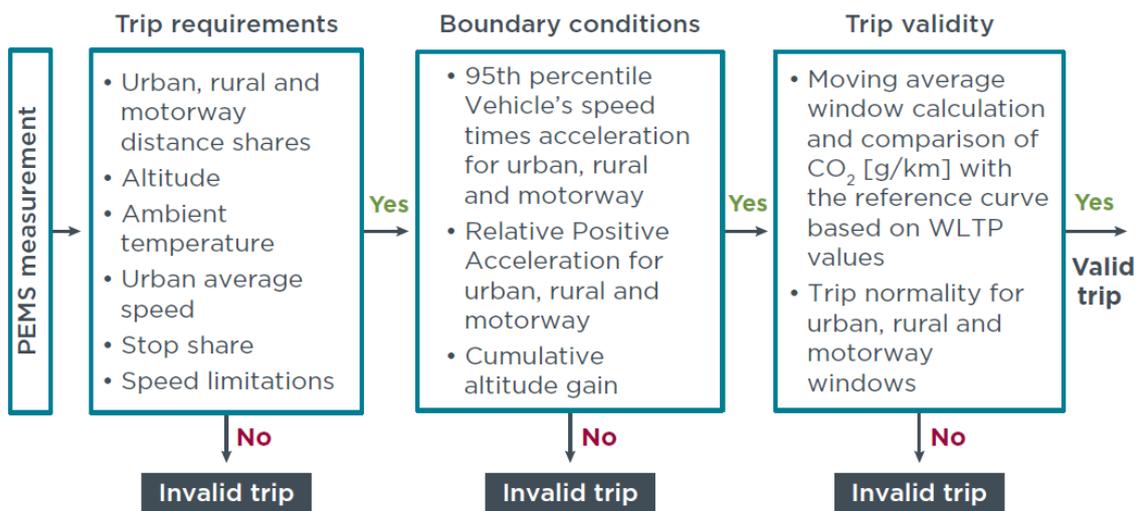


Figura 6 - Step della procedura di validazione di un test RDE. (Fonte: ICCT, 2018).

Oltre a quelle della CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e materiale particolato (valutato in termini di numero di particelle, PN), anche le emissioni di monossido di carbonio sono misurate durante le prove RDE ma non sono attualmente previsti limiti NTE da rispettare (ICCT, 2018).

Complessivamente, le emissioni autoveicolari ottenute dai test WLTP in laboratorio e dalle prove RDE su strada rappresentano fonti di dati realistici e consistenti per lo sviluppo di fattori di emissione (Valverde et al., 2019). Fattori di emissione che possono essere recepiti ed utilizzati, nella fase di calcolo delle emissioni generate da trasporto stradale, dagli enti preposti all'aggiornamento dell'inventario nazionale delle emissioni in atmosfera.

### 1.3 INVENTARIO NAZIONALE DELLE EMISSIONI IN ATMOSFERA

L'Italia è tenuta, come strumento di verifica degli impegni assunti a livello internazionale sulla protezione dell'ambiente atmosferico, quali la Convenzione Quadro sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC), il Protocollo di Kyoto, la Convenzione di Ginevra sull'inquinamento atmosferico transfrontaliero UNECE/CLRTAP e le Direttive europee sulla limitazione delle emissioni, alla redazione annuale del proprio inventario nazionale delle emissioni in atmosfera ([www.sinanet.isprambiente.it](http://www.sinanet.isprambiente.it)). Questo documento, realizzato in Italia ad opera dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, al di là di riportare i livelli emissivi del Paese e spiegarne le modalità di calcolo, ha l'obiettivo di agire da supporto alla normativa in materia di riduzione delle emissioni atmosferiche (ISPRA, *Italian Emission Inventory 1990 – 2017*, 2019). L'inventario è suddiviso in 5 macro-settori: energia, processi industriali, agricoltura, uso del suolo e rifiuti. All'interno della sezione energetica si colloca il sotto-settore del trasporto stradale.

Le emissioni da trasporto stradale che si trovano all'interno dell'inventario italiano delle emissioni in atmosfera sono stimate per mezzo del modello Copert (*COmputer Programme to calculate Emissions from Road Transport*) con aggiornamento software alla versione 5.2.2 utilizzato per la realizzazione dell'ultimo inventario pubblicato a Marzo 2019. Questo modello, il cui sviluppo tecnico viene supportato dall'Agenzia Europea dell'Ambiente nell'ambito delle attività dello ETC/ACC (*European Topic Centre on Air and Climate Change*), dal laboratorio di termodinamica applicata dell'università Aristotele di Salonicco e dal Joint Research Centre della Commissione Europea, oltre ad essere utilizzato in ambito di ricerca, scientifico ed accademico, è uno strumento riconosciuto internazionalmente ed usato da molti Paesi europei per il calcolo delle emissioni da trasporto stradale in fase di realizzazione degli inventari delle emissioni in atmosfera. La metodologia alla base del modello Copert è stata sviluppata in accordo sia con le linee guida del 2006 del gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico (*IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 2006), sia con la guida dell'Agenzia Europea dell'Ambiente riguardo l'inventario delle emissioni di inquinanti atmosferici (*air*

*pollutant emission inventory guidebook, 2016*) (ISPRA, *Italian Emission Inventory 1990 – 2017, 2019*).

L'utilizzo di uno strumento e di una metodologia comune ha come obiettivo la trasparenza, completezza, accuratezza, coerenza, confrontabilità e comparabilità delle stime prodotte dai vari Paesi, nell'ambito delle procedure di reporting previste da Convenzioni e Protocolli internazionali e dalla legislazione dell'Unione europea (ISPRA, 2010).

Le stime delle emissioni provenienti dal settore del trasporto stradale fanno riferimento alle seguenti categorie:

- Autovetture a benzina, diesel, GPL, GNC ed ibride;
- Veicoli commerciali leggeri a benzina e diesel;
- Veicoli commerciali pesanti (autocarri ed autoarticolati);
- Bus diesel e a GNC;
- Ciclomotori e motocicli;
- Evaporazione della benzina;
- Usura delle gomme e dei freni;
- Abrasione stradale.

Il modello Copert, sulla base dei parametri inseriti in ingresso al modello, restituisce separatamente per categoria di veicolo e per area urbana, extra-urbana e autostradale, la stima dell'emissione di un gran numero di inquinanti (ISPRA, *Italian Emission Inventory 1990 – 2017, 2019*).

La metodologia generica implementata nel modello Copert per il calcolo delle emissioni da trasporto stradale è schematizzata nel diagramma di Figura 7.

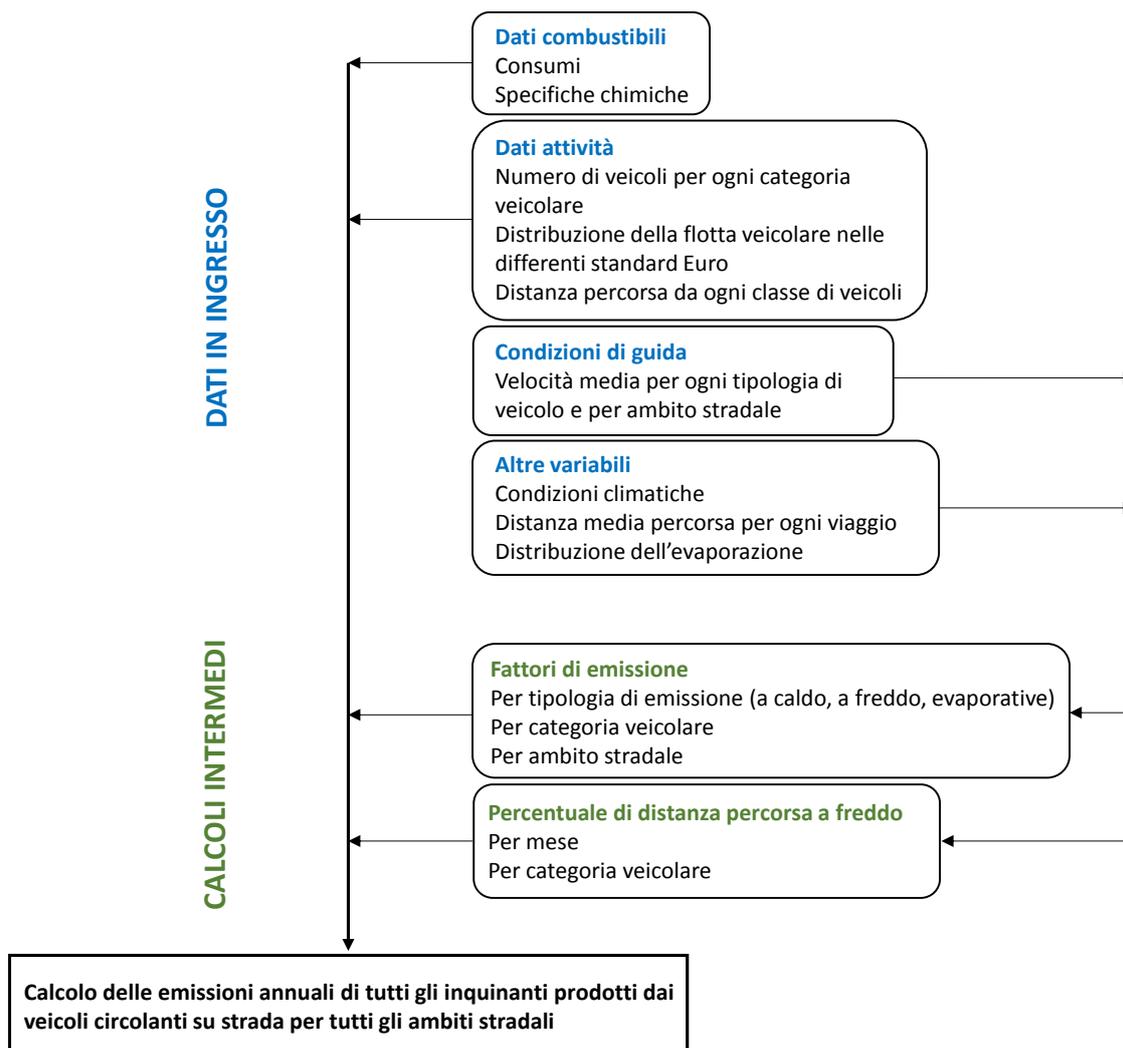


Figura 7 - Metodologia generica di calcolo delle emissioni generate da trasporto stradale implementata nel modello Copert. (Fonte: EMEP/EEA, 2016).

Nell'EMEP/EEA *Emission Inventory Guidebook* 2016 vengono proposti fondamentalmente tre approcci metodologici alla stima delle emissioni allo scarico:

- Tier 1, applicabile nel caso in cui ci sia disponibilità solamente di statistiche sui combustibili, in modo tale che i dati di attività siano combinati con fattori di emissione forniti di default dal modello;
- Tier 2, applicabile nel caso di disponibilità dei dati sulle percorrenze per tecnologia dei veicoli, o nel caso queste possano essere stimate;
- Tier 3, applicabile nel caso si disponga di dati sulle percorrenze e sulle velocità medie per le diverse condizioni di guida e tecnologie dei veicoli

(EMEP/EEA, 2016).

Sulla base dei dati a disposizione, l'approccio al calcolo per la stima delle emissioni italiane è diversificato in base al gruppo di inquinanti considerato:

- Primo gruppo: CO, NO<sub>x</sub>, VOC, CH<sub>4</sub>, NMVOC, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, e PM. Per questi inquinanti il calcolo dell'emissione si basa su specifici fattori di emissione differenziati per le diverse condizioni di guida;
- Secondo gruppo: CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Se e Zn. Per questi inquinanti il calcolo dell'emissione si basa sul consumo di combustibile;
- Terzo gruppo: IPA, PCDD e PCDF. Per questi inquinanti non esistono dati specifici e per il calcolo dell'emissione viene quindi applicata una metodologia semplificata;
- Quarto gruppo: alcani, alcheni, alchini, aldeidi, chetoni, cicloalcani e composti aromatici. L'emissione di questi inquinanti è calcolata come frazione delle emissioni totali di NMVOC.

Per gli inquinanti appartenenti al primo gruppo, essendo disponibile un'ampia base dati, viene applicato l'approccio Tier 3, secondo cui le emissioni totali sono calcolate come somma delle emissioni a caldo (quando il motore e i dispositivi di trattamento del gas di scarico hanno raggiunto la temperatura di funzionamento di regime) e delle emissioni a freddo (le emissioni generate nel tempo che intercorre tra l'accensione del motore e il raggiungimento della normale temperatura di funzionamento del motore stesso e dei dispositivi di trattamento del gas di scarico) (EMEP/EEA, 2016). La distinzione tra le due condizioni operative è necessaria per via della maggiore concentrazione nel gas di scarico di alcuni inquinanti durante il periodo in cui il motore e i dispositivi di trattamento del gas non hanno ancora raggiunto la loro stabilità termica di funzionamento. Questo è particolarmente vero per le autovetture dotate di catalizzatore a tre vie, che entra in regime ottimale di funzionamento solamente dopo essersi adeguatamente riscaldato (ISPRA, *Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2017*, 2019).

Le emissioni totali sono quindi calcolate tramite la seguente equazione:

$$E_{TOTAL} = E_{HOT} + E_{COLD}$$

dove,

$E_{TOTAL}$  = emissione totale [massa] di un inquinante per la risoluzione spaziale e temporale applicata;

$E_{HOT}$  = emissione [massa] a caldo;

$E_{COLD}$  = emissione [massa] a freddo

(Ntziachristos et al., 2009).

Per il calcolo delle emissioni totali degli inquinanti per la redazione dell'inventario italiano delle emissioni in atmosfera, la risoluzione spaziale considerata è l'intera Nazione, mentre quella temporale è l'anno civile.

Essendo le emissioni veicolari strettamente dipendenti dalle condizioni di funzionamento del motore, che a loro volta variano in base alla tipologia di guida imposta dal tratto stradale percorso, è possibile suddividere le emissioni totali tra quelle generate nei tratti urbani, extra-urbani ed autostradali, a ciascuna delle quali sono associati differenti parametri e fattori di emissione. Le emissioni totali possono quindi essere calcolate anche tramite la seguente equazione:

$$E_{TOTALE} = E_{URBAN} + E_{RURAL} + E_{HIGHWAY}$$

dove,

$E_{URBAN}, E_{RURAL}, E_{HIGHWAY}$  = emissioni totali di un inquinante per la rispettiva condizione di guida.

Le emissioni totali sono quindi calcolate combinando specifici parametri per ogni categoria di veicolo con appropriati fattori di emissione dipendenti dalle condizioni di guida e da quelle climatiche (EMEP/EEA, 2016).

Le emissioni a caldo dipendono da più fattori riguardanti il veicolo, tra cui: la distanza percorsa, la velocità (variabile in base alla tipologia di strada), l'età, la dimensione del motore ed il peso. La formula implementata nel modello Copert per la stima delle emissioni a caldo è la seguente:

$$E_{HOT;i,k,r} = N_k \times M_{k,r} \times e_{HOT;i,k,r}$$

dove,

$E_{HOT;i,k,r}$  = emissioni [g] a caldo allo scarico dell'inquinante i prodotte nel periodo considerato dai veicoli di tecnologia k su un tratto stradale di tipo r (urbano, extra-urbano, autostradale);

$N_k$  = numero di veicoli [veh] di tecnologia k circolanti nel periodo considerato;

$M_{k,r}$  = distanza per veicolo [km/veh] percorsa dai veicoli di tecnologia k su tratto stradale di tipo r;

$e_{HOT;i,k,r}$  = fattore di emissione [g/km veh] per l'inquinante i, rilevato per un veicolo di tecnologia k su tratto stradale di tipo r.

(EMEP/EEA, 2016).

Le emissioni a freddo, pur avendo luogo in ogni condizione di guida, sono per lo più attribuibili all'ambito urbano ed in secondo luogo a quello extraurbano, poiché il numero di partenze a freddo in aree extra-urbane ed autostradali è relativamente limitato.

Queste emissioni sono prodotte da ogni categoria di veicolo ma la metodologia implementata nel modello Copert ne prevede il calcolo solo per le autovetture e per i veicoli commerciali leggeri (nell'ipotesi di prestazioni simili tra le due macro-categorie) alimentati a benzina, diesel e GPL e senza considerarle funzioni dell'età dei veicoli (ISPRA, 2010).

La formula implementata nel modello Copert per la stima delle emissioni a freddo è la seguente:

$$E_{COLD;i,k} = \beta_{i,k} \times N_k \times M_k \times e_{HOT;i,k} \times \left( \frac{e_{COLD}}{e_{HOT}} |_{i,k} - 1 \right)$$

dove,

$E_{COLD;i,k}$  = emissioni [g] a freddo allo scarico dell'inquinante i prodotte nel periodo considerato dai veicoli di tecnologia k;

$\beta_{i,k}$  = distanza [km] percorsa con motore o sistemi di trattamento del gas di scarico a temperature inferiori a quelle raggiunte in pieno regime di funzionamento per l'inquinante i e i veicoli di tecnologia k. Il parametro  $\beta$  dipende dalla temperatura

ambiente (per ragioni pratiche può essere utilizzata la temperatura media mensile), dalla tipologia di veicolo, dal comportamento di guida ed è assunto di default pari a 12 km nei paesi europei.

$N_k$  = numero di veicoli [veh] di tecnologia k circolanti nel periodo considerato;

$M_k$  = distanza per veicolo [km/veh] percorsa dai veicoli di tecnologia k;

$e_{HOT;i,k}$  = fattore di emissione [g/km] a caldo per l'inquinante i e i veicoli di tecnologia k;

$\frac{e^{COLD}}{e^{HOT}} |_{i,k}$  = rapporto tra fattore di emissione a freddo e a caldo per l'inquinante i e i veicoli di tecnologia k. È un parametro maggiore di 1 che dipende dal comportamento di guida, dalle condizioni climatiche e dall'inquinante considerato.

Nel caso, poco frequente, in cui la distanza percorsa in condizioni di motore freddo superi la quota di percorrenze assegnate all'ambito urbano, la parte residua delle emissioni a freddo viene attribuita all'ambito extraurbano (EMEP/EEA, 2016).

ISPRA, per il calcolo delle emissioni a caldo e a freddo, dispone di dati dettagliati riguardo le distanze percorse e la composizione della flotta nazionale per tutte le categorie di veicoli. Tali informazioni sono ottenute da ISPRA sulla base delle pubblicazioni da parte del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT), dell'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT), dell'Associazione Italiana Società Concessionarie Autostrade e Trafori (AISCAT), della Confederazione Generale Italiana dei Trasporti e della Logistica (CONFETRA) e del comitato centrale degli autotrasportatori (ISPRA, Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2017, 2019).

Nella Tabella 7 sono riportati i dati delle distanze, percorse da ogni macro-categoria di veicolo e per diversa tipologia di strada, elaborate da ISPRA per la realizzazione dell'inventario nazionale delle emissioni in atmosfera del 2019. Tali dati, per l'inserimento nel modello Copert, sono ulteriormente elaborati da ISPRA per stimare le distanze percorse da ogni categoria, con distinzione sulla base dell'Euro standard e del segmento di appartenenza del veicolo.

Tipologia	Alimentazione	Distanza percorsa [k[km]]			
		Urbano	Extra-urbano	Autostradale	Totale
Autovetture	Benzina	32.816.258	51.011.994	29.432.022	113.260.274
Autovetture	Diesel	31.165.608	117.444.306	67.086.833	215.696.747
Autovetture	Ibride	486.495	729.742	405.412	1.621.650
Autovetture	GPL Bifuel	8.412.424	11.216.565	8.412.424	28.041.413
Autovetture	CNG Bifuel	3.164.550	4.219.400	3.164.550	10.548.501
Veicoli commerciali leggeri	Benzina	347.050	763.511	277.640	1.388.202
Veicoli commerciali leggeri	Diesel	9.404.090	20.688.998	7.523.272	37.616.359
Veicoli commerciali pesanti	Benzina	236	708	236	1.179
Veicoli commerciali pesanti	Diesel	2.780.940	9.219.659	13.934.364	25.934.963
Bus	Diesel	706.177	949.706	1.809.503	3.465.386
Bus	CNG	161.264	17.918	-	179.182
Ciclomotori	Benzina	5.691.762	2.439.327	-	8.131.089
Motocicli	Benzina	13.353.262	7.789.403	1.112.772	22.255.436

Tabella 7 - Distanze percorse da ogni macro-categoria di veicolo per diversa tipologia di strada. (Fonte: elaborazioni ISPRA (Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2017, 2019)).

I fattori di emissione, presenti nelle equazioni di calcolo delle emissioni a caldo e a freddo, sono relazioni funzionali che esprimono il quantitativo di un inquinante emesso da un veicolo per distanza percorsa e dipendono da un gran numero di parametri, tra cui: le caratteristiche del veicolo, le specifiche del combustibile, le condizioni ambientali e quelle operative (partenza a freddo, andatura costante, accelerazione, ecc.) (Franco et al., 2013).

I fattori di emissione sono generalmente sviluppati sulla base di dati sperimentali raccolti in campagne di misurazione di emissioni veicolari eseguite in laboratorio (in condizioni controllate) oppure su strada (in condizioni di guida reale) e un approccio semplificato consiste nell'utilizzare, ai fini di determinarne il valore, misure medie della velocità rappresentativi di ciascun ciclo di guida (EMEP/EEA, 2016).

ISPRA ha a disposizione un ampio database di fattori di emissione ottenuti da test di emissione su veicoli della flotta circolante italiana, differenziati sulla base della tipologia

di veicolo, dell'alimentazione, della cilindrata del motore, dello standard legislativo e dell'ambito di guida. Per le categorie di veicoli per cui non ci sono fattori di emissione 'country specific', ISPRA utilizza fattori di emissione messi a disposizione dal Copert: il modello possiede infatti un database di funzioni di emissione che mettono in relazione i fattori di emissione alla velocità media per ogni tipologia di veicolo ed Euro standard. Le funzioni di emissione interne al Copert, ottenute interpolando un gran numero di misure sperimentali, permettono quindi di ottenere i valori dei fattori di emissione [g<sub>inquinante</sub>/km] a partire solamente dall'informazione riguardante la velocità media dell'ambito stradale considerato (ISPRA, *Italian Emission Inventory 1990 – 2017, 2019*).

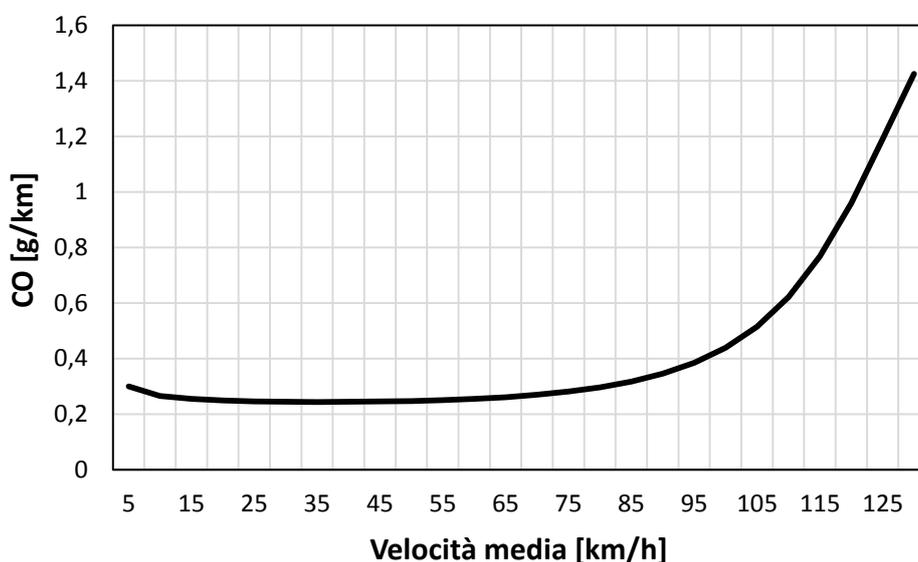


Figura 8 - Funzione di emissione del monossido di carbonio di un'autovettura a benzina, segmento small, Euro 5 ed iniezione diretta. (Fonte: [www.emisia.com](http://www.emisia.com)).

In Figura 8 è osservabile, a titolo esemplificativo, l'andamento della funzione di emissione, presente nel modello Copert, del monossido di carbonio per la categoria delle autovetture a benzina, segmento small, Euro standard 5 e ad iniezione diretta.

Secondo una differente logica viene effettuata la stima delle emissioni degli inquinanti dipendenti dal consumo di combustibile: le emissioni di anidride carbonica, anidride solforosa e metalli pesanti generate dal settore del trasporto stradale sono calcolate a partire dai dati di consumo di benzina, diesel, GPL, GNC e dalla loro composizione

chimica. In Italia, i dati del consumo di combustibile da trasporto su strada sono resi noti nel Bilancio Energetico Nazionale, pubblicato annualmente dal Ministero dello sviluppo economico, mentre l'analisi chimica dei combustibili venduti in Italia, a partire dal 2012, è invece un'attività commissionata alla Stazione Sperimentale dei Combustibili di Innovhub-SSI (ISPRA, *Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2017, 2019*).

Ai fini del calcolo delle emissioni di CO<sub>2</sub>, nota la composizione chimica ed indicando con c, h e o le frazioni di massa degli atomi di carbonio, idrogeno e ossigeno (con c+h+o = 1), i rapporti tra idrogeno e carbonio e tra ossigeno e carbonio nel combustibile sono calcolati come:

$$r_{H:C} = 11,916 \frac{h}{c}$$

$$r_{O:C} = 0,7507 \frac{o}{c}$$

Le emissioni di CO<sub>2</sub> [kg] generate dai veicoli alimentati a carburante m e dotati di tecnologia k, sono calcolate come segue:

$$E_{CO_2,k,m}^{CALC} = 44,011 \times \frac{FC_{k,m}^{CALC}}{12,011 + 1,008 r_{H:C,m} + 16,000 r_{O:C,m}}$$

dove,

$FC_{k,m}^{CALC}$  = consumo di combustibile [kg] m per i veicoli di tecnologia k

Quando si calcolano le emissioni di CO<sub>2</sub>, solo i consumi di combustibili fossili sono da prendere in considerazione nel calcolo: in accordo con le linee guida dell'IPCC del 2006, le emissioni associate all'utilizzo di biocombustibili, eventualmente presenti in piccole frazioni all'interno dei combustibili tradizionali, sono da attribuire al settore *Land Use, Land-Use Change and Forestry* (LULUCF).

Quindi, l'equazione precedente è corretta dalla seguente:

$$E_{CO_2,k,m}^{CORR} = E_{CO_2,k,m}^{CALC} \times \frac{FC_m^{STAT,FOSSILE}}{\sum_k FC_{k,m}^{CALC}}$$

dove,

$FC_m^{STAT,FOSSILE}$  = consumo della frazione fossile [kg] del combustibile m

Un ulteriore produzione di CO<sub>2</sub> deriva dal consumo dell'olio lubrificante del motore. Il sottile strato di olio presente sulle pareti interne dei cilindri è infatti esposto a combustione ed è bruciato insieme al combustibile. La guida EMEP/EEA del 2016 fornisce i fattori di consumo dell'olio motore in kg/10000 km per le diverse categorie di veicoli, con distinzioni sulla base del combustibile e dell'età dei veicoli stessi. L'equazione implementata nel modello Copert per il calcolo dell'emissione di CO<sub>2</sub> da combustione dell'olio motore è la medesima vista per  $E_{CO_2,k,m}^{CALC}$ , dove al numeratore trova posto il fattore di consumo dell'olio al posto di  $FC_{k,m}^{CALC}$  e al denominatore sono considerati dei valori tipici di  $r_{H:C}$  pari a 2,08 e di  $r_{O:C}$  pari a 0. Il risultato ottenuto è quindi espresso come kgCO<sub>2</sub>/10000 km (EMEP/EEA, 2016).

Un ultimo contributo considerato nel modello Copert per il calcolo dell'emissione di CO<sub>2</sub> deriva dall'utilizzo di soluzioni acquose di urea per il controllo delle emissioni di NO<sub>x</sub>: noto il quantitativo totale di soluzioni commerciali di urea vendute [UC, espresso in litri], l'emissione totale di CO<sub>2</sub> [in kg] generata dall'utilizzo di additivi è calcolata come segue:

$$E_{CO_2,urea} = 0,26 \times UC$$

in cui il coefficiente 0,26 [kgCO<sub>2</sub>/l<sub>soluzione urea</sub>] tiene in considerazione la densità della soluzione di urea, il peso molecolare di CO<sub>2</sub> ed urea e il contenuto di urea all'interno della soluzione (EMEP/EEA, 2016).

Il calcolo delle emissioni di anidride solforosa si basa sull'ipotesi che tutto lo zolfo contenuto nel combustibile e nell'olio lubrificante sia completamente trasformato in SO<sub>2</sub>. L'equazione implementata nel modello Copert è la seguente (EMEP/EEA, 2016):

$$E = 2 \times k_{S,m} \times FC_{k,m}^{CALC} + 2 \times k_{S,l} \times LC_{k,l}^{CALC}$$

dove,

$E$  = emissione di SO<sub>2</sub> [kg]

$k_{S,m}$  = peso relativo del contenuto di zolfo nel combustibile di tipo m [kgS/kg<sub>combustibile</sub>]

$FC_{k,m}^{CALC}$  = consumo di combustibile [kg] m per i veicoli di tecnologia k

$k_{S,l}$  = peso relativo del contenuto di zolfo nel lubrificante di tipo l [kgS/kg<sub>lubrificante</sub>]

$LC_{k,l}^{CALC}$  = consumo di lubrificante [in massa] l per i veicoli di tecnologia k

Per ciò che riguarda le emissioni di metalli pesanti, ISPRA utilizza valori di default presenti nel modello Copert che esprimono il contenuto di metalli nei diversi combustibili. L'equazione implementata nel modello per il calcolarne l'emissione è la seguente (EMEP/EEA, 2016):

$$E_{i,k}^{CALC} = k_{i,m} \times FC_{k,m}^{CALC}$$

dove,

$E_{i,k}^{CALC}$  = emissione [mg] del metallo pesante i

$k_{i,m}$  = peso relativo del contenuto del metallo pesante i nel combustibile di tipo m  
[mg/kg<sub>combustibile</sub>]

Le emissioni complessive di CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e metalli pesanti sono poi stimate nel dettaglio, da parte di ISPRA, per ogni categoria di veicolo grazie ai fattori di consumo di carburante [g<sub>combustibile</sub>/km] ottenuti dalle funzioni di emissione del modello Copert (*Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2017, 2019*).

## 1.4 GRUPPO ERMES

Il gruppo ERMES (*European Research Group on Mobile Emission Sources*) è stato creato nel 2009 con l'intento di realizzare, sotto la coordinazione del Joint Research Centre (JRC) della Commissione Europea, un network europeo in grado di collegare i gruppi al lavoro sui modelli e sugli inventari delle emissioni da trasporto con altri portatori di interesse del settore ([www.ermes-group.eu](http://www.ermes-group.eu)). L'obiettivo del Gruppo ERMES è quello di diventare un network permanente per i modellisti delle emissioni da trasporto e per gli utilizzatori dei modelli, di coordinare ricerche e sperimentazioni per lo sviluppo degli inventari di emissioni da trasporto in Europa e dei modelli di emissioni veicolari e di affermarsi come punto di riferimento della modellizzazione delle emissioni mobili incrementando i propri contatti internazionali (Franco et al., 2012).

Il gruppo ERMES è caratterizzato da una struttura a 3 livelli (Figura 9):

- A. Un consiglio di amministrazione composto da 7 persone che ha il compito di stilare il programma e i metodi di lavoro e di monitorare i progressi del gruppo;
- B. Un gruppo di lavoro che si occupa dello sviluppo dei modelli e dell'aggiornamento dei fattori di emissione che include il JRC, gli stati membri, laboratori ed esperti nazionali;
- C. Un ampio gruppo di contatti, che ha il compito di revisionare i fattori di emissioni, di finanziare ricerche future e di stilare report riguardo particolari argomenti, a cui appartiene l'Agenzia Europea dell'Ambiente, rilevanti direzioni generali della Commissione Europea, industrie ed altre parti interessate

(Franco et al., 2012).

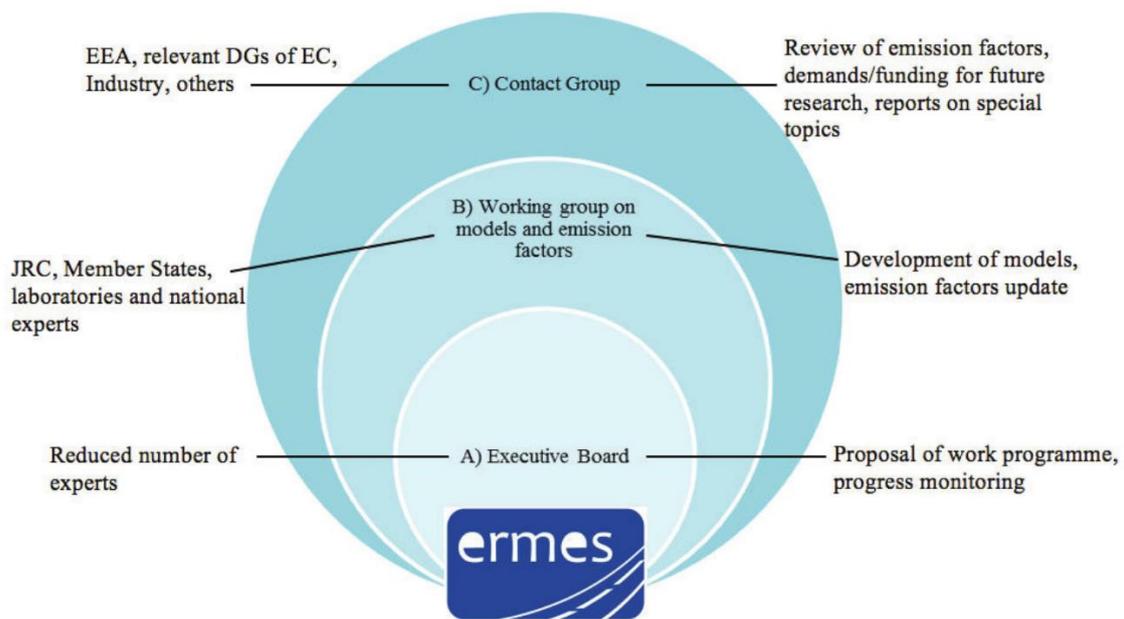


Figura 9 - Struttura a 3 livelli del gruppo ERMES. (Fonte: Franco et al., 2012).

Il gruppo ERMES collabora allo sviluppo dei due principali modelli europei di emissioni da trasporto stradale: il Copert e l'HBEFA (*Handbook of Emission Factors for Road Transport*). Mentre il Copert, come detto, è il principale modello utilizzato dagli stati membri dell'EEA per la realizzazione degli inventari nazionali delle emissioni in atmosfera generate da trasporto stradale e correla i fattori di emissione alla velocità media, l'HBEFA è un modello utilizzato a scala spaziale inferiore (può essere applicato anche alla singola strada) che implica la conoscenza di informazioni riguardo la situazione di traffico del tratto stradale considerato ed è principalmente impiegato in Paesi quali Germania, Austria, Svizzera, Paesi Bassi e Svezia (Franco et al., 2012). I fattori di emissione di inquinanti regolamentati e non, di CO<sub>2</sub> e i consumi di combustibile presenti per ogni categoria di veicolo all'interno del modello HBEFA sono infatti differenziati sulla base di una grande varietà di situazioni di traffico e permettono quindi la stima delle emissioni prodotte dai veicoli circolanti su un tratto stradale in una specifica condizione di circolazione ([www.hbefa.net](http://www.hbefa.net)).

Per il periodico aggiornamento dei database dei fattori di emissione dei modelli Copert e HBEFA, è di fondamentale importanza il contributo dei laboratori che trattano il campo

delle emissioni autoveicolari: condividendo, per mezzo di appositi file Excel, i risultati e le informazioni utili dei test emissivi eseguiti sui veicoli, i laboratori collaborano all'aggiornamento del database del gruppo ERMES e, di conseguenza, anche a quello dei modelli di calcolo delle emissioni autoveicolari ([www.ermes-group.eu](http://www.ermes-group.eu)).

Il gruppo ERMES ha inoltre sviluppato un ciclo di guida sperimentale per i test di emissione in laboratorio: il ciclo ERMES riportato in Figura 10. Questo ciclo, dotato di rampe da affrontare a massima accelerazione, permette di coprire ottimamente la mappa emissiva del motore dei veicoli.

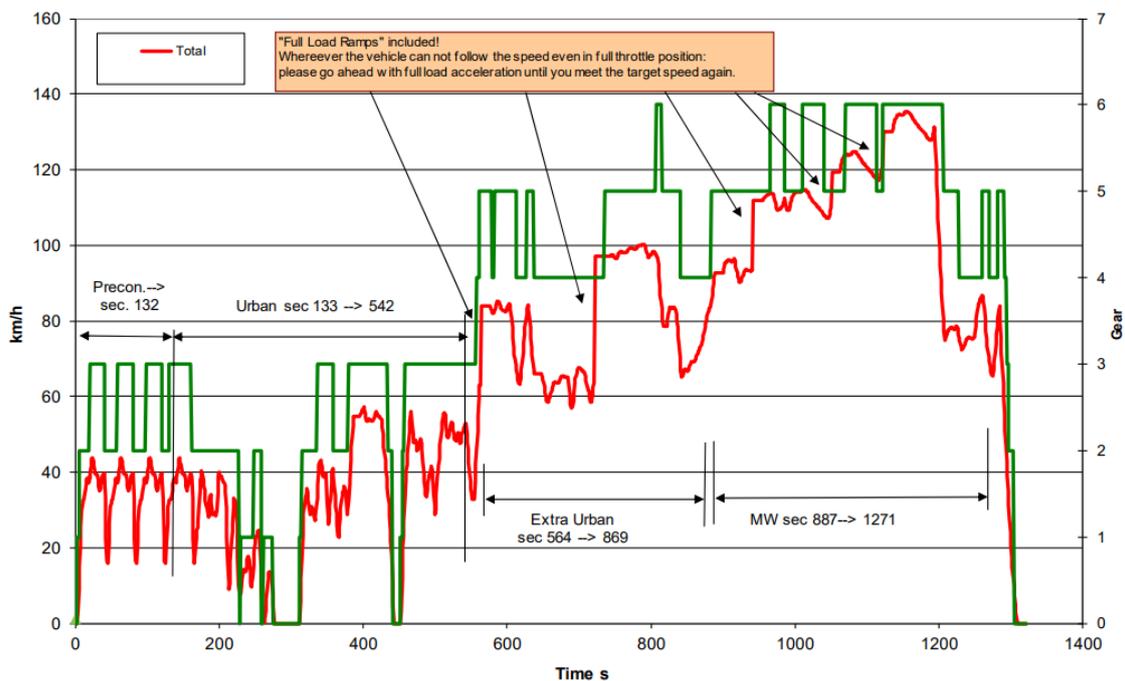


Figura 10 - Ciclo di guida ERMES. (Fonte: Keller, 2017).

## 2. TAVOLO DELLA MOBILITÀ SOSTENIBILE

---

A Giugno 2016 è stato istituito, su iniziativa della Presidenza del Consiglio dei Ministri, un Tavolo Tecnico finalizzato a raccogliere e analizzare il punto di vista di diversi portatori di interesse del settore della mobilità e ad intraprendere una prima discussione sul tema dello sviluppo sostenibile. Al tavolo di lavoro, denominato Tavolo della mobilità sostenibile, hanno partecipato i principali stakeholder del settore della mobilità (costruttori, fornitori di servizi), associazioni ambientaliste e di consumatori, rappresentanti delle amministrazioni pubbliche centrali e locali e istituzioni di ricerca (MATTM, 2017).

Nel corso del Tavolo Tecnico, durante la trattazione del tema degli effetti sulla salute umana provocati dal settore della mobilità, ISPRA ha presentato il contributo emissivo delle diverse tecnologie del trasporto su strada ai principali inquinanti atmosferici. In particolare, sono stati mostrati i fattori di emissione delle autovetture Euro 5 della classe “small” (con motori < 1,4 l) utilizzati nel modello Copert per la realizzazione dell’inventario nazionale delle emissioni in atmosfera del 2016.

ISPRA ha presentato i grafici riportati nelle Figure 11-15, raffiguranti i fattori di emissione di monossido di carbonio, ossidi di azoto, composti organici volatili non metanici, particolato e anidride carbonica sotto forma di confronto tra le autovetture a benzina, diesel, GPL, gas naturale ed elettriche.

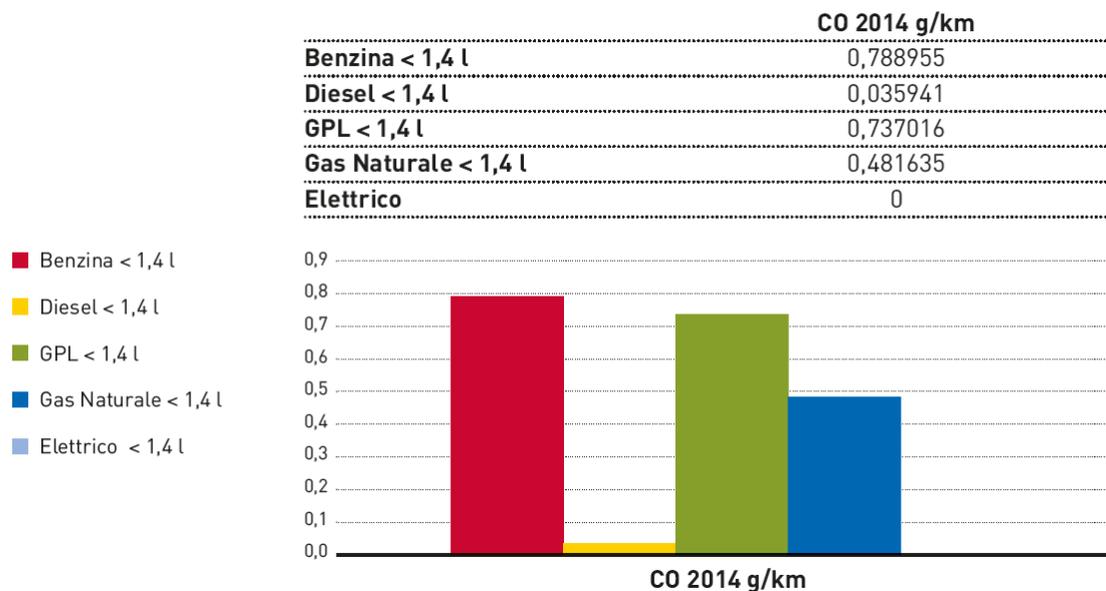


Figura 11 - Fattori di emissione di CO allo scarico, suddivise per combustibile. (Fonte: MATTM, 2017).

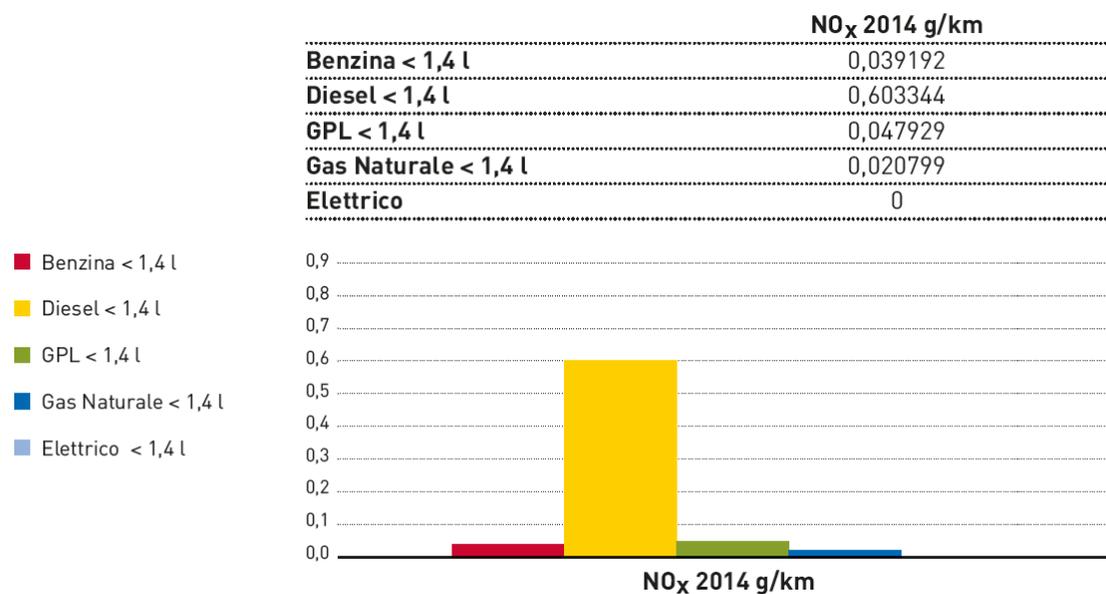


Figura 12 - Fattori di emissione di ossidi di azoto allo scarico, suddivise per combustibile. (Fonte: MATTM, 2017).

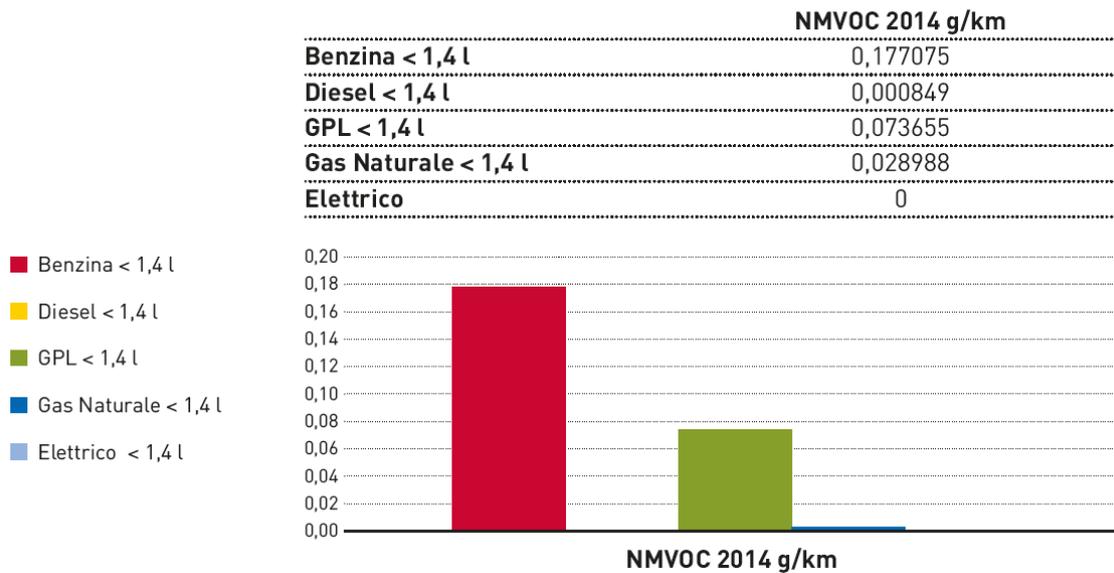


Figura 13 - Fattori di emissione di composti organici volatili non metanici allo scarico, suddivise per combustibile. (Fonte: MATTM, 2017).

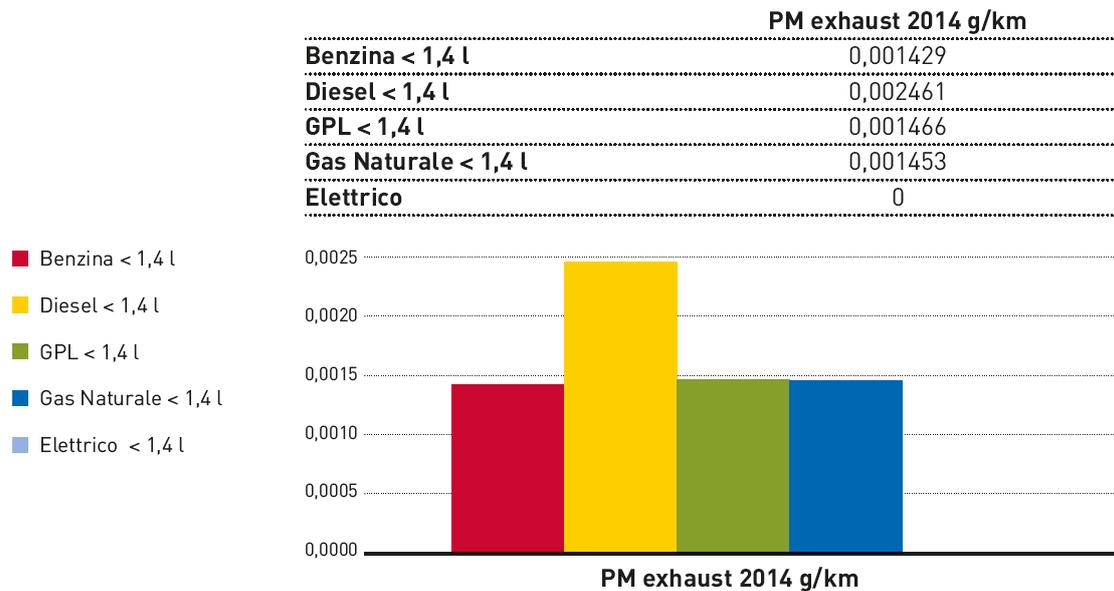


Figura 14 - Fattori di emissione di particolato allo scarico, suddivise per combustibile. (Fonte: MATTM, 2017).

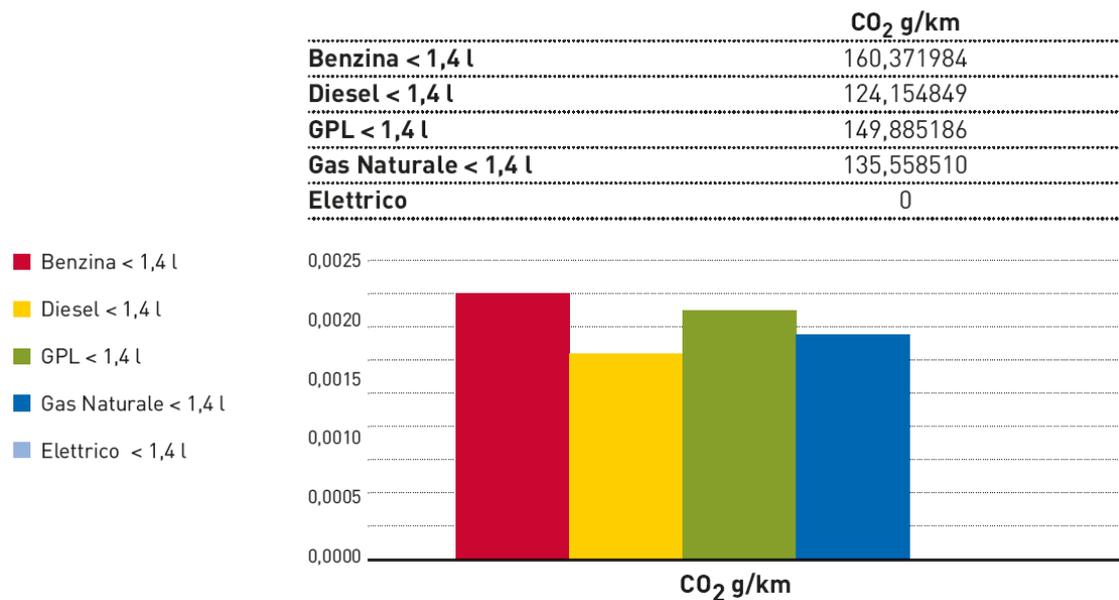


Figura 15 - Fattori di emissione di CO<sub>2</sub> allo scarico, suddivise per combustibile. (Fonte: MATTM, 2017).

A seguito della presentazione di tali dati da parte di ISPRA, la società Assogasliquidi Federchimica, associazione industriale italiana che promuove l'uso di GPL in qualità di combustibile per le autovetture e presente al Tavolo della mobilità sostenibile, ha evidenziato una mancanza di fattori di emissione aggiornati per quanto riguarda le autovetture con alimentazione a GPL.

Ad eccezione della CO<sub>2</sub>, per la quale ISPRA ha presentato il valore del fattore di emissione risultante al ciclo di omologazione per il parco veicolare italiano di autovetture GPL Euro 5, i fattori di emissione di CO, NO<sub>x</sub>, NMVOC e PM allo scarico non risultavano essere adeguatamente aggiornati alle effettive emissioni delle autovetture GPL Euro 5.

ISPRA infatti, non avendo a disposizione fattori di emissione "country specific" riguardo le autovetture GPL Euro 5 ed Euro 6, ha utilizzato, per la realizzazione dell'inventario nazionale italiano delle emissioni in atmosfera del 2016, i fattori di emissione ottenuti dalle funzioni di emissione presenti nel modello Copert.

Assogasliquidi Federchimica ha quindi commissionato al Laboratorio Emissioni Autoveicolari (LEA) del Laboratorio Emissioni di Innovhub-SSI, una serie di prove

sperimentali super partes per rilevare le emissioni allo scarico regolamentate e non regolamentate e il consumo di combustibile su una flotta di autovetture bifuel GPL/benzina Euro 6 b e c di piccola e media cilindrata, che costituiscono la quota preponderante ( $\approx 98\%$  nel 2017) rispetto al totale delle autovetture GPL circolanti in Italia (MIT, 2017-2018). I test avevano lo scopo di confrontare le emissioni e i consumi di combustibile tra l'alimentazione a benzina e quella a GPL e di determinare i fattori di emissione, carenti nella letteratura tecnico-scientifica, di numerosi inquinanti e gas ad effetto serra da moderne auto bifuel GPL/benzina.

## 3. MATERIALI E METODI

---

### 3.1 PROTOCOLLO

I test di emissione allo scarico sulle autovetture bifuel benzina/GPL Euro 6 b e c sono stati eseguiti dal Laboratorio Emissioni Autoveicolari di Innovhub-SSI nel rispetto di un protocollo concordato e condiviso con Assogasliquidi Federchimica, con ISPRA e con il gruppoERMES. Tutti i veicoli sono stati testati sia con alimentazione a benzina che con quella a GPL seguendo, per quanto più tecnicamente possibile, le linee guida riportate nel documento *“Proposal for test description for cars and LCV for chassis dyno tests and RDE tests as basis for emission factors”* (Matzer C. e Rexeis M. *Institute of Internal Combustion Engines and Thermodynamics, Graz University of Technology*), che riflette le procedure che erano in via di definizione per l'imminente entrata in vigore del Regolamento UE 1151/2017.

Il protocollo stabilito prevedeva l'esecuzione di test di emissione allo scarico su 5 autovetture bifuel benzina/GPL omologate secondo standard Euro 6:

- N° 2 autovetture di piccola cilindrata (segmento *small*, < 1400 cc);
- N° 3 autovetture di media cilindrata (segmento *medium*, 1400 < cc < 2000).

I test in laboratorio avevano l'obiettivo di determinare le emissioni di:

- Inquinanti gassosi regolamentati: CO, THC, NO<sub>x</sub> e NMHC;
- Particolato in massa e in numero di: PM e PN;
- Particolato non regolamentato: frazione carboniosa, distribuzione di particelle comprese le frazioni ultra-fini e le nanoparticelle;
- Sostanze gassose non regolamentate: NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>, benzene, formaldeide, 1,3 butadiene;
- CO<sub>2</sub> e consumo di combustibile, calcolate attraverso il metodo del bilancio del carbonio.

I test su strada avevano l'obiettivo di determinare le emissioni di:

- Inquinanti gassosi: CO, THC, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>;

- Particolato in numero: PN;
- CO<sub>2</sub> e consumo di combustibile.

I combustibili utilizzati dovevano essere caratterizzati analiticamente in modo da verificarne la conformità con le specifiche europee:

- EN 228 per le benzine;
- EN 589 per i GPL.

Ogni veicolo doveva essere testato sia con l'alimentazione a benzina che con quella a GPL e per ognuna di esse erano previsti i seguenti cicli di guida:

- NEDC (con partenza a freddo) + ERMES (con partenza a caldo, eseguito immediatamente dopo il NEDC). Test ripetuto fino al raggiungimento di 3 prove con una buona ripetibilità (coefficiente di variazione < 5% sui principali parametri e prossimo al 2% per la CO<sub>2</sub>);
- N° 1 WLTC (con partenza a freddo);
- N° 2 RDE con PEMS.

### 3.2 VEICOLI

I nomi dei modelli delle autovetture e delle rispettive case costruttrici sono stati anonimizzati su richiesta del committente. Ad ogni veicolo è stato quindi assegnato un codice identificativo da 1 a 5.

Nella Tabella 8 sono riassunte le principali caratteristiche di ogni autovettura oggetto di test, selezionata e consegnata al Laboratorio Emissioni Autoveicolari ad opera di diversi associati del committente, tra i principali costruttori di impianti per veicoli bi-fuel benzina/GPL.

Codice veicolo	1	2	3	4	5
Standard Euro	<b>Euro 6b</b>	<b>Euro 6b</b>	<b>Euro 6b</b>	<b>Euro 6b</b>	<b>Euro 6c</b>
Chilometraggio all'avvio dei test [km]	6780	1966	6650	2000	1984
Cilindrata del motore [cc]	1248	1598	1197	1590	1598
Massa in fase di test [kg]	1130	1355	1165	1470	1370
N° cilindri / N° valvole/cil	4	4	4	4	4
N° marce	5	5	5	5	5
Max potenza [kW]	63 @ 6000 rpm	115 @ 6000 rpm	66 @ 4800 rpm	86 @ 6000 rpm	75 @ 5500
Max coppia [Nm]	120 @ 4000 rpm	155 @ 3900 rpm	160 @ 1400 rpm	154 @ 4000	156 @ 4000
Trazione	Anteriore	Anteriore	Anteriore	Anteriore	Anteriore
Sistema di iniezione	Positiva indiretta PFI	Positiva indiretta PFI	Positiva diretta GDI	Positiva indiretta PFI	Positiva indiretta PFI
Tecnologia trattamento emissioni	Catalizzatore a 3 vie	Catalizzatore a 3 vie	Catalizzatore a 3 vie	Catalizzatore a 3 vie	Catalizzatore a 3 vie
Impianto GPL	Retrofit	Retrofit	Retrofit	OEM	OEM

Tabella 8 - Principali caratteristiche delle autovetture testate.

Nella Tabella 8 la sigla "OEM" (*Original Equipment Manufacturer*) indica un impianto GPL montato in origine direttamente dalla casa costruttrice, mentre il termine "Retrofit" identifica un impianto GPL installato post-vendita.

### 3.3 COMBUSTIBILI

Al momento della consegna delle autovetture presso il Laboratorio Emissioni Autoveicolari, il GPL impiegato come combustibile per l'esecuzione dei test si trovava già all'interno del serbatoio dei veicoli, mentre la benzina è stata acquistata presso una stazione di rifornimento.

Per poter effettuare la caratterizzazione analitica dei combustibili, il cliente ha fornito al LEA un campione di ogni GPL già presente nei serbatoi delle autovetture, mentre per ogni benzina il personale del laboratorio ha prelevato un campione direttamente alla stazione di rifornimento. Dalle analisi chimico fisiche, sia i campioni di benzina che quelli di GPL sono risultati conformi, rispettivamente, agli standard UNI EN 228 e UNI EN 589 vigenti al momento dell'esecuzione dei test.

Nella Tabella 9 sono riassunte le principali caratteristiche dei combustibili utilizzati per ogni autovettura. Le benzine presentano caratteristiche sostanzialmente analoghe, tanto in termini di densità quanto di numero di ottano; al contrario, i GPL presentano caratteristiche molto diversificate in termini di composizione percentuale della miscela di propano, propilene, i-butano e n-butano. Questa diversificazione, che ben rappresenta la reale variabilità della composizione del GPL commerciale presente alle stazioni di rifornimento, non ha comunque determinato differenze significative nelle emissioni rilevate.

Codice veicolo	Benzina		GPL					
	Densità [kg/l]	N° di ottano	Densità [kg/l]	PCI [MJ/kg]	Propano [% m/m]	Propilene [% m/m]	i-Butano [% m/m]	n-Butano [% m/m]
1	0,7465	95,5	0,5598	45,730	10,6	11,0	31,5	43,3
2	0,7465	95,5	0,5187	46,091	58,8	26,0	7,0	5,9
3	0,7465	95,5	0,5435	45,834	33,6	14,3	19,2	19,9
4	0,7480	95,4	0,5555	45,764	16,6	11,0	27,7	40,0
5	0,7407	95,1	0,5070	46,344	96,8	0,4	1,1	0,8

Tabella 9 - Principali caratteristiche dei combustibili utilizzati per i test.

### 3.4 PROVE DI LABORATORIO

I test di emissione allo scarico in laboratorio sono stati eseguiti su un banco dinamometrico a rulli posto all'interno di una sala opportunamente climatizzata, dove un apposito condizionatore permette il mantenimento delle condizioni previste dalla normativa UE 1151/2017:

- Temperatura =  $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante la prova ( $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  per il periodo di condizionamento, della durata minima di 6 ore, che precede la prova);
- Umidità =  $5,5 \leq H \leq 12,2$  [ $\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{aria secca}}$ ].

Inoltre, una stazione meteorologica collocata all'interno della sala emissioni monitora costantemente i valori di temperatura, umidità e pressione.

La prima operazione, effettuata per ogni veicolo testato, è stata quella di allestire l'autovettura in sala emissioni.

Le ruote anteriori sono state adeguatamente collocate sul banco dinamometrico, mentre quelle posteriori sono state immobilizzate per mezzo di cinghie e fermi metallici avvitati a terra in apposite guide (Figura 16).



*Figura 16 - Blocchi con cinghia che immobilizzano le ruote non motrici a terra.*

In seguito è stata effettuata la connessione tra il tubo di scappamento e quello di raccordo per i gas di scarico per mezzo di specifici nastri isolanti resistenti alle alte temperature. Al tubo di raccordo lungo circa 40 cm (seguito da un tubo "anaconda" di collegamento all'impianto di diluzione e campionamento, tubo lungo circa 6 m isolato termicamente e portato, prima dell'inizio di ogni prova, a temperatura di  $130^{\circ}\text{C}$  da un

sistema riscaldante per evitare fenomeni di condensa di idrocarburi sulle pareti del tubo stesso) è stato poi collegato l'analizzatore di anidride carbonica allo scarico, la sonda dello spettrofotometro a trasformata di Fourier e la termocoppia per il monitoraggio della temperatura del gas di scarico (Figura 17).



*Figura 17 - Connessione tra il tubo di scappamento dell'autovettura e il tubo di raccordo del gas di scarico.*

Successivamente è stato installato nel vano motore un sensore acustico per il rilevamento dei giri motore ed una termocoppia per la misura della temperatura all'interno della coppa dell'olio.

Anteriormente all'autovettura è stata poi posizionata la ventola di raffreddamento a velocità variabile (Figura 18). Questa soffiante, posta frontalmente al veicolo ad una distanza di circa 30 cm, è in grado di generare una corrente d'aria ad una velocità pari a quella simulata dai rulli, come richiesto dalla normativa per evitare fenomeni di surriscaldamento del motore e simularne le dinamiche termiche in condizioni più simili possibili a quelle effettive su strada



Figura 18 - Ventola di raffreddamento.

Infine la pressione delle gomme anteriori è stata maggiorata di un valore compreso tra il 30% e il 50% della pressione nominale dichiarata dalla casa costruttrice (come consentito dalla normativa in caso di testing su banco bi-rullo per mitigare le perdite di attrito dovute al doppio contatto ruota/rullo) e sul parabrezza è stato posizionato, per mezzo di apposite ventose, il display su cui il guidatore visualizza il tracciato del ciclo nel corso della prova (Figura 19).

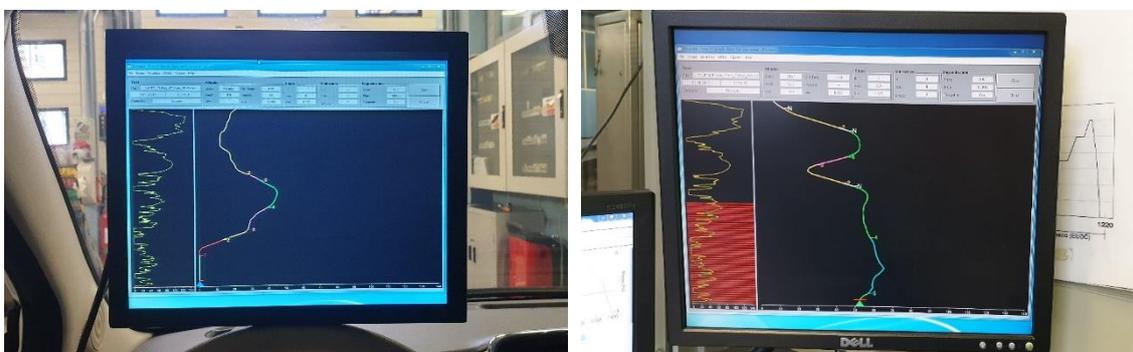


Figura 19 - Tracciato del ciclo visualizzato, nel corso di una prova WLTC, dal display posizionato sul parabrezza del veicolo (a sinistra) e dal display in plancia di comando (a destra).

Le emissioni allo scarico non regolamentate sono state misurate (tramite analizzatore FT-IR) prelevando in continuo una seconda aliquota di gas di scarico immediatamente dopo il punto di prelievo dell'analizzatore della CO<sub>2</sub> grezza (Figura 2).

Le emissioni allo scarico regolamentate sono invece state determinate previa diluizione del gas di scarico tramite un sistema CVS-CFV (*Constant Volume Sampler – Critical Flow*

*Venturi*): un motore di aspirazione, a valle del quale è posto un venturi a flusso critico (CFV), determina all'interno del tunnel di diluizione (CVS, Figura 20) un fronte di avanzamento omogeneo turbolento dell'emissione diluita con aria ambiente filtrata tramite filtri HEPA (*High Efficiency Particulate Air filter*). Per ogni fase del ciclo di guida, il sistema di campionamento ha raccolto separatamente, in coppie di sacchi di Tedlar, aliquote costanti di aria di diluizione e di gas di scarico diluito prelevato dal tunnel di diluizione. Al termine del test, gli analizzatori hanno misurato le concentrazioni delle specie regolamentate sia all'interno dei sacchi di aria sia in quelli contenenti il gas diluito campionato.

Gli strumenti di misurazione del numero di particelle hanno analizzato in continuo, durante tutti i cicli di guida, un'aliquota di gas diluito prelevato direttamente dalla mezzeria del tunnel di diluizione.

Il particolato in massa è stato campionato su un unico filtro per ogni ciclo di guida effettuato, così come previsto da protocollo PMP (*Particulate Measurement Programme*) (JRC, 2007).



Figura 20 - Tunnel di diluizione.

### 3.4.1 Strumentazione

La strumentazione utilizzata per eseguire i test in laboratorio è la seguente:

- Soffiante di raffreddamento a velocità variabile (Figura 3);
- Termocoppie per il monitoraggio della temperatura dell'olio motore e del gas di scarico (NI-USB 9211);
- Software Driver-aid (AVL305) per la visualizzazione del ciclo di guida (Figura 4);
- Campionatore a volume costante con tunnel di diluizione (API-COM, Figura 5);
- Sistema automatico per l'esecuzione del test e l'acquisizione dei dati (AVLi4L);
- Banco dinamometrico a rulli (BOSCH) con simulazione elettronica computerizzata di frenatura ed inerzia (software Winroll, API-COM, Figura 21)



Figura 21 - Software Winroll di gestione del banco dinamometrico a rulli.

- Sistema di misurazione delle specie regolamentate (AMAi60 AVL, Figura 22) composto da:
  - Un rilevatore di chemiluminescenza (CLD-Chemiluminescence Detector) utilizzato per la misura degli ossidi di azoto ( $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ ). Il principio di misura del CLD si basa sull'emissione di luce prodotta dalle molecole

eccitate di NO<sub>2</sub> nel momento in cui ritornano ad un livello energetico inferiore. Un tubo fotomoltiplicatore è in grado di contare i fotoni prodotti, proporzionali al quantitativo di NO nel campione analizzato. Le molecole di NO<sub>2</sub> eccitate sono ottenute dalla reazione di NO con ozono, prodotto da una scarica effetto corona di ossigeno puro all'interno dell'analizzatore stesso. Per la determinazione della concentrazione di NO<sub>x</sub> nel campione, è necessaria l'iniziale conversione di NO<sub>2</sub> a NO per mezzo di un convertitore catalitico, anch'esso interno al CLD.

- Un rilevatore a ionizzazione di fiamma (*FID-Flame Ionization Detector*) utilizzato per la misura gascromatografica degli idrocarburi totali (THC). Il principio di misura del FID si basa sulla ionizzazione degli atomi di carbonio in una fiamma alimentata con una miscela di idrogeno (40%) ed elio (60%) che brucia all'interno di un campo elettrico. La fiamma è infatti in grado di rompere e ionizzare gli idrocarburi e gli ioni producono una corrente all'interno del campo elettrico che è direttamente proporzionale al numero di atomi di carbonio presenti all'interno del campione analizzato. La corrente è elettricamente convertita in un voltaggio misurato dallo strumento. Il FID possiede inoltre un secondo canale analizzatore per la misura del solo metano che implica la precedente conversione di tutti gli idrocarburi, ad eccezione del CH<sub>4</sub>, in CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O.
- Due rilevatori ad infrarossi (*IRD-Infrared Detector*) utilizzati per la misura di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e di monossido di carbonio (CO). Il principio di misura del IRD si basa sul processo di assorbimento non dispersivo della banda spettrale a lunghezza d'onda compresa tra 2 e 12 μm (radiazione infrarossa). L'analizzatore è formato da una sorgente di radiazione infrarossa, una ruota di modulazione periodica del segnale, una cella di campionamento dove passa il gas da analizzare, un filtro ottico che assorbe tutta la banda spettrale eccetto le lunghezze d'onda assorbite dalla CO e dalla CO<sub>2</sub> e un fotometro che misura la radiazione IR.

La cella di campionamento a sua volta consiste in un tubo diviso in due sezioni: una in cui passa il campione di gas da analizzare ed un'altra con un gas di riferimento. Quando la radiazione infrarossa passa attraverso la cella di campionamento, nella sezione dove è presente il gas da analizzare viene parzialmente assorbita dalle molecole di CO<sub>2</sub> e CO, mentre nella sezione con il gas di riferimento tutta la radiazione IR raggiunge il fotometro. La differenza tra il quantitativo di radiazione infrarossa che raggiunge il fotometro attraverso le due sezioni della cella (direttamente proporzionale alla concentrazione di CO e CO<sub>2</sub>) viene infine trasformata in un segnale elettrico e successivamente in un valore di concentrazione.



Figura 22 - AVL AMAi60

Tutti gli analizzatori dell'AMAi60, prima di ogni test, sono stati accuratamente calibrati facendo flussare gas (chiamati *gas di span*) di concentrazioni note (per

fissare un punto di “misura” noto, come riferimento) e azoto puro (per fissare il punto di “zero” noto, come riferimento) all’interno degli analizzatori.

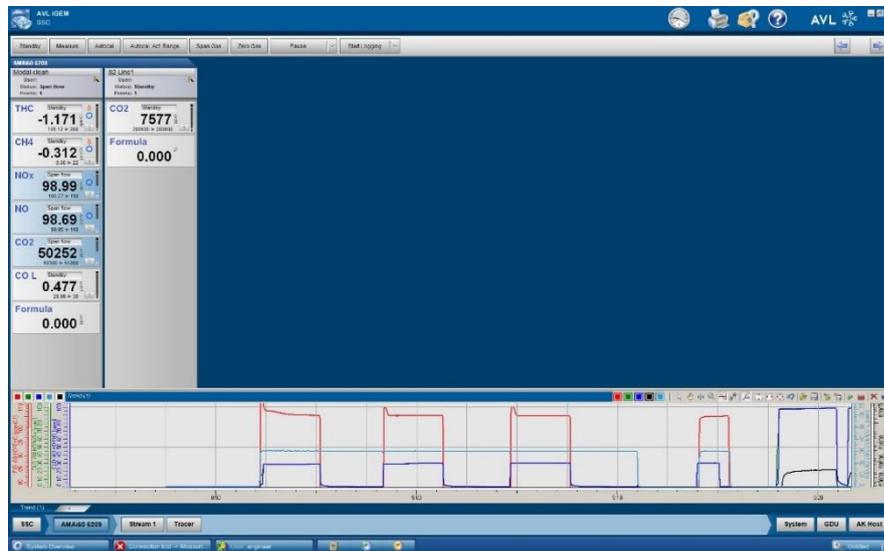


Figura 23 - Span di calibrazione dell'AMAi60



Figura 24 - Bombole di calibrazione con gas certificati.

- Sistema di campionamento della massa di particolato (Figura 25). Un campionatore a controllo elettronico della portata preleva un'aliquota dei gas di scarico diluiti dal tunnel di diluizione e la filtra per mezzo di un filtro Pallflex T60A20 realizzato in fibra di vetro borosilicato ( $\varnothing = 47$  mm). Prima dell'utilizzo il filtro viene preventivamente condizionato per circa 24 h e pesato. Dopo l'utilizzo il filtro viene nuovamente condizionato per 24 h prima della pesatura finale per la determinazione, per differenza, della massa del particolato campionato.



*Figura 25 - Sistema di campionamento del particolato su filtro.*

- Bilancia per la pesatura dei filtri con sensibilità fino a  $10^{-7}$  g (Figura 26). Con lo scopo di garantire la massima precisione nella misura, la bilancia si trova all'interno di una camera climatica mantenuta in condizioni stabili: a 25°C di temperatura e al 50% di umidità. Questa struttura, a sua volta, è collocata all'interno di una stanza climatizzata alle medesime condizioni.



*Figura 26 - Bilancia di precisione all'interno di una struttura climatizzata.*

- Sistema di campionamento del numero totale di particelle (PN) secondo protocollo PMP (*Particle Measurement Programme*) tramite DEED (*Dekati Engine Exhaust Diluter*, Figura 27) e CPC (TSI-*Condensation Particle Counter*, Figura 28):
  - Il DEED è formato da due sistemi di diluizione e da una camera di evaporazione. Il campione di gas da analizzare entra nel primo sistema di diluizione (mantenuto ad una temperatura maggiore di 150°C) e viene diluito con rapporto di circa 1:10, dopodiché raggiunge la camera di evaporazione dove, a causa dell'alta temperatura (> 350°C), tutte le particelle volatili evaporano dal campione. Avviene infine il passaggio in una seconda camera di diluizione che, operando a temperatura ambiente, raffredda il campione e lo diluisce ulteriormente sempre con un rapporto di 1:10.
  - Il CPC riceve in ingresso il flusso pre-condizionato dal DEED e ne forza il passaggio attraverso una prima sezione in cui un saturatore riscaldato vaporizza e diffonde una soluzione di butanolo all'interno del flusso stesso. Successivamente avviene il passaggio in un condensatore, dove le particelle solide del flusso fungono da nuclei di condensazione per il butanolo. Il particolato raggiunge quindi dimensioni tali da essere facilmente rilevato e contato per mezzo di un sensore ottico. Il CPC misura concentrazioni di particelle fino a  $10^4 \text{ \#/cm}^3$ , con un  $D_{50}$  (diametro delle particelle tale per cui l'efficienza di conteggio dello strumento è pari al 50%) pari a  $23 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ .

Il flusso analizzato dal sistema PMP, proveniente dal punto di campionamento posto all'interno del tunnel di diluizione, prima di giungere al DEED passa attraverso un ciclone che ha lo scopo di eliminare tutte le particelle di dimensioni maggiori di  $2,5 \mu\text{m}$ .



Figura 27 - DEED (in basso) e CPC (in alto).



Figura 28 - CPC con soluzione di butanolo.

- ELPI (Dekati-*Electrical Low Pressure Impactor*, Figura 29), utilizzato per misurare in tempo reale la distribuzione dimensionale e la concentrazione di particolato con diametro aerodinamico nell'intervallo dimensionale 0,007 – 10  $\mu\text{m}$ . Le particelle vengono prima caricate elettricamente attraverso una scarica effetto corona e poi classificate (in base alla loro dimensione) nell'impattore a bassa pressione. L'impattore è costituito da dodici stadi connessi individualmente ad un elettrometro che registra la corrente rilasciata dalle particelle cariche nell'impatto. Ogni stadio è definito da un diametro di taglio, che corrisponde alla dimensione delle particelle raccolte con un'efficienza del 50%, il cui valore è decrescente nella direzione del flusso analizzato (Tabella 10).

Stadio	Intervallo dimensionale particelle ( $\mu\text{m}$ ) $D_{50i} - D_{50i+1}$	Diametro aerodinamico medio ( $\mu\text{m}$ )
N. 1	0,007 – 0,024	0,0184
N. 2	0,024 – 0,031	0,0273
N. 3	0,031 – 0,050	0,0394
N. 4	0,050 – 0,098	0,0700
N. 5	0,098 – 0,213	0,1445
N. 6	0,213 – 0,318	0,2603
N. 7	0,318 – 0,579	0,4291
N. 8	0,579 – 0,895	0,7199
N. 9	0,895 – 1,515	1,1644
N.10	1,515 – 2,262	1,8512
N. 11	2,262 – 3,777	2,9229
N. 12	3,777 – 9,362	5,9465

Tabella 10 - Intervalli dimensionali e diametri aerodinamici medi corrispondenti ad ogni stadio dell'ELPI.

Il valore di corrente di ogni canale è direttamente proporzionale al numero di particelle raccolte e, di conseguenza, alla concentrazione di particelle in uno specifico intervallo dimensionale.



Figura 29 – Impattore elettrostatico a bassa pressione.

- EEPS (TSI-Engine Exhaust Particle Sizer, Figura 30), utilizzato per misurare il numero di particelle con diametro aerodinamico nell'intervallo 5,6 – 560 nm. Prima di essere trattato dall'EEPS, il flusso di gas da analizzare passa attraverso un ciclone che ha lo scopo di eliminare tutte le particelle più grandi di 1  $\mu\text{m}$ . L'ingresso del gas avviene poi nella parte superiore dello strumento, dove le particelle vengono caricate positivamente da una scarica effetto corona (l'EEPS è in grado di prevedere il livello di carica di ogni particella sulla base della dimensione della stessa). Le particelle caricate, sospinte verso il basso da un flusso di aria pulita filtrata tramite filtri HEPA, raggiungono la regione di misura dove è presente un campo elettrico: all'esterno sono presenti elettrodi di raccolta elettricamente isolati l'uno con l'altro e collegati ad un elettrometro, mentre all'interno si trova un elettrodo a cui è applicato un forte voltaggio positivo. Durante il passaggio attraverso questa sezione, le particelle cariche positivamente vengono respinte dall'elettrodo positivo e si dirigono verso gli elettrodi di raccolta. Le particelle più piccole vengono raccolte dagli elettrodi in alto, mentre quelle più grandi dagli elettrodi in basso. Quando le particelle si depositano sugli elettrodi trasferiscono su di essi la loro carica e l'elettrometro misura istantaneamente la corrente generata, direttamente proporzionale al numero di particelle depositate sull'elettrodo stesso.



Figura 30 - EEPS.

- MSS (AVL-Micro Soot Sensor, Figura 31) utilizzato per misurare la frazione carboniosa del particolato. Il principio di funzionamento di questo strumento si basa sul metodo di misura fotoacustico. L'MSS espone il flusso da analizzare ad una radiazione infrarossa modulata. Tale radiazione viene assorbita dalle particelle di "soot" causandone un periodico riscaldamento e raffreddamento e la risultante espansione e contrazione delle particelle che ne deriva produce un'onda sonora che viene registrata da un microfono ultrasensibile. Lo strumento converte infine tale informazione sotto forma di concentrazione in massa di soot.



Figura 31 - Micro Soot Sensor.

- FT-IR (Thermo Fisher-Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, Figura 32) utilizzato per misurare gli inquinanti gassosi non regolamentati:  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$ , benzene, formaldeide, 1,3 butadiene. Il principio di funzionamento dell'FT-IR si basa sulla spettrofotometria infrarossa. All'interno di questo strumento, il segnale infrarosso prodotto da una sorgente passa all'interno di un interferometro e ne esce sotto forma di interferogramma. Prima di ogni utilizzo dello strumento, è necessario acquisire l'interferogramma di riferimento, che rappresenta lo spettro IR (spettro di background) che raggiunge il sensore in assenza di campione. Durante l'analisi del campione, l'interferogramma misurato dal sensore viene modificato per via dell'assorbimento della radiazione IR da parte delle molecole contenute nel campione stesso. L'interferogramma misurato dal sensore viene digitalizzato e mandato al computer dove avviene la trasformata di Fourier, che permette di ottenere lo spettro infrarosso acquisito

nel dominio della frequenza. Lo strumento, sulla base del rapporto fra lo spettro misurato con il campione e quello di riferimento, è in grado di calcolare le concentrazioni delle specie di interesse.



*Figura 32 - Spettrofotometro infrarosso a trasformata di Fourier.*

- N° 4 computer di gestione (Figura 33). Per ogni test effettuato, tutti gli analizzatori sono stati gestiti, controllati e monitorati attraverso i computer presenti nella plancia di comando del laboratorio.



*Figura 33 - Plancia di comando del LEA durante l'esecuzione di un test.*

### 3.4.2 Calibrazione banco dinamometrico

Per ogni auto, prima dell'inizio dei test, è stata eseguita la procedura di calibrazione del banco dinamometrico. Per simulare il comportamento stradale di un veicolo su un banco a rulli, è necessario riprodurre fedelmente la forza a cui è sottoposto il veicolo durante l'avanzamento su strada. Tale forza è espressa tramite la seguente equazione:

$$F = F_0 + F_1 \times v + F_2 \times v^2$$

dove,

$v$  = velocità del veicolo [m/s];

$F$  = forza a cui è sottoposto il veicolo durante l'avanzamento su strada [N];

$F_0, F_1, F_2$  = coefficienti di frenatura che dipendono dalla forma del veicolo e dagli attriti con cui si muove.  $F_0$  [N],  $F_1$  [N/(m/s)],  $F_2$  [N/(m/s)<sup>2</sup>].

Per il veicolo 1 e il veicolo 4, i coefficienti  $F_0, F_1, F_2$  sono stati forniti al LEA direttamente dalla casa costruttrice, mentre per i restanti veicoli i parametri sono stati calcolati secondo il metodo proposto dal gruppoERMES:

$$F_0 = f_0 \times test\ mass \times 9,81m/s^2$$

$$F_1 = f_1 \times test\ mass \times 9,81m/s^2$$

$$F_2 = \frac{1}{2} \times 1,189\ kg/m^3 \times Cd \times A$$

dove,

$$f_0 = 0,0099 [-];$$

$$f_1 = 0,0000570 [s/m];$$

$$Cd = 0,332 [-];$$

$test\ mass$  [kg] = massa del veicolo (compresa di equipaggiamento supplementare) + 75 kg (peso del guidatore).

$1,189\ kg/m^3$  = densità dell'aria alle condizioni climatiche presenti in sala emissioni;

$A$  [m<sup>2</sup>] = sezione frontale dell'auto.

Nella Tabella 11 sono riportati i coefficienti di calibrazione del banco dinamometrico utilizzati per i test:

<b>Codice veicolo</b>	<b>F<sub>0</sub> [N]</b>	<b>F<sub>1</sub> [N/(m/s)]</b>	<b>F<sub>2</sub> [N/(m/s)<sup>2</sup>]</b>	<b>M<sub>equiv</sub> [kg]</b>
<b>1</b>	6,3233	-0,0228	0,0435	1130
<b>2</b>	131,6	0,76	0,58	1355
<b>3</b>	113,14	0,65	0,4	1165
<b>4</b>	93,44	0,0122	0,0401	1470
<b>5</b>	97,10	0,6682	0,0379	1370

*Tabella 11 - Coefficienti di calibrazione del banco dinamometrico utilizzati per i test.*

Dopo aver calcolato la forza a cui è sottoposto il veicolo durante l'avanzamento su strada, sono state calcolate le perdite associate alle componenti del banco, quali cuscinetti ed organi in movimento. Il rilievo delle perdite del banco, effettuato con il motore del veicolo acceso ed in folle, è stato realizzato lanciando i rulli ad una velocità di 140 km/h e facendo poi decelerare il gruppo banco più veicolo per inerzia, rilevando il tempo intercorso per passare da 125 a 115 km/h, poi da 115 a 105 km/h e così via fino a zero. L'equazione implementata nel software di controllo del banco per il calcolo dei valori di forza che esprimono le perdite del sistema è la seguente:

$$F = m \times \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

dove,

$m$  = massa dei rulli + volano = 680 kg;

$\Delta v$  = 2,77 m/s;

$\Delta t$  = tempo [s] rilevato per ogni decelerazione di 10 km/h.

L'applicazione di questa equazione porta ad ottenere una curva del tipo proposta nella Figura 34.

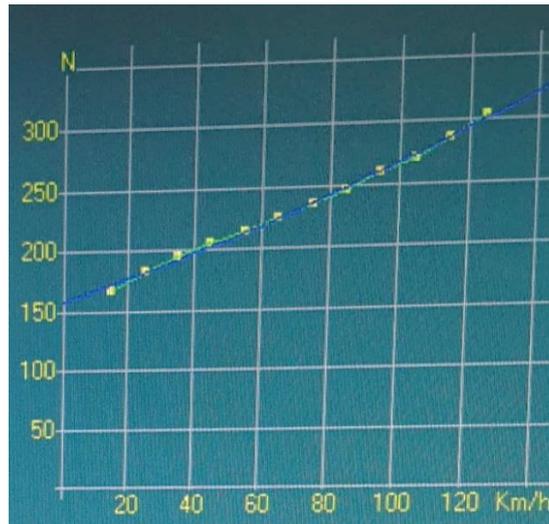


Figura 34 - Curva delle perdite del banco dinamometrico.

L'insieme dei punti della curva delle perdite è stato poi interpolato dal software Winroll con il metodo dei minimi quadrati, ottenendo un polinomio di secondo grado rappresentante le perdite del sistema:

$$P = p_0 + p_1 \times v + p_2 \times v^2$$

Il software di gestione del banco sottrae il valore delle perdite calcolato con questo polinomio a quello che esprime la forza a cui è sottoposto il veicolo durante l'avanzamento su strada, ottenendo il valore esatto di forza da richiedere al motore del banco dinamometrico.

Il test di *coast-down* è infine l'ultimo passo eseguito per la procedura di calibrazione del banco. Questo test ha permesso di verificare che il banco stesse effettivamente riproducendo la forza  $F$ , calcolata per mezzo dei coefficienti  $F_0$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ , al netto delle proprie perdite. Analogamente a quanto fatto per il rilievo delle perdite del banco, i rulli sono stati lanciati ad una velocità di 140 km/h mantenendo il motore del veicolo acceso ed in folle, solo che in questo caso il gruppo banco più veicolo è stato fatto decelerare applicando la forza calcolata al netto delle perdite del banco. Qualora i valori di forza misurati tramite coast-down si fossero discostati troppo da quelli della curva teorica ( $F$ ), il software, tramite una funzione di auto-calibrazione, ha permesso di ricalcolare, sottraendo o sommando l'errore commesso nel test di coast-down, la forza richiesta al motore del banco fino al raggiungimento di un errore considerato accettabile.

### 3.4.3 Cicli di guida

Nei test di laboratorio sono stati effettuati i seguenti cicli di guida:

- NEDC, eseguito seguendo una strategia di marcia predefinita e composto da:
  - Una fase di guida urbana (UDC) con avviamento del motore a temperatura ambiente e preceduto da almeno 6 ore di pre-condizionamento in laboratorio;
  - Una fase di guida extra-urbana (EUDC).
- ERMES, eseguito seguendo una strategia di marcia predefinita e con partenza a caldo immediatamente dopo la fine del NEDC.
- WLTC, eseguito con avviamento del motore a temperatura ambiente e seguendo una strategia di marcia calcolata distintamente per ogni veicolo sulla base di parametri quali: potenza massima dichiarata (kW), massa a vuoto [kg], massa al momento del test [kg], giri del motore in folle [rpm/min] e in fase di erogazione della potenza massima [rpm/min], velocità massima dichiarata [km/h], numero di marce, rapporto tra i giri motore e la velocità corrispondente per ogni marcia, F0 [N], F1 [N/(km/h)], F2 [N/(km/h)<sup>2</sup>] e curva coppia/potenza del motore.

Nelle figure 35-36 sono illustrati i cicli effettuati e nelle tabelle 12-13 sono riportate le loro principali caratteristiche.

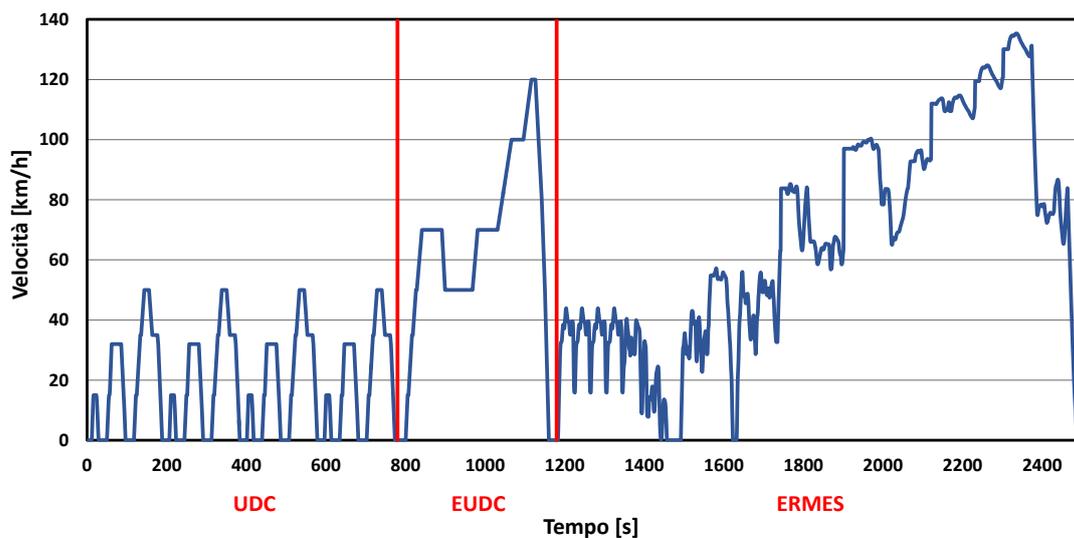


Figura 35 - Ciclo di guida NEDC (UDC + EUDC) + ERMES.

		NEDC		ERMES
		UDC	EUDC	ERMES
<b>Durata</b>	s	780	400	1320
<b>Velocità massima</b>	km/h	50,0	120,0	135,3
<b>Velocità media</b>	km/h	19,5	62,7	66,2
<b>Distanza</b>	km	4,05	6,96	24,20
<b>Tempo in IDLE</b>	%	30,8	10,0	4,7

Tabella 12 – Principali caratteristiche dei cicli di guida NEDC (UDC + EUDC) ed ERMES.

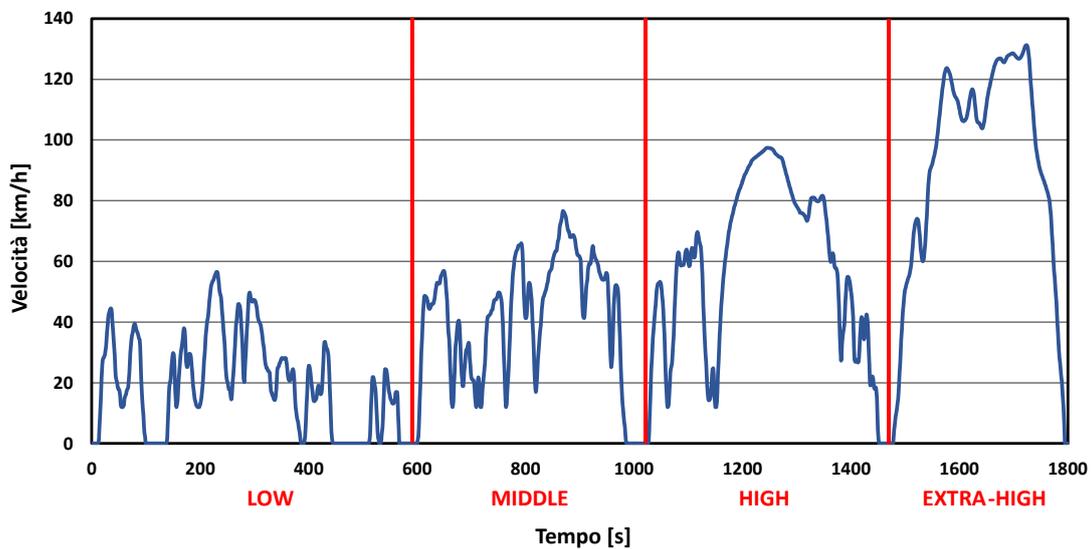


Figura 36 - Ciclo di guida WLTC.

		WLTC			
		LOW	MIDDLE	HIGH	EXTRA-HIGH
<b>Durata</b>	s	593	431	455	323
<b>Velocità massima</b>	km/h	56,5	76,6	97,4	131,3
<b>Velocità media</b>	km/h	18,8	39,7	56,5	92,0
<b>Distanza</b>	km	3,09	4,75	7,14	8,24
<b>Tempo in IDLE</b>	%	25,3	10,7	6,6	2,2

Tabella 13 - Caratteristiche principali del ciclo di guida WLTC.

Per ogni autovettura e per entrambe le tipologie di combustibile, il ciclo NEDC + ERMES è stato ripetuto fino al raggiungimento di 3 test con buona ripetibilità (coefficiente di variazione prossimo al 2% per l'anidride carbonica), mentre il ciclo WLTC è stato eseguito una volta, come da accordi col Committente.

Nel corso di ogni giornata, dopo un primo test effettuato in mattinata, i veicoli sono stati sottoposti, fino al pomeriggio, a raffreddamento forzato a cofano aperto sotto azione di una soffiante. Dopodiché, spento il ventilatore, la temperatura del laboratorio è stata fatta stabilizzare per oltre un'ora e mezza prima dell'esecuzione del test pomeridiano.

Prima dell'inizio di ogni prova, è stato disabilitato il sistema di controllo elettronico della stabilità (ESP), così come, qualora presente, il sistema *Start&Stop*.

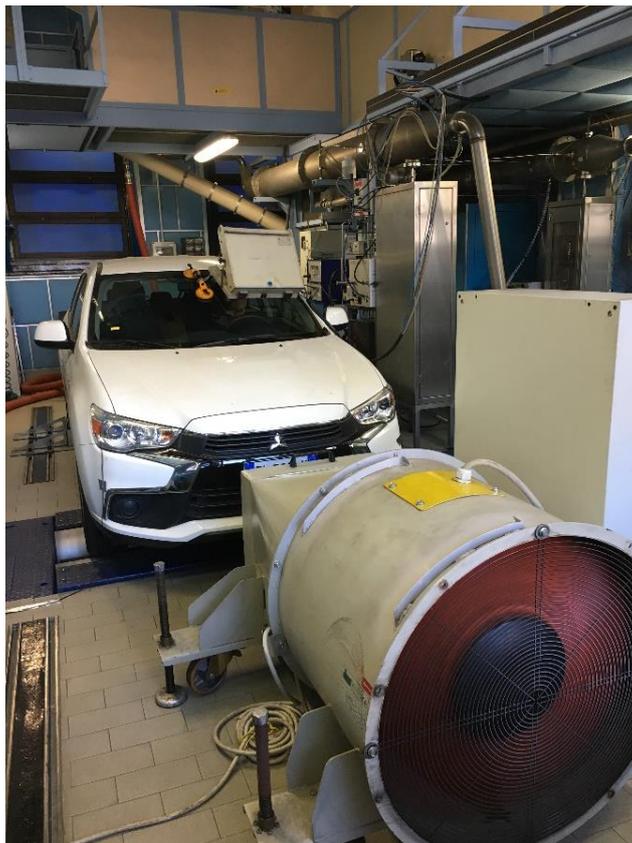


Figura 37 - Autovettura sul banco dinamometrico durante l'esecuzione di un test.

### 3.5 PROVE RDE

I test in condizioni di guida reale su strada (RDE) sono stati effettuati previa installazione, adattamento ed immobilizzazione della complessa strumentazione PEMS a bordo delle autovetture ad opera del personale del LEA. Inoltre, per ogni veicolo testato, un tecnico specializzato dell'area combustibili di Innovhub-SSI ha realizzato ed installato un apposito raccordo tra il tubo di scarico e il tubo del flussimetro del gas di scarico (*exhaust flow meter tube*).

Per i veicoli 1, 2, 3 e 4 è stato utilizzato un tubo di misura della portata del gas di scarico con diametro da 2,5 pollici, mentre per il veicolo 5 uno da 2 pollici. Quest'ultimo è risultato essere quello più adatto per la tipologia di veicoli testati: il tubo da 2,5 pollici infatti non ha garantito, in particolare durante la fase autostradale, un'analisi accurata del gas di scarico come per le precedenti due fasi. Questo è il motivo per cui in Appendice A sono stati evidenziati in rosso i dati misurati durante la fase autostradale utilizzando il tubo da 2,5 pollici.

Prima di ogni test, tutti gli analizzatori delle specie gassose sono stati accuratamente calibrati tramite *span* di gas contenuti in bombole di composizioni certificate (Figura 38), mentre l'analizzatore del numero di particelle è stato calibrato rilevando un valore di "zero" rispetto a cui è stata poi effettuata la misura nel corso della prova.



Figura 38 - PEMS durante la fase di calibrazione tramite gas contenuti in bombole certificate.

### 3.5.1 Strumentazione

La strumentazione utilizzata per eseguire i test RDE è la seguente:

- *AVL M.O.V.E System Control* (Figura 39): è il computer di controllo dell'intero sistema a cui è collegato il laptop di gestione della prova, l'analizzatore delle specie gassose, l'analizzatore del numero di particelle, il GPS e il sensore dei parametri ambientali.



Figura 39 - AVL M.O.V.E System Control.

- *AVL M.O.V.E Gas PEMS* (Figura 40): è l'insieme della strumentazione utile per il campionamento e la misura delle specie gassose, a sua volta è formata da:
  - *AVL M.O.V.E Gas PEMS 493*: è lo strumento che contiene gli analizzatori delle specie gassose;



Figura 40 - AVL M.O.V.E Gas PEMS 493.

- linea di campionamento esterna riscaldata a 190°C (2 m);

- kit di collegamento della sonda di campionamento all'*exhaust flow meter tube*;
- cavo di collegamento all'alimentazione elettrica;
- cavo Ethernet di collegamento alla *system control*;
- bombola (40% H<sub>2</sub> e 60% He, Figura 41) di alimentazione della fiamma dell'analizzatore FID (*Flame Ionization Detector*);



Figura 41 - Bombola con miscela di H<sub>2</sub> (40%) e He (60%) di alimentazione della fiamma del FID.

- AVL M.O.V.E PN PEMS (Figura 42): è l'insieme della strumentazione utile per il campionamento e la misura del particolato in numero, a sua volta è formata da:
  - AVL M.O.V.E. PN PEMS 496: è lo strumento di misura del numero di particolato;

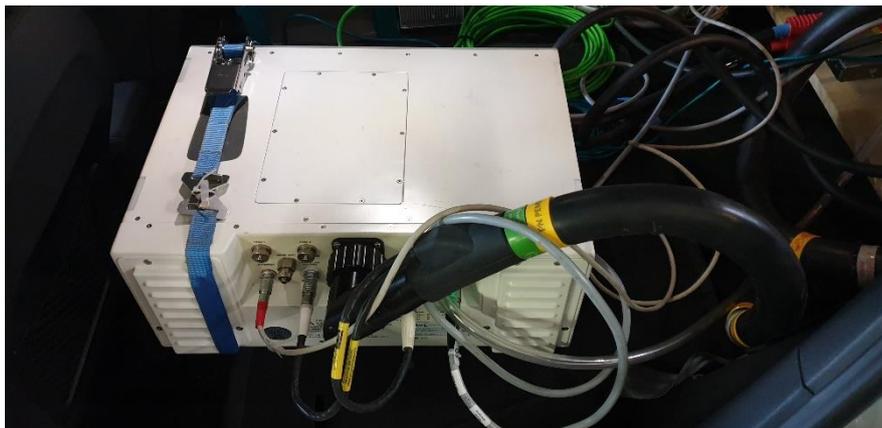


Figura 42 - AVL M.O.V.E. PN PEMS 496.

- strumento di rimozione della frazione volatile e semi-volatile del particolato;
- linea di campionamento esterna riscaldata a 190°C (1.30 m);

- kit di collegamento della sonda di campionamento all'*exhaust flow meter tube*;
- cavo Ethernet di collegamento alla *system control*;
- cavo di collegamento all'alimentazione elettrica.
- **AVL M.O.V.E Exhaust Flow Meter:** è l'insieme della strumentazione che convoglia il gas di scarico, ne misura portata, temperatura e pressione ed ospita le sonde di campionamento del Gas PEMS e del PN PEMS.
  - **AVL M.O.V.E EFM Control box** (Figura 44): è lo strumento che, collegato all'*EFM Tube*, calcola la portata e gestisce i sensori di temperatura e pressione del gas di scarico;
  - **AVL M.O.V.E EFM Tube** (Figura 43): è il tubo del diametro di 2,5 pollici e 2 pollici che convoglia il gas di scarico e a cui sono collegate le sonde di campionamento degli analizzatori, così come i sensori di temperatura e pressione del gas di scarico.



Figura 43 - Exhaust Flow Meter da 2,5" di diametro.

- **AVL M.O.V.E kit di alimentazione** composto da:
  - unità di distribuzione dell'alimentazione;
  - n°2 batterie da 185 Ah di capacità;
  - **Mastervolt Chargemaster 24/100-3** (Figura 44): strumento utilizzato per gestione della ricarica delle batterie;



Figura 44 - Mastervolt Chagemaster 24/100-3 (a destra) e AVL M.O.V.E EFM Control box (a sinistra).

- AVL M.O.V.E pedana isolante anti-vibrazioni utile a garantire la massima stabilità agli analizzatori presenti all'interno del *Gas PEMS 493*;
- computer di gestione della prova collegato alla *System Control*;
- unità di emergenza per l'eventuale interruzione istantanea del funzionamento di tutti gli strumenti.

### 3.5.2 Ciclo di guida

Il personale del LEA, dopo aver effettuato uno studio preliminare delle condizioni di traffico, ha definito il percorso da seguire e identificato il miglior orario di partenza (13:00 – 13:30) che permettesse di completare i test nel rispetto delle condizioni dinamiche e al contorno introdotte attraverso i primi due pacchetti normativi RDE (Tabella 5 e Tabella 6).

Nelle Figure 45-47 viene evidenziato il tracciato del ciclo di guida percorso durante le prove RDE.



Figura 45 - Fase di guida urbana, evidenziata in giallo, eseguita nell'area orientale della città di Milano.

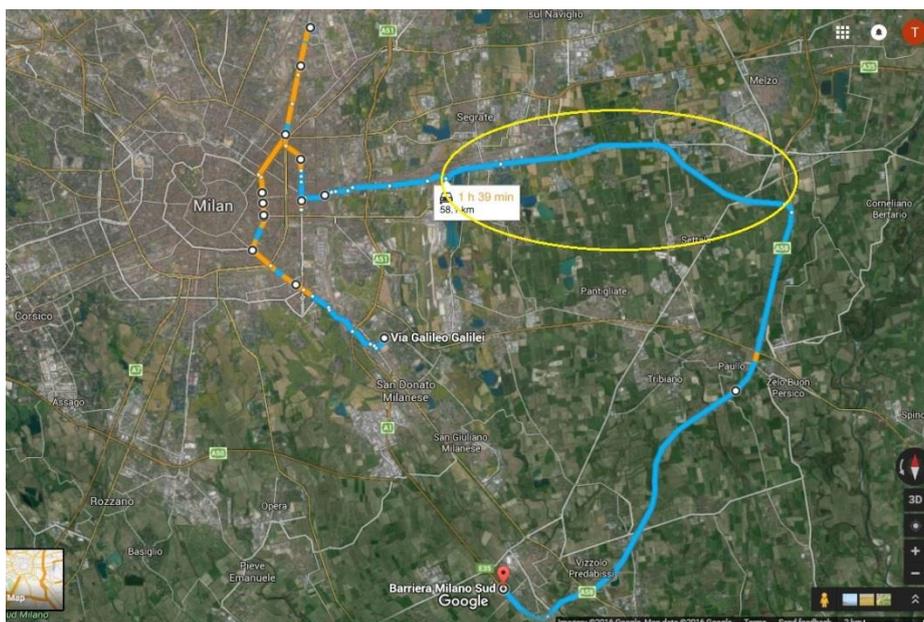


Figura 46 - Fase di guida extra-urbana, evidenziata in giallo, eseguita sulla Strada Provinciale Rivoltana.

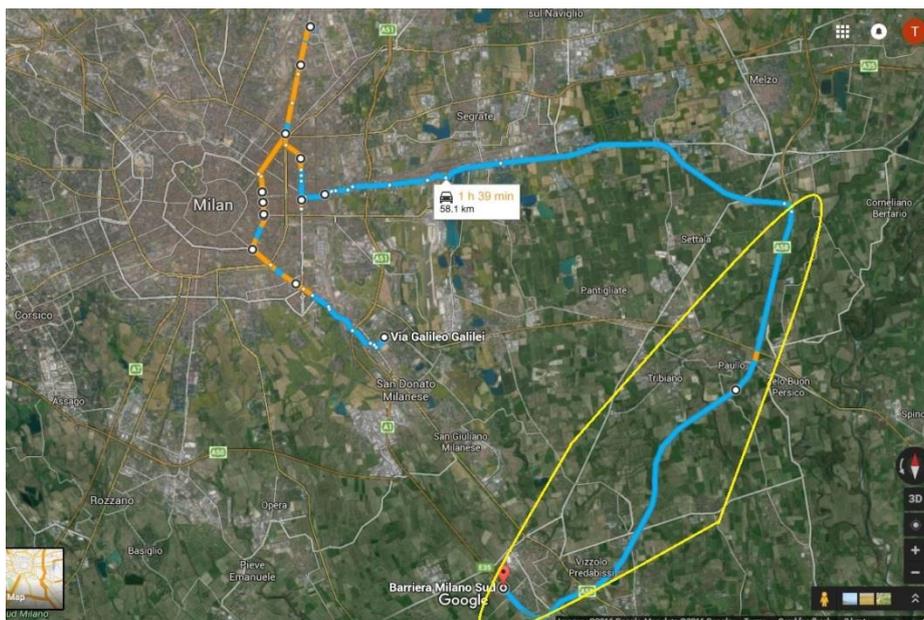


Figura 47 - Fase di guida autostradale, evidenziata in giallo, eseguita sulla Tangenziale Est Esterna di Milano (A58).

Per ogni autovettura sono state eseguite, seguendo sempre il medesimo tragitto, 4 prove RDE: 2 con alimentazione a benzina e 2 con alimentazione a GPL. Il guidatore ha inoltre cercato di mantenere lo stesso stile di guida in ogni prova, così da rendere il più possibile confrontabili le emissioni rilevate durante i test.



Figura 48 – Strumentazione PEMS a bordo di un'autovettura per l'esecuzione di una prova RDE.

### 4.1 PROVE DI LABORATORIO

Al termine di ogni prova, i campioni di aria e di gas di scarico diluiti raccolti all'interno dei sacchi di Tedlar sono stati automaticamente analizzati dal sistema per determinare le concentrazioni di monossido di carbonio, ossidi di azoto, idrocarburi incombusti totali, metano e anidride carbonica. Il software di acquisizione dei dati ha ottenuto, tramite l'applicazione della seguente equazione, la misura corretta delle concentrazioni dei composti gassosi presenti all'interno dei gas di scarico:

$$C_i = C_e - C_d \times \left(1 - \frac{1}{DF}\right)$$

dove,

$C_i$  = concentrazione [ppm] del composto gassoso  $i$  nei gas di scarico;

$C_e$  = concentrazione [ppm] misurata del composto gassoso  $i$  nei gas di scarico diluiti;

$C_d$  = concentrazione [ppm] del composto gassoso  $i$  nell'aria di diluizione;

$DF$  = fattore di diluizione [-], calcolato, diversamente in base al combustibile utilizzato, come segue.

Per la benzina:

$$DF = \frac{13,4}{C_{CO_2} + (C_{HC} + C_{CO}) \times 10^{-4}}$$

Per il GPL:

$$DF = \frac{11,9}{C_{CO_2} + (C_{HC} + C_{CO}) \times 10^{-4}}$$

dove,

$C_{CO_2}$  = concentrazione di CO<sub>2</sub> [% v/v] nei gas di scarico diluiti contenuti nel sacco di campionamento;

$C_{HC}$  = concentrazione [ppm di carbonio equivalente] di HC nei gas di scarico diluiti contenuti nel sacco di campionamento;

$C_{CO}$  = concentrazione di CO [ppm] nei gas di scarico diluiti contenuti nel sacco di campionamento.

Per ogni prova il consumo di combustibile è stato determinato, attraverso il metodo del bilancio del carbonio, applicando le seguenti relazioni riportate nel Regolamento CE 692/2008:

$$FC_{benzina (E5)} = 0,118 \times [(0,848 \times THC) + (0,429 \times CO) + (0,273 \times CO_2)]/d_c$$

$$FC_{GPL} = 0,1212 \times [(0,825 \times THC) + (0,429 \times CO) + (0,273 \times CO_2)]/d_c$$

dove,

$FC_{benzina (E5)}$  = consumo [l/100km] di benzina;

$FC_{GPL}$  = consumo [l/100km] di GPL;

$THC, CO, CO_2$  = emissione [g/km], rispettivamente, di idrocarburi incombusti, di monossido di carbonio e di anidride carbonica;

$d_c$  = densità del combustibile [kg/l] determinata per mezzo del metodo EN ISO 12185.

Il software di acquisizione dei dati *AVL i4L*, al termine di ogni test, ha generato un foglio di calcolo Excel contenente, oltre all'elaborazione dei dati effettuata in modo automatico, un *report* delle emissioni delle specie gassose regolamentate, della  $CO_2$ , del numero di particelle, della frazione carboniosa del particolato e del consumo di combustibile. Tali valori sono espressi in termini di massa/km sia in riferimento alla singola fase sia come valore medio sull'intero ciclo di guida.

I risultati delle analisi eseguite dall'ELPI e dal FT-IR, al termine di ogni prova, sono invece stati processati ad opera del personale LEA per mezzo di appositi fogli di calcolo, realizzati e sviluppati con lo scopo di ricavare le emissioni rispettivamente in termini di numero/km e di massa/km sia in riferimento alla singola fase sia come valore medio sull'intero ciclo di guida.

Nella Tabella 14 è proposto un quadro riassuntivo di confronto, compreso di relative variazioni percentuali, tra le emissioni e i consumi rilevati con l'alimentazione a benzina e con quella a GPL.

	BENZINA		GPL		$\Delta$
	Media	d.s.	Media	d.s.	
CO [mg/km]	322,64	207,89	400,11	201,00	24,01%
THC [mg/km]	21,53	17,21	26,73	20,38	24,20%
NMHC [mg/km]	18,32	16,50	23,49	18,77	28,17%
NOx [mg/km]	14,19	9,98	14,12	7,76	-0,49%
CO <sub>2</sub> [g/km]	140,94	21,46	129,09	18,59	-8,41%
FC [l/100km]	6,08	0,90	8,09	1,41	33,15%
PM [mg/km]	0,28	0,58	0,11	0,09	-58,88%
PN PMP [#/km]	3,20E+11	2,89E+11	1,81E+11	1,83E+11	-43,32%
PN ELPI [#/km]	3,91E+11	5,54E+11	2,34E+11	3,25E+11	-40,19%
PN EEPS [#/km]	3,04E+13	5,57E+13	2,93E+13	5,79E+13	-3,76%
PM soot [mg/km]	0,11	0,13	0,07	0,08	-35,87%
NH <sub>3</sub> [mg/km]	6,12	4,04	13,98	12,36	128,52%
NO <sub>2</sub> [mg/km]	3,31	0,88	3,61	0,92	9,09%
1,3-Butadiene [mg/km]	8,30	2,55	11,15	4,60	34,33%
Formaldeide [mg/km]	0,06	0,08	0,08	0,10	24,81%
Benzene [mg/km]	2,97	2,51	7,09	5,06	139,02%
N <sub>2</sub> O [mg/km]	2,27	0,76	2,53	0,92	11,08%

Tabella 14 – Confronto tra le emissioni e i consumi rilevati con l'alimentazione a benzina e con quella a GPL e relative deviazioni standard e variazioni percentuali. I dati proposti per ogni tipologia di alimentazione sono stati ottenuti come media dei valori emissivi totali rilevati sui cicli di guida NEDC, ERMES e WLTC con tutti i veicoli testati.

Dalla Tabella 14 è possibile dedurre che complessivamente, nel passaggio dall'alimentazione a benzina a quella a GPL, è stato rilevato, da un lato un aumento dell'emissione di CO, THC, NMHC, composti gassosi non regolamentati e del consumo di

combustibile e dall'altro una diminuzione dell'emissione di NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, PM, PN (PMP, ELPI, EEPS) e PM soot. Sulla base dei dati riassunti in Tabella 14 non risulta quindi possibile formulare un giudizio generale su quale delle due tipologie di alimentazione garantisca un minore impatto in termini di inquinamento atmosferico, mentre appare invece evidente che l'utilizzo del GPL assicuri complessivamente una riduzione dell'emissione di gas ad effetto serra.

I grafici proposti nelle Figure 49-65 mostrano, per ogni autovettura e per entrambe le tipologie di alimentazione, le emissioni medie relative all'intero ciclo di guida per ciascun inquinante considerato.

Ai valori emissivi registrati per ogni veicolo sui cicli NEDC ed ERMES è stato applicato il t-test di Student al livello di confidenza del 95% per verificare la significatività statistica delle variazioni emissive osservate tra l'alimentazione a benzina e quella a GPL. Qualora presente, nei grafici di confronto tale variazione è stata sottolineata con una linea rossa.

#### **4.1.1 Emissioni gassose regolamentate, di CO<sub>2</sub> e consumo di combustibile**

Tutte le autovetture sottoposte a test, con entrambe le tipologie di alimentazione, hanno riportato emissioni di CO inferiori al limite Euro 6 (1 g/km). Come si evince dalla Figura 49 rispetto all'alimentazione a benzina con l'alimentazione a GPL si rileva un incremento statisticamente significativo dell'emissione di CO sul ciclo NEDC per il veicolo 1 (+239,2%), veicolo 3 (+126,2%), veicolo 4 (+197,5%) e veicolo 5 (+81,0%). Sul ciclo ERMES è stata invece osservata una diminuzione statisticamente significativa dell'emissione di CO per il veicolo 1 (-34,2%) e veicolo 4 (-58,6%). Le emissioni sul ciclo WLTC confermano la tendenza registrata per ogni veicolo osservata sul ciclo NEDC.

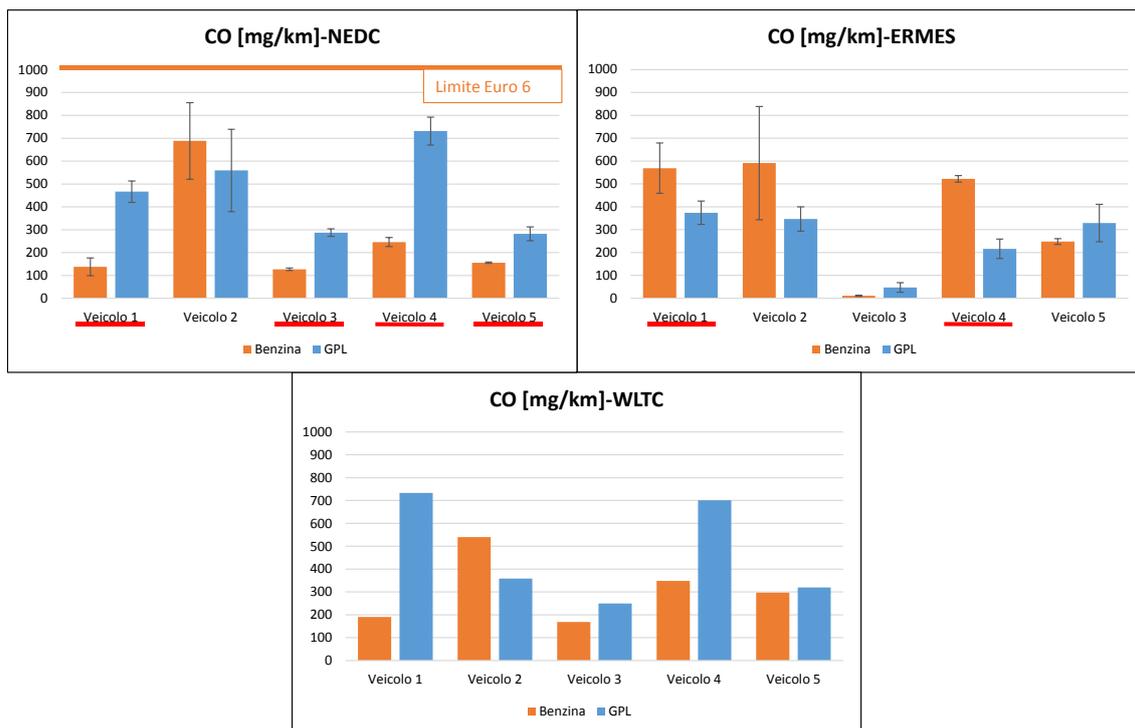


Figura 49 – Confronto tra le emissioni medie di CO rilevate sul ciclo NEDC, ERMES e WLTC testando i veicoli sia con l'alimentazione a benzina, sia con quella a GPL. I valori proposti per i cicli NEDC ed ERMES sono stati ottenuti mediando le emissioni rilevate sulle 3 prove selezionate per ogni alimentazione. I margini di errore rappresentano l'intervallo di confidenza al 95% calcolato sulle 3 prove.

Anche le emissioni di THC, per tutte le autovetture testate e con entrambe le tipologie di alimentazione, sono risultate inferiori al limite Euro 6 di 0,1 g/km (Figura 50). Con l'alimentazione a GPL, rispetto a quella a benzina, è stato rilevato un incremento statisticamente significativo dell'emissione di THC sul ciclo NEDC per il veicolo 3 (+171,5%) e veicolo 4 (+87,0%) e sul ciclo ERMES per il veicolo 3 (+183,4%). In generale, tutte le emissioni di THC rilevate sul ciclo ERMES, effettuato con partenza a motore caldo, sono molto basse per via del funzionamento ad alta temperatura del catalizzatore durante tutto il ciclo. Le emissioni sul ciclo WLTC confermano l'esito del confronto registrato sul ciclo NEDC, con valori emissivi di THC leggermente inferiori per la maggior parte dei veicoli rispetto a quelli rilevati sul ciclo NEDC.

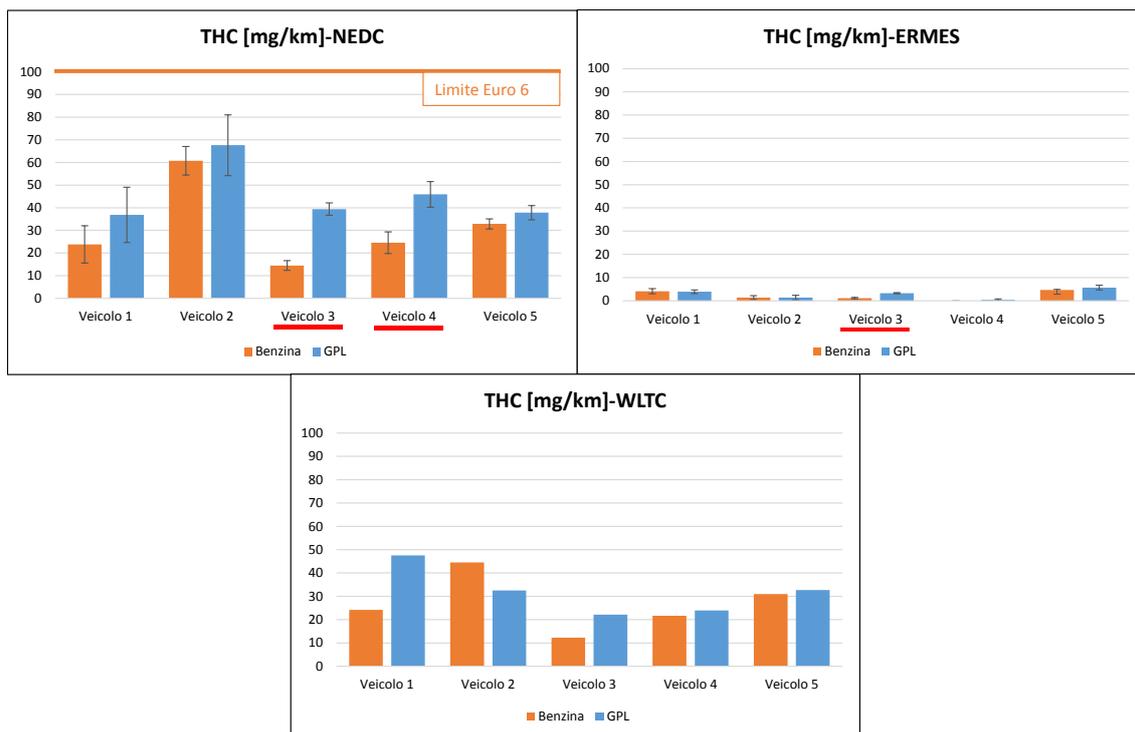


Figura 50 - Confronto tra le emissioni medie di THC rilevate sul ciclo NEDC, ERMES e WLTC testando i veicoli sia con l'alimentazione a benzina, sia con quella a GPL. I valori proposti per i cicli NEDC ed ERMES sono stati ottenuti mediando le emissioni rilevate sulle 3 prove selezionate per ogni alimentazione. I margini di errore rappresentano l'intervallo di confidenza al 95% calcolato sulle 3 prove.

Come per le emissioni di THC, anche quelle di NMHC (Figura 51), per tutte le autovetture e con entrambe le tipologie di alimentazione, sono risultate inferiori al limite Euro 6 (0,068 g/km). Con l'alimentazione a GPL, rispetto a quella a benzina, è stato rilevato un incremento statisticamente significativo dell'emissione di NMHC sul ciclo NEDC per il veicolo 3 (+177,1%) e veicolo 4 (+85,2%) e sul ciclo ERMES per il veicolo 3 (+185,4%). Anche in questo caso, tutte le emissioni di NMHC rilevate sul ciclo ERMES, effettuato con partenza a motore caldo, sono molto basse per via del funzionamento ad alta temperatura del catalizzatore durante tutto il ciclo. Nuovamente, le emissioni sul ciclo WLTC confermano la tendenza registrata sul ciclo NEDC, con valori emissivi di NMHC leggermente inferiori per la maggior parte dei veicoli rispetto a quelli rilevati sul ciclo NEDC.

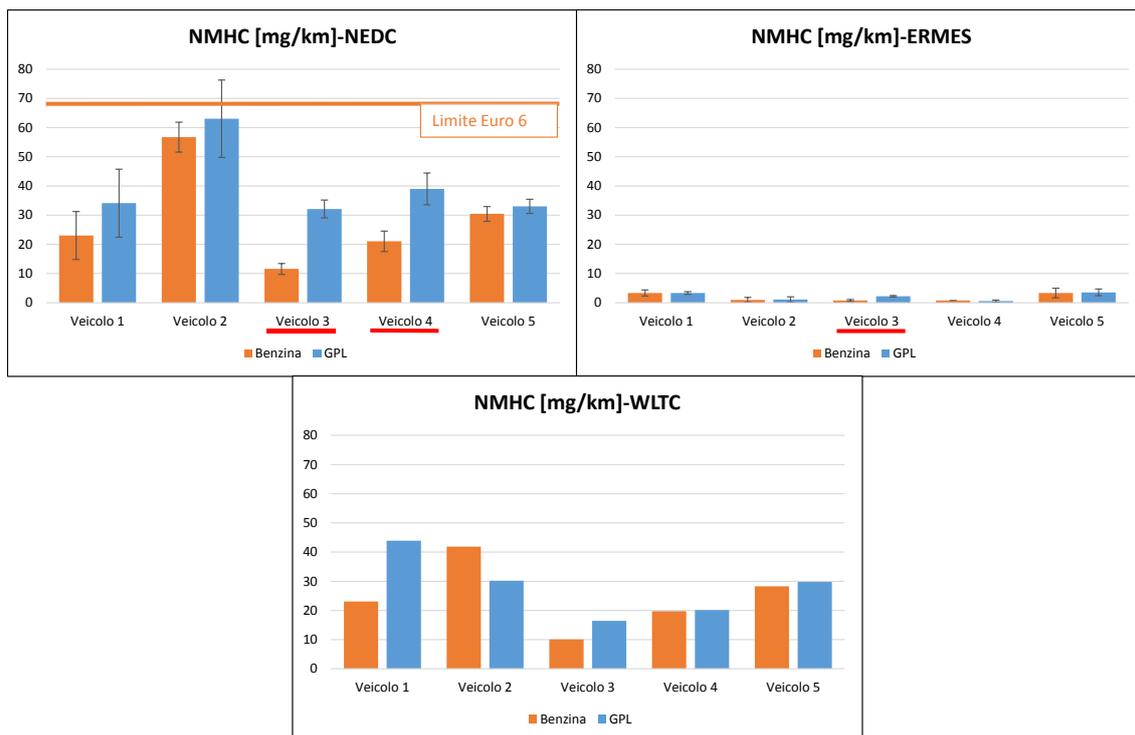


Figura 51 - Confronto tra le emissioni medie di NMHC rilevate sul ciclo NEDC, ERMES e WLTC testando i veicoli sia con l'alimentazione a benzina, sia con quella a GPL. I valori proposti per i cicli NEDC ed ERMES sono stati ottenuti mediando le emissioni rilevate sulle 3 prove selezionate per ogni alimentazione. I margini di errore rappresentano l'intervallo di confidenza al 95% calcolato sulle 3 prove.

Come si evince dalla Figura 52, anche le emissioni di NO<sub>x</sub>, per tutte le autovetture testate e con entrambe le tipologie di alimentazione, sono risultate inferiori al limite Euro 6 (0,060 g/km). Con l'alimentazione a GPL, rispetto a quella a benzina, è stata rilevata una riduzione statisticamente significativa dell'emissione di NO<sub>x</sub> sul ciclo NEDC per il veicolo 1 (-36,2%), veicolo 4 (-36,0%) e veicolo 5 (-64,6%), mentre sul ciclo ERMES è stato rilevato un aumento statisticamente significativo per il veicolo 4 (+285,5%). Le emissioni sul ciclo WLTC per il veicolo 1, veicolo 4 e veicolo 5 confermano l'andamento registrato sul ciclo NEDC.

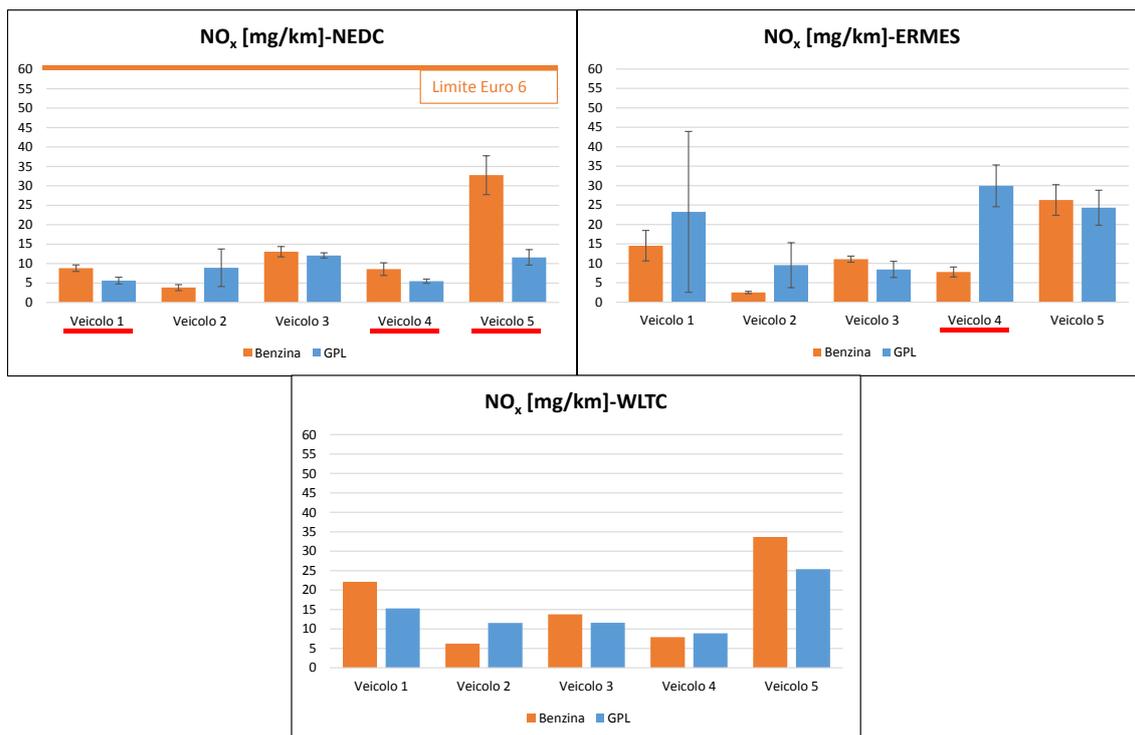


Figura 52 - Confronto tra le emissioni medie di NO<sub>x</sub> rilevate sul ciclo NEDC, ERMES e WLTC testando i veicoli sia con l'alimentazione a benzina, sia con quella a GPL. I valori proposti per i cicli NEDC ed ERMES sono stati ottenuti mediando le emissioni rilevate sulle 3 prove selezionate per ogni alimentazione. I margini di errore rappresentano l'intervallo di confidenza al 95% calcolato sulle 3 prove.

Per tutte le autovetture testate e su tutti i cicli effettuati, con l'alimentazione a GPL, rispetto a quella a benzina, è stata rilevata una riduzione statisticamente significativa dell'emissione di CO<sub>2</sub> (Figura 53) con:

- Variazione media del -9,1% sul ciclo NEDC, con intervallo di valori da un minimo di -5,7% (veicolo 3) ad un massimo di -12,3% (veicolo 5);
- Variazione media del -8,0% sul ciclo ERMES, con intervallo di valori da un minimo di -4,5% (veicolo 4) ad un massimo di -11,6% (veicolo 5);
- Variazione media del -7,8% sul ciclo WLTC, con un intervallo di valori da un minimo di -5,8% (veicolo 3) ad un massimo di -9,9% (veicolo 1).

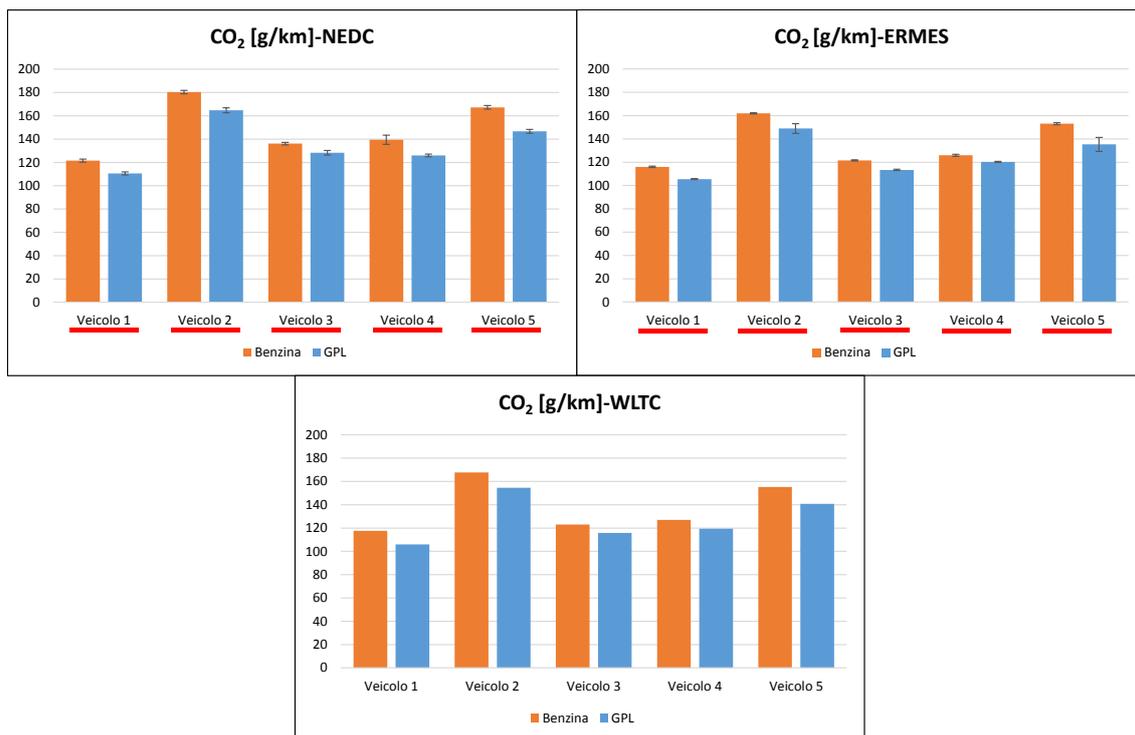


Figura 53 - Confronto tra le emissioni medie di CO<sub>2</sub> rilevate sul ciclo NEDC, ERMES e WLTC testando i veicoli sia con l'alimentazione a benzina, sia con quella a GPL. I valori proposti per i cicli NEDC ed ERMES sono stati ottenuti mediando le emissioni rilevate sulle 3 prove selezionate per ogni alimentazione. I margini di errore rappresentano l'intervallo di confidenza al 95% calcolato sulle 3 prove.

Al contrario, a causa della più alta densità della benzina rispetto a quella del GPL, per tutte le autovetture testate e su tutti i cicli effettuati, con l'alimentazione a GPL, rispetto a quella a benzina, è stato rilevato un aumento statisticamente significativo del consumo di combustibile (Figura 54) con:

- Variazione media del +31,8% sul ciclo NEDC, con intervallo di valori da un minimo di +26,0% (veicolo 1) ad un massimo di +38,0% (veicolo 2);
- Variazione media del +32,8% sul ciclo ERMES, con intervallo di valori da un minimo di +24,8% (veicolo 1) ad un massimo di +38,7% (veicolo 2);
- Variazione media del +33,5% sul ciclo WLTC, con intervallo di valori da un minimo di +24,5% (veicolo 1) ad un massimo di +39,0% (veicolo 2).

L'informazione del fattore di consumo, apparentemente poco "concreta" per via del confronto tra due combustibili dalle caratteristiche, costi e PCI diversi, è comunque di

interesse perché può essere però utilizzata da parte di ISPRA, durante la realizzazione dell'inventario delle emissioni in atmosfera, per la stima nel dettaglio (partendo dalle emissioni complessive aggregate per l'intero settore dei veicoli alimentati a GPL) delle emissioni di CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e metalli pesanti per le categoria delle autovetture Euro 6 bifuel GPL/benzina del segmento small e medium.

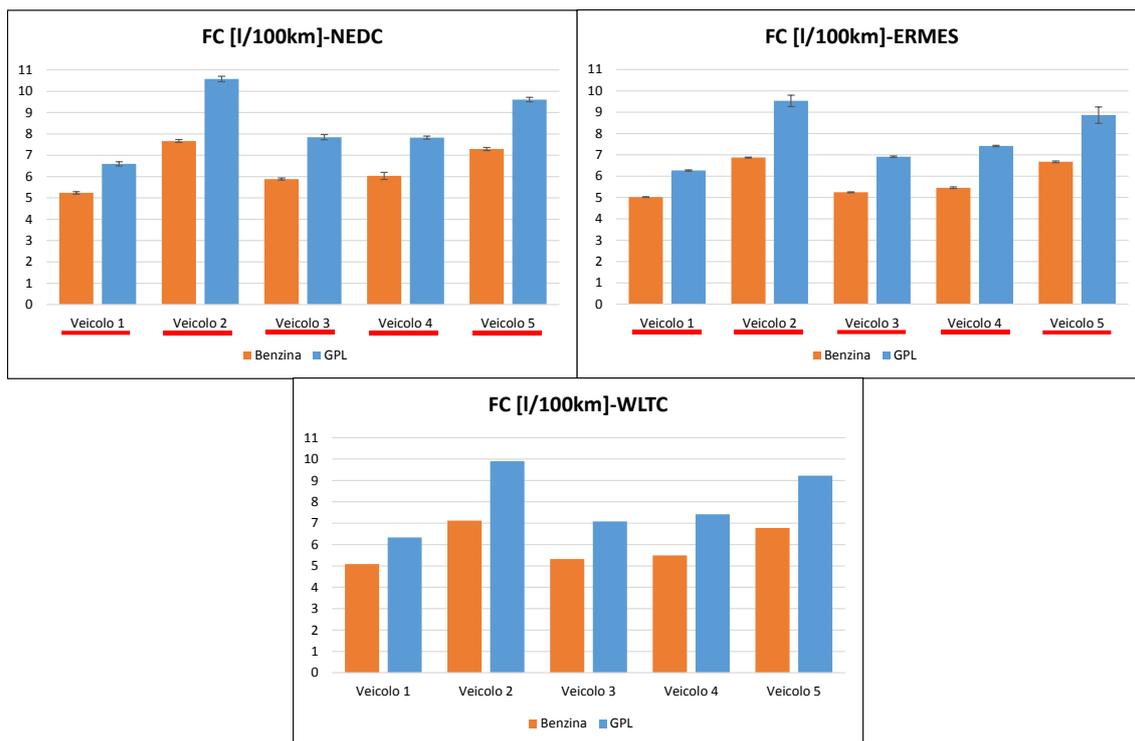


Figura 54 - Confronto tra i consumi di combustibile medi rilevati sul ciclo NEDC, ERMES e WLTC testando i veicoli sia con l'alimentazione a benzina, sia con quella a GPL. I valori proposti per i cicli NEDC ed ERMES sono stati ottenuti mediando i consumi rilevati sulle 3 prove selezionate per ogni alimentazione. I margini di errore rappresentano l'intervallo di confidenza al 95% calcolato sulle 3 prove.

#### 4.1.2 Emissioni di PN e PM

Per tutte le autovetture testate, con entrambe le tipologie di alimentazione, sono state rilevate emissioni di PM molto basse (Figura 55): il limite Euro 6 imposto per i motori ad iniezione diretta (4,5 mg/km) è stato ampiamente rispettato. Nel confronto tra l'alimentazione a benzina e quella a GPL, non sono state individuate variazioni emissive di PM statisticamente significative. Rispetto a tutti i risultati ottenuti, è stato rilevato un solo valore anomalo con il veicolo 2 alimentato a benzina sul ciclo WLTC (2,26 mg/km).

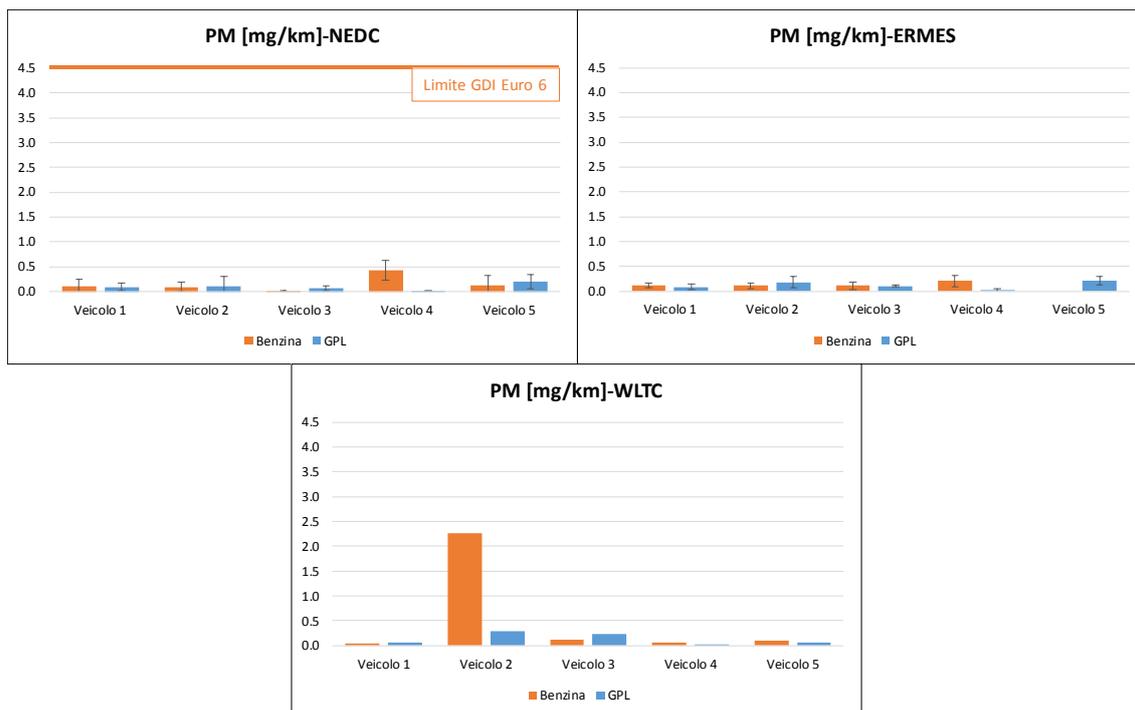


Figura 55 - Confronto tra le emissioni medie di PM rilevate sul ciclo NEDC, ERMES e WLTC testando i veicoli sia con l'alimentazione a benzina, sia con quella a GPL. I valori proposti per i cicli NEDC ed ERMES sono stati ottenuti mediando le emissioni rilevate sulle 3 prove selezionate per ogni alimentazione. I margini di errore rappresentano l'intervallo di confidenza al 95% calcolato sulle 3 prove.

Come si evince dalla Figura 56, tutte le autovetture testate e con entrambe le tipologie di alimentazione, hanno riportato valori emissivi del numero di particelle (misurati con sistema conforme al PMP) inferiori al limite Euro 6 imposto per i motori ad iniezione diretta ( $6 \cdot 10^{11}$  #/km), ad eccezione del veicolo 3 (unico dotato di sistema di alimentazione ad iniezione diretta) nel caso di alimentazione a benzina ( $6,65 \cdot 10^{11}$  #/km). Con l'alimentazione a GPL, rispetto a quella a benzina, è stata rilevata una riduzione statisticamente significativa dell'emissione di PN sul ciclo NEDC per il veicolo 3 (-36,5%) e sul ciclo ERMES per il veicolo 1 (-36,2%), veicolo 3 (-89,3%) e veicolo 4 (-89,8%). Sul ciclo WLTC sono state rilevate maggiori emissioni di PN rispetto ai cicli NEDC ed ERMES, ma è stata comunque confermata la tendenza alla diminuzione dell'emissione nel confronto tra l'alimentazione a benzina a quella a GPL.

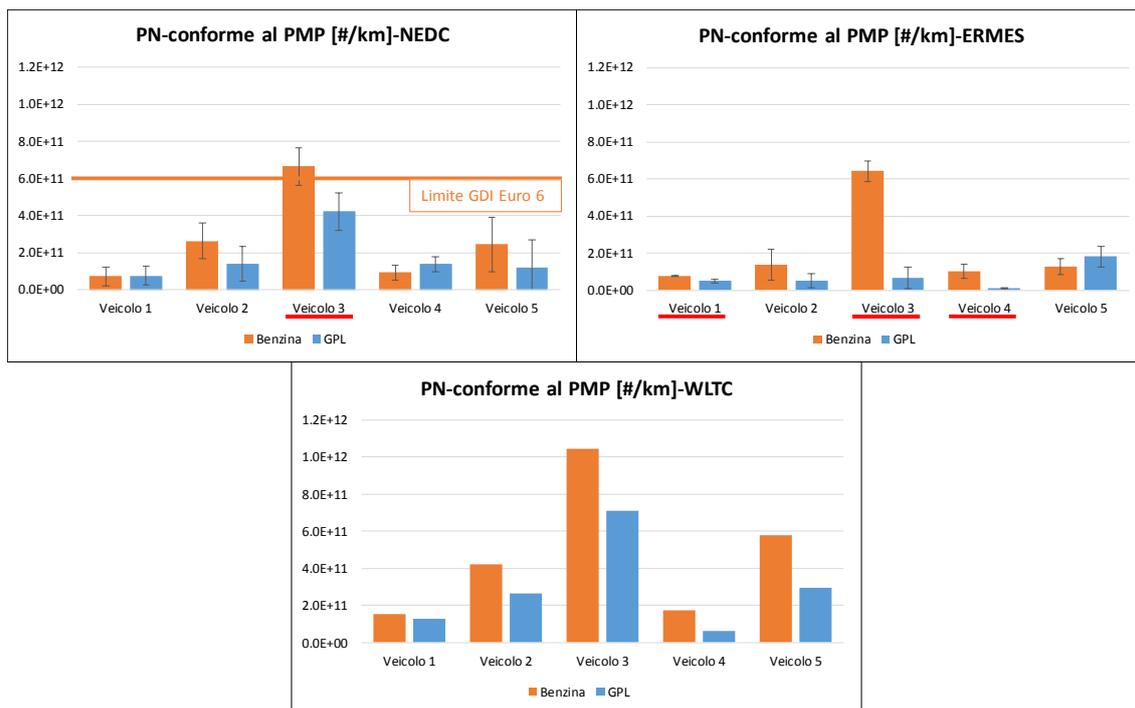


Figura 56 - Confronto tra le emissioni medie di PN rilevate secondo protocollo PMP (DEED + CPC) sul ciclo NEDC, ERMES e WLTC testando i veicoli sia con l'alimentazione a benzina, sia con quella a GPL. I valori proposti per i cicli NEDC ed ERMES sono stati ottenuti mediando le emissioni rilevate sulle 3 prove selezionate per ogni alimentazione. I margini di errore rappresentano l'intervallo di confidenza al 95% calcolato sulle 3 prove.

Con l'alimentazione a GPL, rispetto a quella a benzina, è stata rilevata una riduzione statisticamente significativa dell'emissione di PN misurata tramite ELPI (intervallo dimensionale 0,007  $\mu\text{m}$  – 10  $\mu\text{m}$ ) sul ciclo NEDC per il veicolo 3 (-59,7%) e sul ciclo ERMES per il veicolo 1 (-30,2%) e veicolo 3 (-85,6%) (Figura 57). Tutte le autovetture testate, con l'alimentazione a GPL rispetto a quella a benzina, hanno riportato inferiori valori emissivi di PN sul ciclo WLTC (variazione media -37,1%). Rispetto ai cicli NEDC e WLTC, le misure effettuate con ELPI durante le prove sul ciclo ERMES hanno invece evidenziato emissioni di PN molto più elevate per il veicolo 2 ( $9,50 \cdot 10^{11}$  #/km con alimentazione a benzina e  $1,05 \cdot 10^{12}$  #/km con alimentazione a GPL) e per il veicolo 5 ( $2,19 \cdot 10^{12}$  #/km con alimentazione a benzina e  $9,49 \cdot 10^{11}$  #/km con alimentazione a GPL).

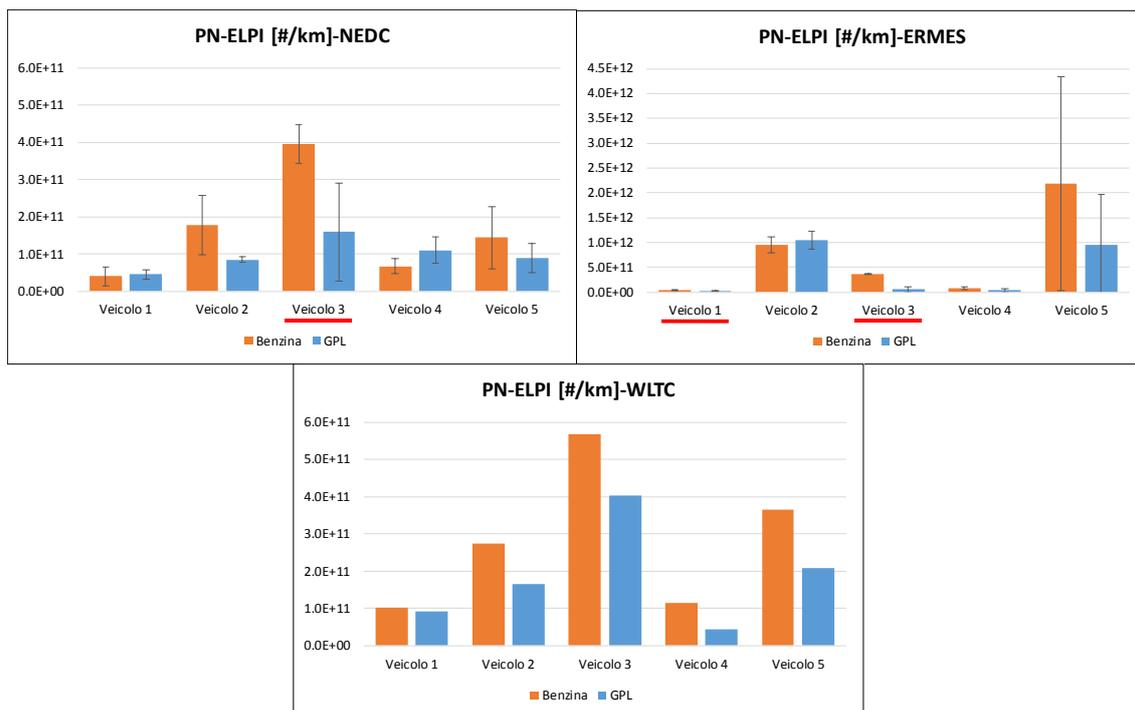


Figura 57 - Confronto tra le emissioni medie di PN rilevate tramite ELPI sul ciclo NEDC, ERMES e WLTC testando i veicoli sia con l'alimentazione a benzina, sia con quella a GPL. I valori proposti per i cicli NEDC ed ERMES sono stati ottenuti mediando le emissioni rilevate sulle 3 prove selezionate per ogni alimentazione. I margini di errore rappresentano l'intervallo di confidenza al 95% calcolato sulle 3 prove.

La misura effettuata tramite EEPS (Figura 58) conferma, con l'alimentazione a GPL rispetto a quella a benzina, una riduzione statisticamente significativa di PN sul ciclo NEDC per il veicolo 3 (-39,7%), mentre ne rileva una sul ciclo ERMES per il veicolo 4 (-72,2%). Tutte le autovetture testate, con l'alimentazione a GPL rispetto a quella a benzina, hanno riportato inferiori valori emissivi di PN nell'intervallo dimensionale 5,6 nm – 560 nm sul ciclo WLTC (variazione media -27,0%).

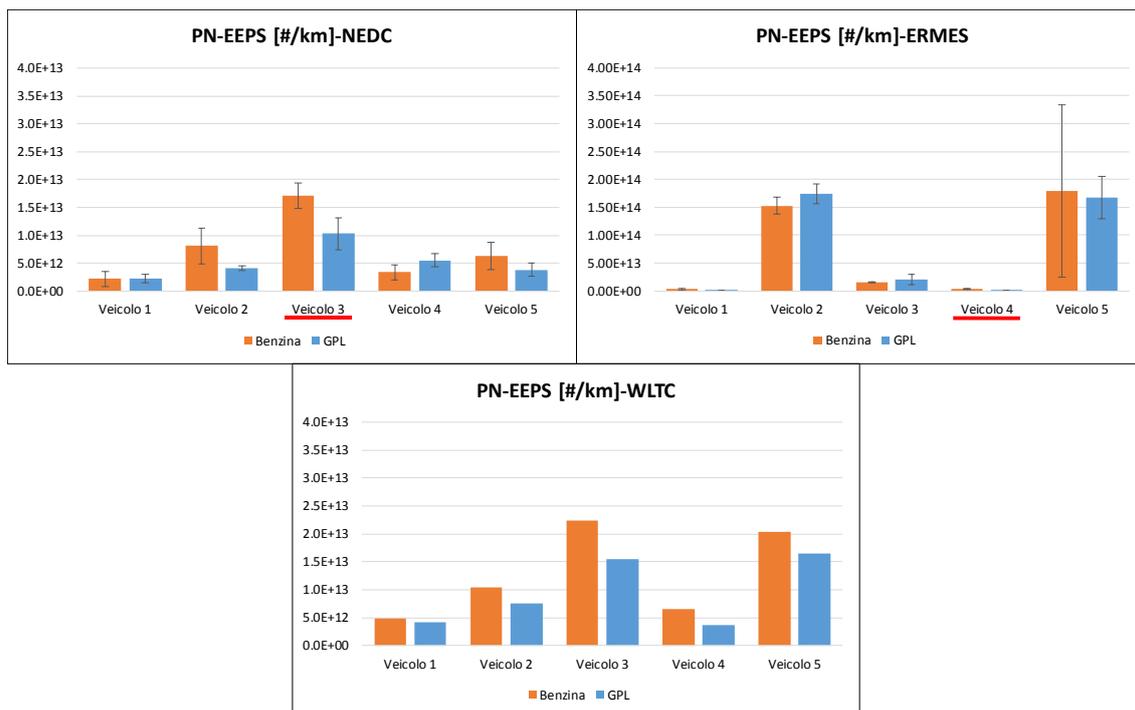


Figura 58 - Confronto tra le emissioni medie di PN rilevate tramite EEPS sul ciclo NEDC, ERMES e WLTC testando i veicoli sia con l'alimentazione a benzina, sia con quella a GPL. I valori proposti per i cicli NEDC ed ERMES sono stati ottenuti mediando le emissioni rilevate sulle 3 prove selezionate per ogni alimentazione. I margini di errore rappresentano l'intervallo di confidenza al 95% calcolato sulle 3 prove.

Le emissioni di PM soot (Figura 59) sui test effettuati sono risultate in genere molto basse. Con l'alimentazione a GPL, rispetto a quella a benzina, è stata evidenziata una riduzione statisticamente significativa dell'emissione di soot sul ciclo ERMES per il veicolo 3 (-84,7%), così come una riduzione dell'emissione per tutte le autovetture testate, ad eccezione del veicolo 1, sul ciclo WLTC (variazione media -27,2%, veicolo 1 compreso).

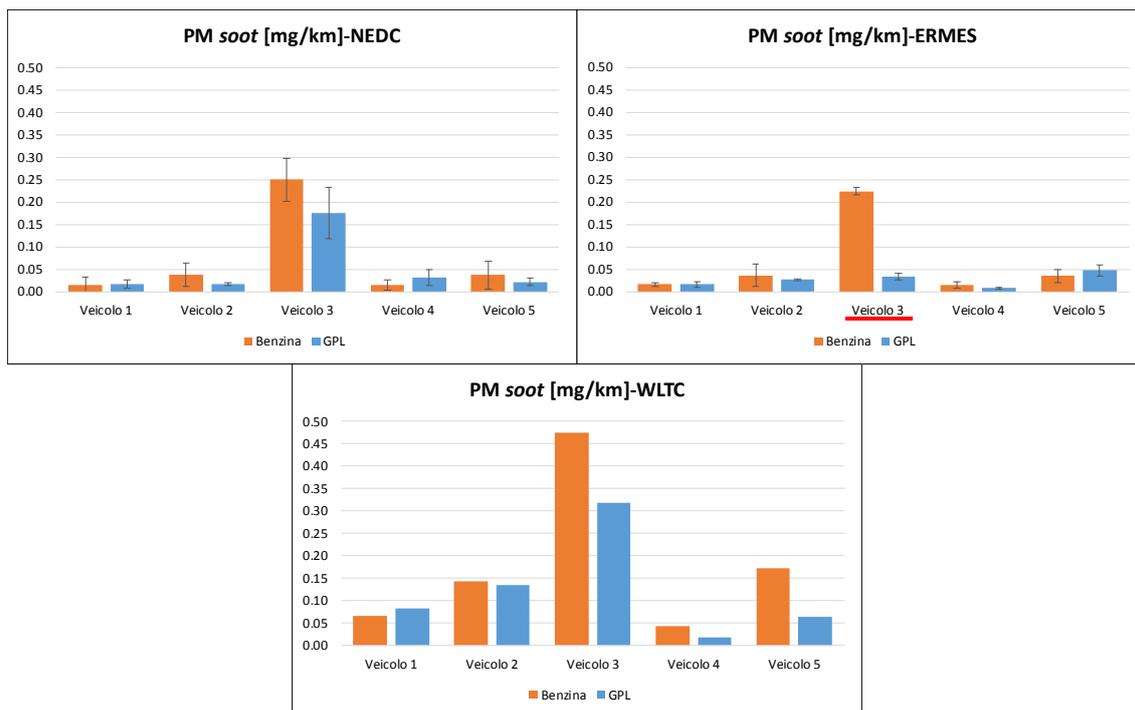


Figura 59 - Confronto tra le emissioni medie di PM soot rilevate sul ciclo NEDC, ERMES e WLTC testando i veicoli sia con l'alimentazione a benzina, sia con quella a GPL. I valori proposti per i cicli NEDC ed ERMES sono stati ottenuti mediando le emissioni rilevate sulle 3 prove selezionate per ogni alimentazione. I margini di errore rappresentano l'intervallo di confidenza al 95% calcolato sulle 3 prove.

#### 4.1.3 Emissioni gassose non regolamentate

Come si evince dalla Figura 60, con l'alimentazione a GPL, rispetto a quella a benzina, è stato rilevato un incremento statisticamente significativo dell'emissione di  $\text{NH}_3$  sul ciclo NEDC per il veicolo 3 (+82,1%), veicolo 4 (+183,4%) e veicolo 5 (+701,1%), mentre sul ciclo ERMES non sono state rilevate variazioni statisticamente significative. Tutte le autovetture testate, ad eccezione del veicolo 2, con l'alimentazione a GPL rispetto a quella a benzina, hanno riportato un incremento emissivo di  $\text{NH}_3$  sul ciclo WLTC (variazione media +76,8%, veicolo 2 compreso).

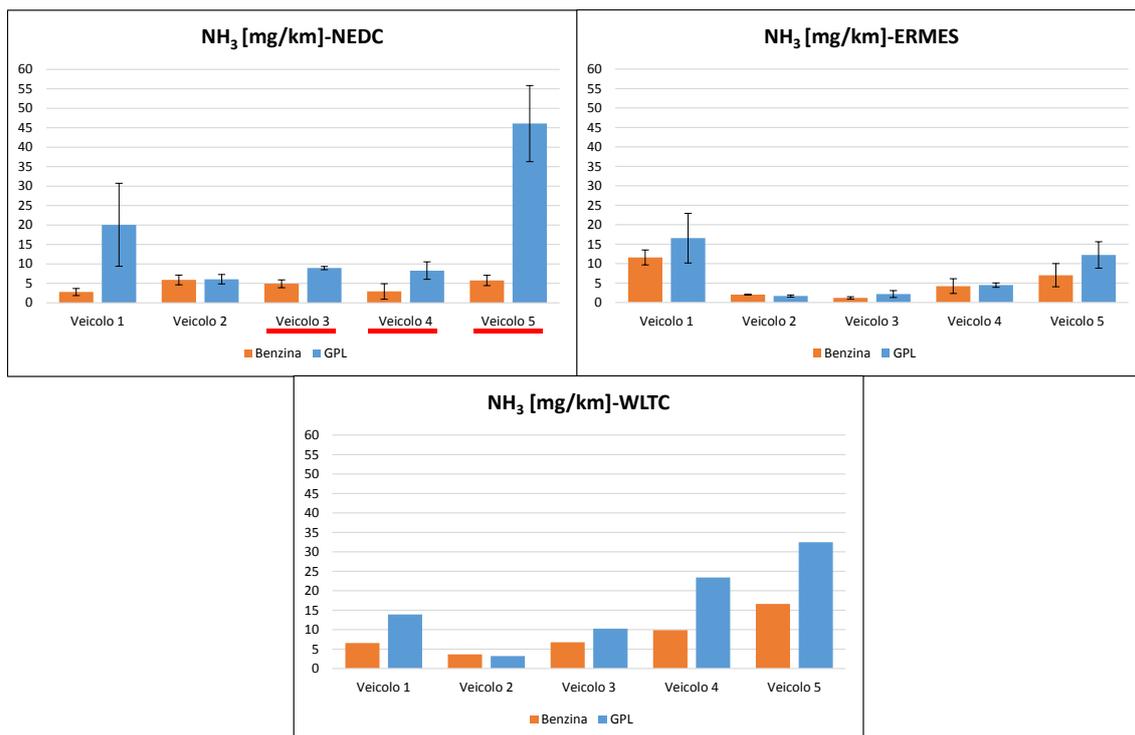


Figura 60 - Confronto tra le emissioni medie di NH<sub>3</sub> rilevate sul ciclo NEDC, ERMES e WLTC testando i veicoli sia con l'alimentazione a benzina, sia con quella a GPL. I valori proposti per i cicli NEDC ed ERMES sono stati ottenuti mediando le emissioni rilevate sulle 3 prove selezionate per ogni alimentazione. I margini di errore rappresentano l'intervallo di confidenza al 95% calcolato sulle 3 prove.

Con l'alimentazione a GPL, rispetto a quella a benzina, è stato rilevato un incremento statisticamente significativo dell'emissione di NO<sub>2</sub> (Figura 61) sul ciclo NEDC per il veicolo 3 (+25,1%) e sul ciclo ERMES per il veicolo 1 (+26,0%), veicolo 2 (+5,1%) e veicolo 3 (+24,0%). Tutte le autovetture testate, ad eccezione del veicolo 2, con l'alimentazione a GPL rispetto a quella a benzina, hanno riportato un incremento emissivo di NO<sub>2</sub> sul ciclo WLTC (variazione media +13,5%, veicolo 2 compreso).

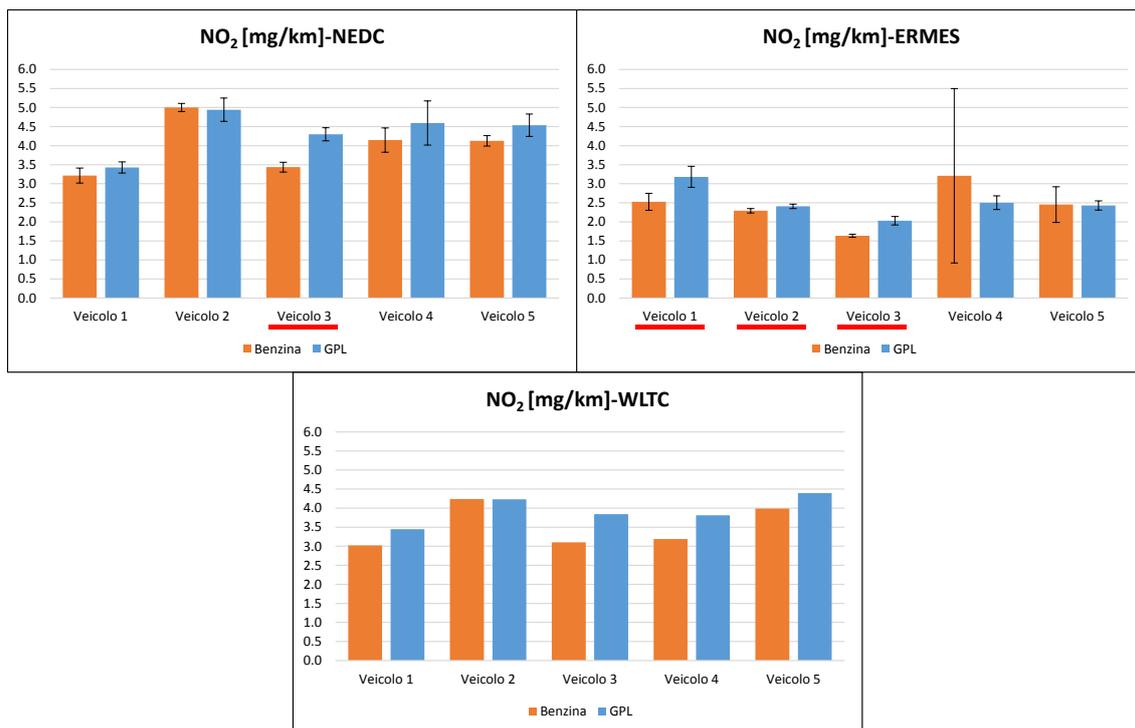


Figura 61 - Confronto tra le emissioni medie di NO<sub>2</sub> rilevate sul ciclo NEDC, ERMES e WLTC testando i veicoli sia con l'alimentazione a benzina, sia con quella a GPL. I valori proposti per i cicli NEDC ed ERMES sono stati ottenuti mediando le emissioni rilevate sulle 3 prove selezionate per ogni alimentazione. I margini di errore rappresentano l'intervallo di confidenza al 95% calcolato sulle 3 prove.

Con l'alimentazione a GPL, rispetto a quella a benzina, è stato rilevato un incremento statisticamente significativo dell'emissione di 1,3-Butadiene (Figura 62) sul ciclo NEDC per il veicolo 1 (+139,3%), veicolo 3 (+33,0%) e veicolo 5 (+74,6%), sul ciclo ERMES per il veicolo 1 (+50,4%) e veicolo 3 (+26,1%). Tutte le autovetture testate, con l'alimentazione a GPL rispetto a quella a benzina, hanno riportato un incremento emissivo di 1,3-Butadiene sul ciclo WLTC (variazione media +34,7%).

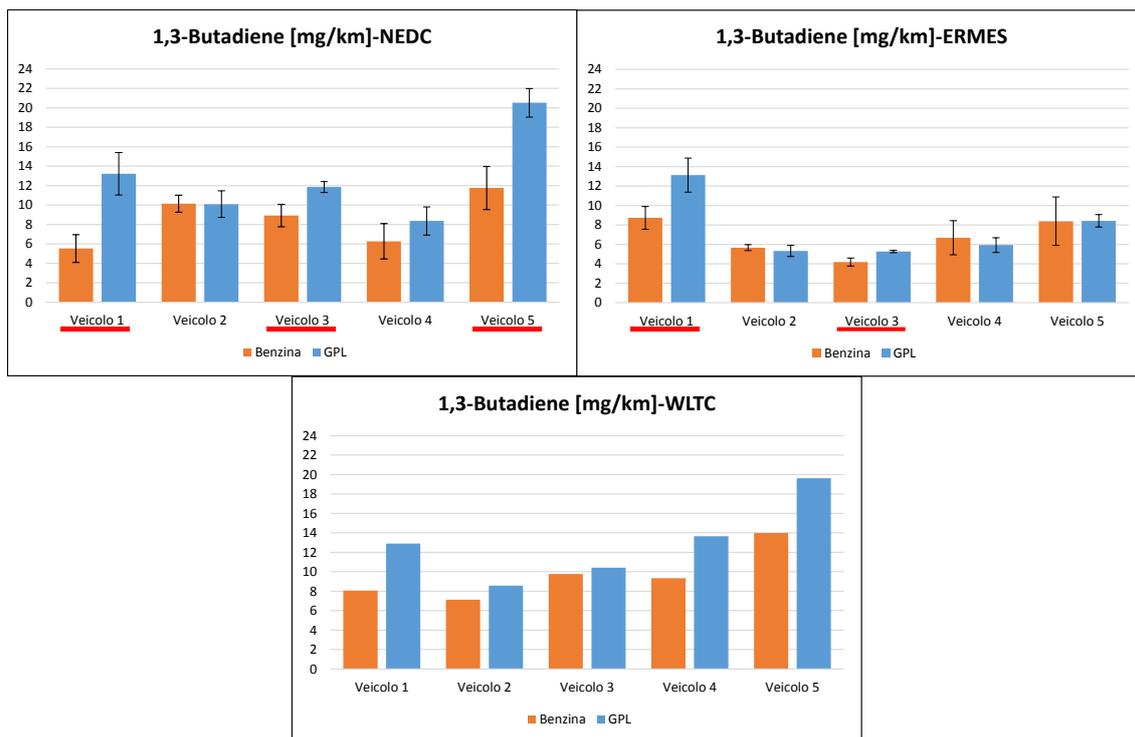


Figura 62 - Confronto tra le emissioni medie di 1,3-Butadiene rilevate sul ciclo NEDC, ERMES e WLTC testando i veicoli sia con l'alimentazione a benzina, sia con quella a GPL. I valori proposti per i cicli NEDC ed ERMES sono stati ottenuti mediando le emissioni rilevate sulle 3 prove selezionate per ogni alimentazione. I margini di errore rappresentano l'intervallo di confidenza al 95% calcolato sulle 3 prove.

Con l'alimentazione a GPL, rispetto a quella a benzina, è stato rilevato un incremento statisticamente significativo dell'emissione di Formaldeide (Figura 63) sul ciclo NEDC per il veicolo 5 (+294,6%). Le emissioni di Formaldeide sul ciclo ERMES, eseguito con partenza a motore caldo, sono sostanzialmente assenti per via del funzionamento ad alta temperatura del catalizzatore durante tutto il ciclo. Sul ciclo WLTC, dal confronto tra le due tipologie di alimentazione e per tutte le autovetture testate, non è stato identificato un andamento comune delle emissioni di Formaldeide.

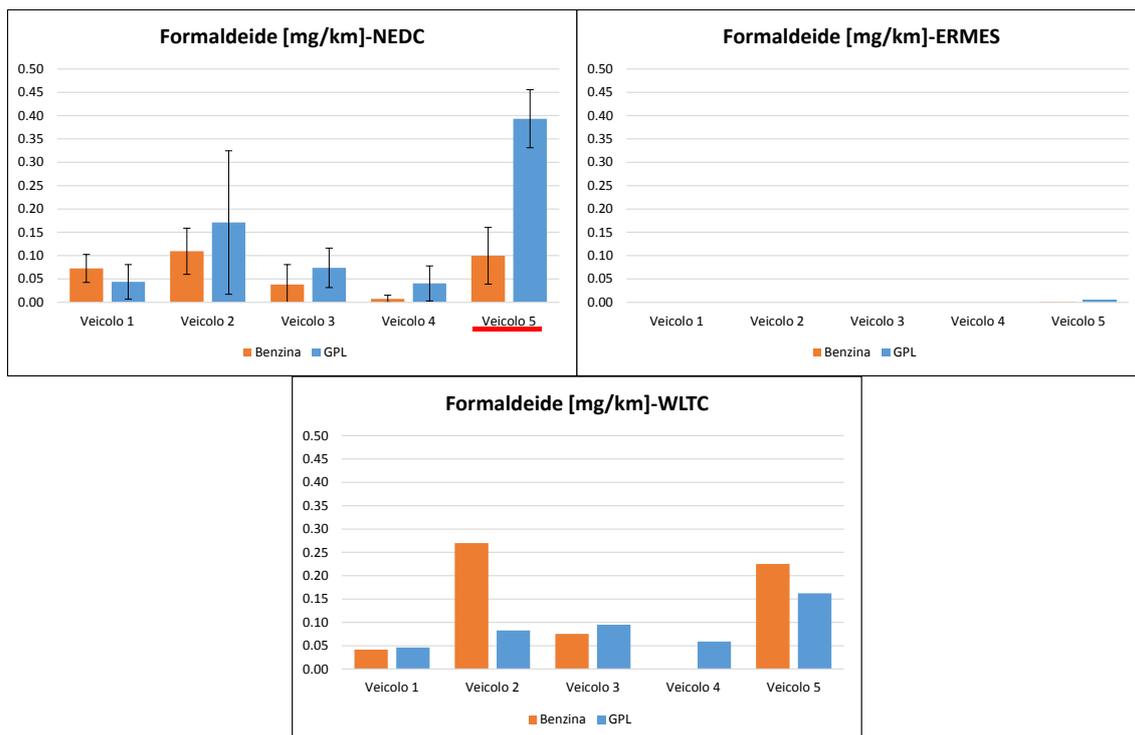


Figura 63 - Confronto tra le emissioni medie di Formaldeide rilevate sul ciclo NEDC, ERMES e WLTC testando i veicoli sia con l'alimentazione a benzina, sia con quella a GPL. I valori proposti per i cicli NEDC ed ERMES sono stati ottenuti mediando le emissioni rilevate sulle 3 prove selezionate per ogni alimentazione. I margini di errore rappresentano l'intervallo di confidenza al 95% calcolato sulle 3 prove.

Con l'alimentazione a GPL, rispetto a quella a benzina, è stato rilevato un incremento statisticamente significativo dell'emissione di Benzene (Figura 64) sul ciclo NEDC per il veicolo 2 (+69,3%) e veicolo 5 (+300,7%), così come, per gli stessi veicoli, sul ciclo ERMES (+207,5% per il veicolo 2 e +274,6% per il veicolo 5). Tutte le autovetture testate, con l'alimentazione a GPL rispetto a quella a benzina, hanno riportato un incremento emissivo di Benzene sul ciclo WLTC (variazione media +311,0%).

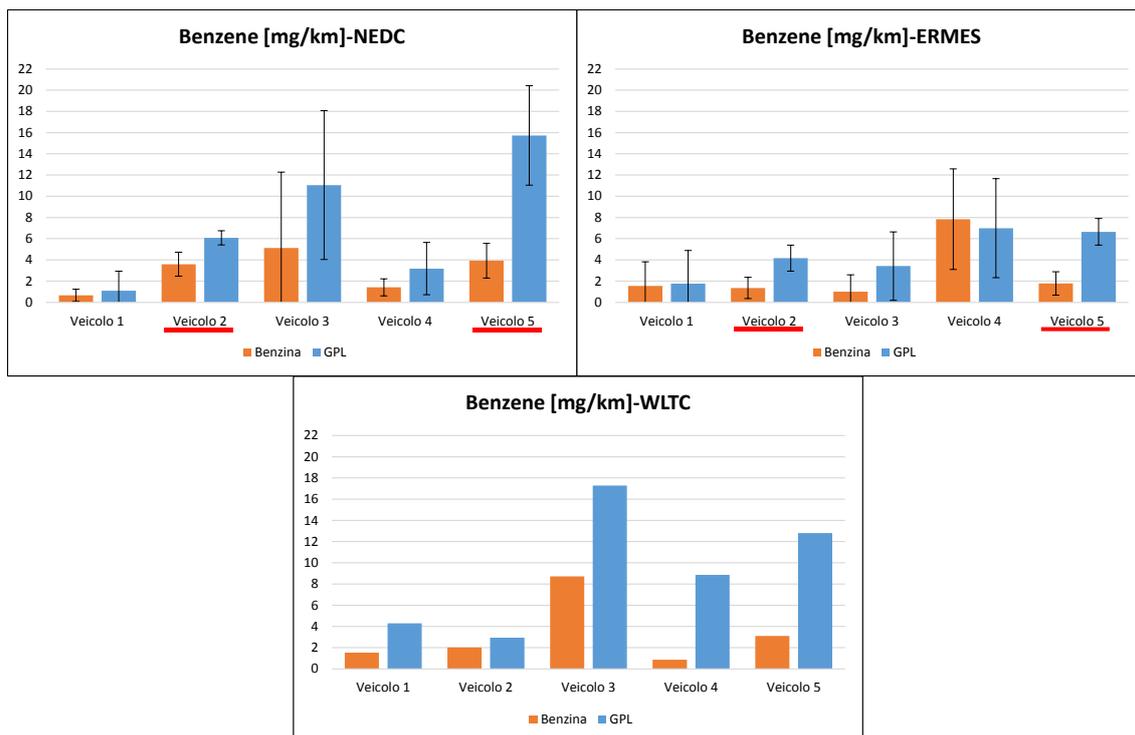


Figura 64 - Confronto tra le emissioni medie di Benzene rilevate sul ciclo NEDC, ERMES e WLTC testando i veicoli sia con l'alimentazione a benzina, sia con quella a GPL. I valori proposti per i cicli NEDC ed ERMES sono stati ottenuti mediando le emissioni rilevate sulle 3 prove selezionate per ogni alimentazione. I margini di errore rappresentano l'intervallo di confidenza al 95% calcolato sulle 3 prove.

Come si evince da Figura 65, con l'alimentazione a GPL, rispetto a quella a benzina, è stato rilevato un incremento statisticamente significativo dell'emissione di N<sub>2</sub>O sul ciclo NEDC per il veicolo 1 (+49,3%) e sul ciclo ERMES per il veicolo 1 (+74,2%) e veicolo 3 (+35,8%). Come per le emissioni di Formaldeide, sul ciclo WLTC, dal confronto tra le due tipologie di alimentazione e per tutte le autovetture testate, non è stato identificato un andamento comune delle emissioni di N<sub>2</sub>O.

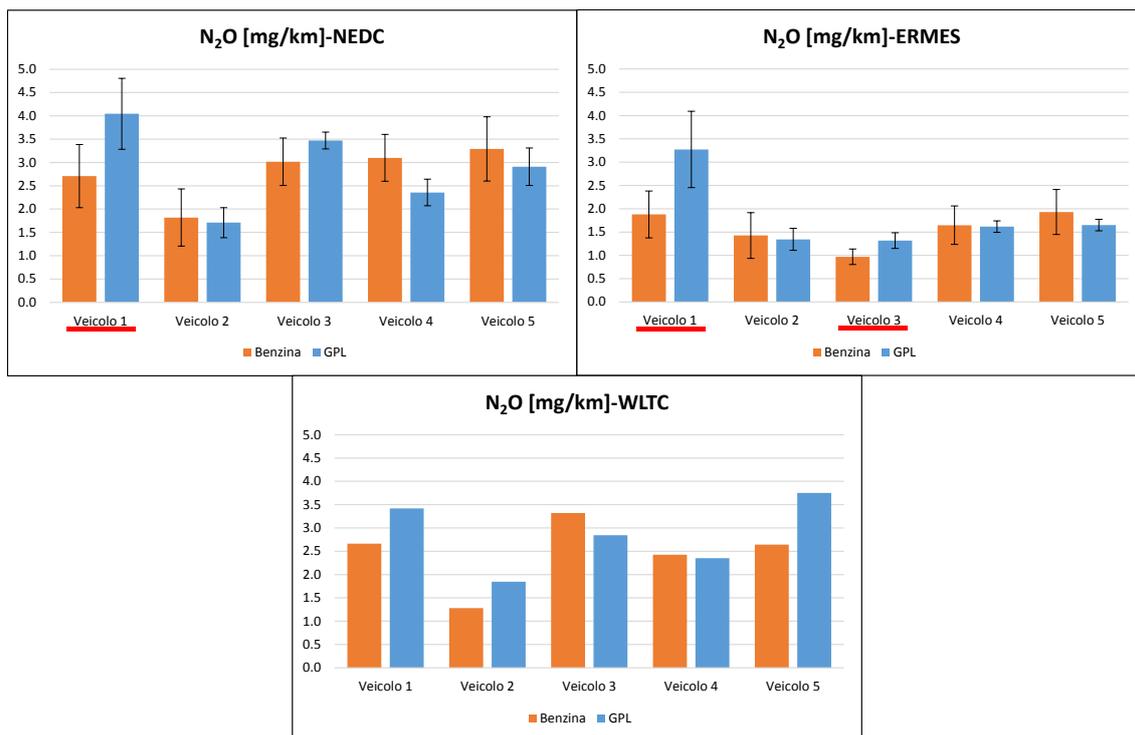


Figura 65 - Confronto tra le emissioni medie di N<sub>2</sub>O rilevate sul ciclo NEDC, ERMES e WLTC testando i veicoli sia con l'alimentazione a benzina, sia con quella a GPL. I valori proposti per i cicli NEDC ed ERMES sono stati ottenuti mediando le emissioni rilevate sulle 3 prove selezionate per ogni alimentazione. I margini di errore rappresentano l'intervallo di confidenza al 95% calcolato sulle 3 prove.

Dai risultati proposti nelle Figure 49-65 è possibile dedurre che con il veicolo 2, ovvero quello dotato di potenza massima maggiore (115 kW @6000 rpm) tra le autovetture testate, sono state rilevate le maggiori emissioni di THC, NMHC, CO<sub>2</sub>, PM, NO<sub>2</sub> e i maggiori consumi di combustibile.

Con il veicolo 3 invece, unico dotato di sistema di alimentazione ad iniezione diretta, rispetto agli altri veicoli sono state rilevate da un lato emissioni molto basse di CO e dall'altro emissioni maggiori di PM soot e del numero di particelle, tanto da aver superato, nel caso di alimentazione a benzina, il limite emissivo Euro 6 ( $6 \cdot 10^{11}$  #/km) previsto per i motori GDI.

## 4.2 PROVE RDE

Al termine di ogni prova, i dati raccolti dal sistema PEMS sono stati processati tramite il software *AVL Concerto* (aggiornato alla versione *PEMS\_Rel\_9\_B162\_HF1\_v2*) che ha generato i valori delle emissioni misurate in termini di massa/km. Come previsto dalla normativa, per ogni prova RDE sono stati inseriti nel software *Concerto* i valori delle emissioni di CO<sub>2</sub> rilevati sulla fase *Low*, *Middle* ed *Extra-high* del ciclo WLTC eseguito in laboratorio con la medesima autovettura e alimentazione, così da confrontare lo stile di guida del laboratorio con quello adottato su strada attraverso il metodo *Moving Average Window (MAW)*. Nella Figura 66, a titolo esemplificativo, è stato riportato il grafico del metodo MAW applicato alla prova n°2 eseguita con il veicolo 2 alimentato a benzina.

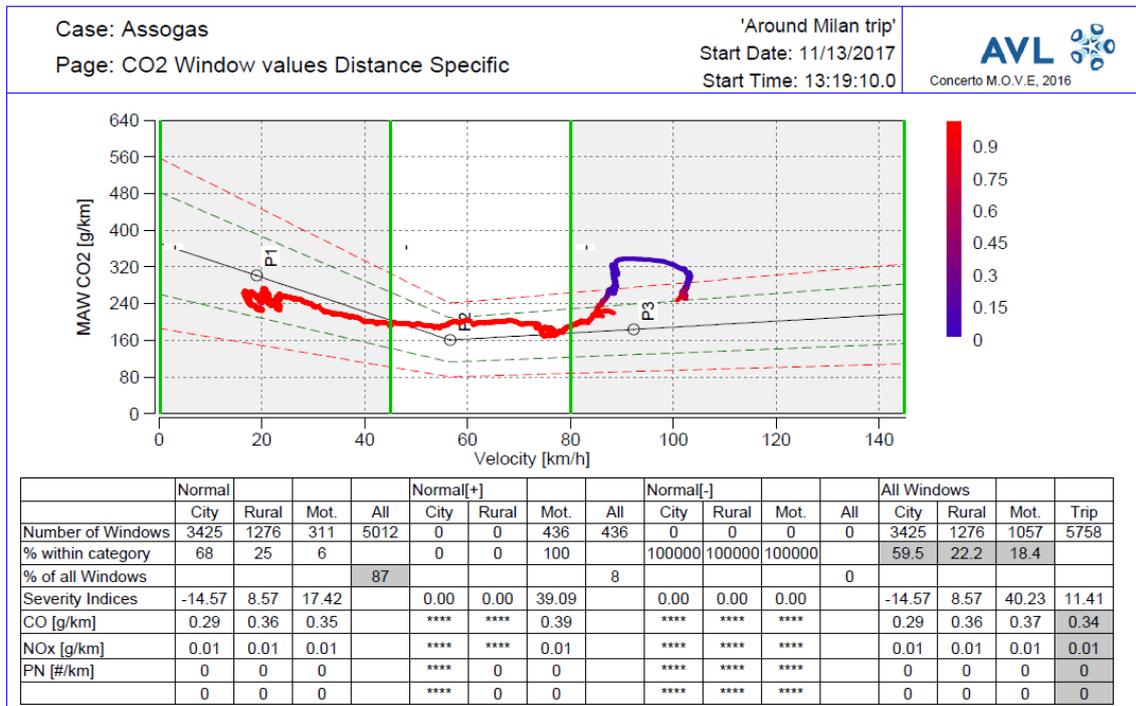


Figura 66 - Finestre per il confronto tra l'emissione di CO<sub>2</sub> della prova RDE e di quella sul ciclo WLTC. Il grafico riguarda la prova n°2 eseguita con l'alimentazione a benzina per il veicolo 2.

Nella Figura 66 le linee tratteggiate verdi rappresentano la tolleranza primaria (*Normal Windows*), quelle rosse la tolleranza secondaria (*Severe Windows*), mentre la linea continua in rosso e blu identifica l'emissione di CO<sub>2</sub> rilevata nel corso della prova RDE. La casistica proposta evidenzia un ottimo stile di guida nel corso della fase urbana e

rurale: l'emissione di CO<sub>2</sub> della prova RDE ricade all'interno della tolleranza primaria calcolata dal software e questo rende quindi ben confrontabili le emissioni misurate con quelle rilevate in laboratorio. La fase autostradale evidenzia invece uno stile di guida non corretto: l'emissione di CO<sub>2</sub> della prova RDE eccede la tolleranza primaria per il 70,6% della durata dell'intera fase e questo rende quindi le emissioni misurate non adatte ad un confronto con quelle rilevate in laboratorio.

Le emissioni di CO<sub>2</sub> misurate nel corso dei test RDE effettuati sono rientrate nella fascia di tolleranza primaria per oltre il 50% della durata complessiva di ogni fase urbana e rurale ad eccezione della prova n°1 (con alimentazione a benzina) del veicolo 1 e della prova n°4 (con alimentazione a GPL) del veicolo 4. L'emissione di CO<sub>2</sub> rilevata durante la fase autostradale è invece risultata essere, probabilmente a causa di problematiche sull'*exhaust flow meter tube* utilizzato, spesso superiore alla tolleranza primaria per oltre il 50% della durata dell'intera fase.

Il software Concerto ha inoltre valutato, per ogni prova effettuata, il rispetto ("*pass*" evidenziato in verde) o il mancato rispetto ("*fail*" evidenziato in rosso) delle condizioni dinamiche e al contorno previste da normativa per le prove RDE a fini omologativi. Nelle Figure 67-68 è proposto, di nuovo a titolo esemplificativo, il *report* delle condizioni della prova n°2 eseguita con il veicolo 2 alimentato a benzina. La sezione "*On-road Emission Measurement*" presente in Figura 68 è evidenziata di colore rosso poiché non è stata verificata la calibrazione degli analizzatori a seguito del test, bensì solamente prima dell'inizio della prova.

Case: Assogas		'Around Milan trip'				AVL 	
Page: RDE overview (1)		Start Date: 11/13/2017				Concerto M.O.V.E., 2016	
		Start Time: 13:19:10.0					
<b>Trip Requirements</b>							
Velocity Thresholds	km/h	Urban [1-60[	Rural [60-90[	Motorway [90- ...	Total		
ave Velocity GPS	km/h	22.0	79.0	101.4	42.5		
share <= 1km/h; minutes >= 100 km/h		27.8 %		9.7 min			
Trip Share GPS Distance	%	35.9	30.8	33.3			
Distance GPS	km	26.30	22.59	24.44	73.33		
Duration	min	72	17	14	103		
Max. Velocity	km/h			112.9			
% Velocity 145 - 160 km/h (max 3%)				0			
<b>Total Trip Requirements</b>							
Trip Shares						pass/fail	
Urban 34% +10% and >=29%						pass	
Rural 33% +10%						pass	
Motorway 33% +10%						pass	
Minimum Distance							
Urban 16 km						pass	
Rural 16 km						pass	
Motorway 16 km						pass	
Total Trip Duration 90 - 120 min						pass	
<b>Urban Requirements</b>							
Average Velocity 15-40 km/h						pass	
Stop periods 6 -30% urban time						pass	
<b>Motorway Requirements</b>							
5 Minutes >= 100 km/h						pass	
Velocity covers 90 - 110 km/h						pass	
<b>Test Completeness</b>							
Urban 15% Windows						pass	
Rural 15% Windows						pass	
Motorway 15% Windows						pass	
<b>Test Normality</b>							
Urban 50% in Primary Tolerance						pass	
Rural 50% in Primary Tolerance						pass	
Motorway 50% in Primary Tolerance						fail	
<b>Verify Trip Completeness and Normality</b>							
Velocity Thresholds	km/h	[0-45[	[45-80[	[80-145]			
# CO2 Windows	-	3425	1276	1057	5758		
% CO2 Windows	%	59.5	22.2	18.4			
# CO2 Normal Windows	-	3425	1276	311	5012		
% CO2 Normal Windows	%	100.0	100.0	29.4	87.0		
# CO2 Severe Windows	-	0	0	436	436		
% CO2 Severe Windows	%	0.0	0.0	41.2			
Severity Index	%	-14.6	8.6	40.2	11.4		
DPF Regeneration	n/a						
Number Vehicle Stops > 10s (min 1)	35						
Tolerance Normal Driving (%)	30						
Pos. Elev. Gain (max. 1200 m/100km)	408						
Delta Start / End Altitude (max 100 m)	26						

Figura 67 – Parametri da rispettare per il superamento della prova RDE a fini omologativi a partire dal 1 Settembre 2017. La figura riassume i parametri della prova n°2 eseguita con l'alimentazione a benzina per il veicolo 2. Come precedentemente analizzato, per la prova proposta, non è stata rispettata la tolleranza primaria dell'emissione di CO<sub>2</sub> per almeno il 50% della durata della fase autostradale e, di conseguenza, tale condizione è stata evidenziata in rosso.

Case: Assogas		'Around Milan trip'				AVL 	
Page: RDE overview (2)		Start Date: 11/13/2017				Concerto M.O.V.E., 2016	
		Start Time: 13:19:10.0					
<b>Trip Dynamics</b>							
a_res (min resolution positive acceleration)	m/s <sup>2</sup>	0.00000				passed if ares <= 0.01	pass
velocity filtered		NO					
<b>Velocity Thresholds</b>							
# acceleration points (a > 0.1 m/s <sup>2</sup> )	-	Urban [1-60[	Rural [60-90[	Motorway [90- ...		>= 150	pass
v (average velocity)	km/h	1428	255	236			
va_pos95 (95th perc va_pos (a > 0.1 m/s <sup>2</sup> ))	km/h	22.0	79.0	101.4			
RPA (avg positive acceleration, a > 0.1 m/s <sup>2</sup> )	m/s <sup>2</sup>	9.02	15.02	16.28			
va_pos threshold1	m/s <sup>2</sup>	0.2116	0.0775	0.0795			
va_pos threshold2		17.43	25.18	28.22			
RPA threshold		20.60	24.82	26.49			
		0.1403	0.0492	0.0133			
<b>Trip Validity va_pos[95] (invalid if)</b>							
v <= 74.6 km/h and va_pos[95] > va_pos threshold1		pass	pass	pass			
v > 74.6 km/h and va_pos[95] > va_pos threshold2		pass	pass	pass			
<b>Trip Validity RPA (invalid if)</b>							
v <= 94.05 and RPA < RPA threshold		pass	pass	pass			
v > 94.05 and RPA < 0.025		pass	pass	pass			
<b>On-road Emission Measurements</b>							
99th Percentile * 0.9		NO [ppm]	NO2 [ppm]	CO [ppm]	CO2 [%]		
Span Gas		34	2	6726	12.5		
% Meas Values >= 2 * Span Gas		#ERROR 0.99	#ERROR 1.00	#ERROR 1.00	#ERROR 1.00	span gas > 0.9 * 99th percentile	<= 0.01
minutes pre test before main test				7.3		<= 60	
minutes post test after main test				0.9		<= 60	

Figura 68 - Parametri da rispettare per il superamento della prova RDE a fini omologativi a partire dal 1 Settembre 2018 per i nuovi modelli (Euro 6 D Temp). La figura riassume i parametri della prova n°2 eseguita con l'alimentazione a benzina per il veicolo 2.

In questo capitolo sono proposti i grafici rappresentanti le emissioni rilevate nel corso delle prove RDE. A differenza di quanto fatto per i risultati delle prove di laboratorio, sulla sinistra sono riportate le emissioni registrate con l'alimentazione a benzina, mentre sulla destra quelle con l'alimentazione a GPL. Le linee orizzontali rappresentano l'emissione media di ogni inquinante per l'intera flotta di veicoli testata, così da rendere confrontabili le emissioni medie rilevate con le due tipologie di combustibili.

A titolo esemplificativo, considerando che tutti i veicoli testati erano in possesso di un'omologazione (Euro 6 b e c) per la quale non era ancora previsto il superamento di un test RDE, le emissioni di PN e NOx sono state confrontate con gli attuali limiti Not-To-Exceed Euro 6 D Temp calcolati tramite l'equazione generica:

$$NTE_{INQUINANTE\ i} = CF_{INQUINANTE\ i} \times \text{limite Euro 6}_{INQUINANTE\ i}$$

Applicata di seguito ai due casi specifici:

$$NTE_{PN} = 1,5 \times 6 \times 10^{11} \frac{\#}{km} = 9 \times 10^{11} \frac{\#}{km}$$

$$NTE_{NOx} = 2,1 \times 60 \frac{mg_{NOx}}{km} = 126 \frac{mg_{NOx}}{km}$$

Come si evince dalla Figura 69, l'emissione di PN generata dal veicolo 3 con l'alimentazione a benzina è l'unica che non rispetterebbe il limite NTE imposto sul numero di particelle, mentre tutte le altre emissioni di PN e NOx, rilevate dai test RDE effettuati, sono risultate molto inferiori ai rispettivi limiti NTE. L'emissione di PN non è stata misurata durante le prove eseguite con il veicolo 2, mentre per tutte le altre autovetture, con l'alimentazione a GPL rispetto a quella a benzina, è stata rilevata una significativa riduzione (variazione media -68,2%) dell'emissione del numero di particelle. Le emissioni di NOx prodotte con le alimentazioni a GPL sono risultate leggermente superiori, per tutti i veicoli testati, rispetto a quelle prodotte con le alimentazioni a benzina (variazione media +27,6%). Il confronto tra le emissioni di CO risulta invece essere influenzato dalla misura rilevata con il veicolo 1 alimentato a benzina e, quindi, poco significativo.

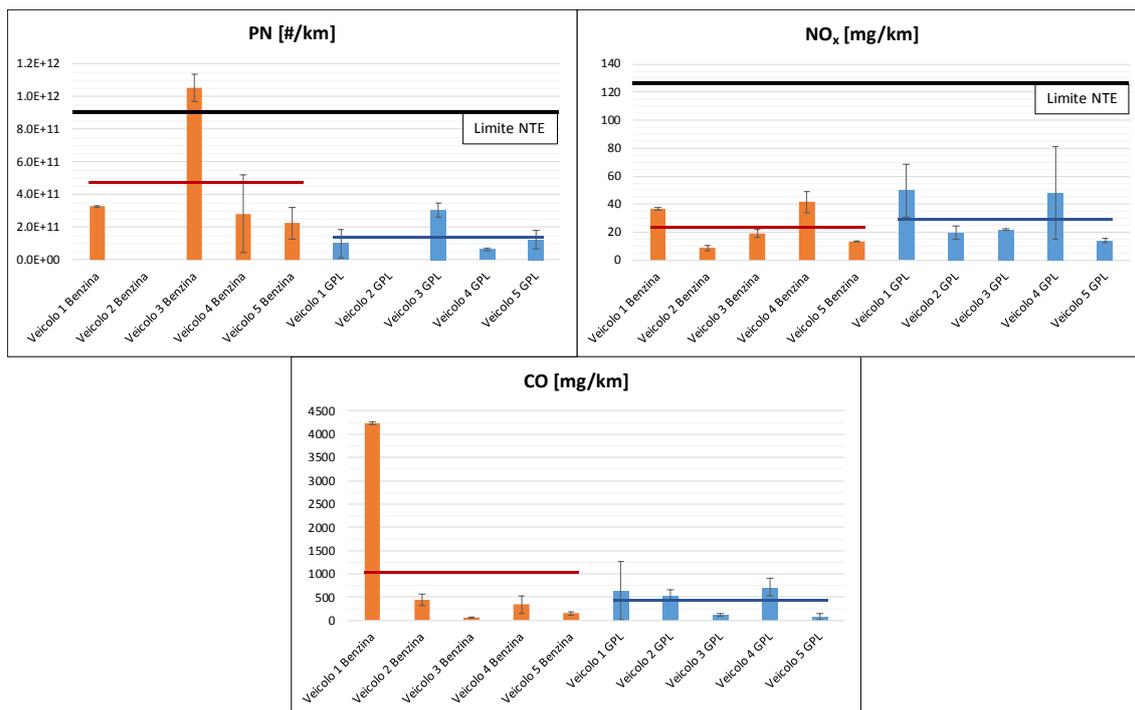


Figura 69 - Confronto tra le emissioni medie di PN, NO<sub>x</sub> e CO rilevate nel corso dei test RDE. L'emissione riportata per ogni alimentazione di ogni veicolo è stata calcolata come valor medio dei due test effettuati con tale configurazione. Le linee rosse rappresentano le emissioni medie dei 5 veicoli con alimentazione a benzina (PN =  $4,72 \cdot 10^{11}$  #/km, NO<sub>x</sub> = 24 mg/km, CO = 1048 mg/km) e le linee blu quelle con alimentazione a GPL (PN =  $1,48 \cdot 10^{11}$  #/km, NO<sub>x</sub> = 30,6 mg/km, CO = 420 mg/km). Le linee nere rappresentano gli ipotetici limiti Not-To-Exceed Euro 6 D Temp (PN =  $9 \cdot 10^{11}$  #/km, NO<sub>x</sub> = 126 mg/km).

Nonostante non siano regolamentate dalle attuali normative, anche le emissioni di idrocarburi incombusti totali (THC) e di metano (CH<sub>4</sub>) sono state misurate nel corso dei test RDE (con l'eccezione di quelli effettuati sul veicolo 2). Come si evince dalla Figura 70, nel passaggio dall'alimentazione a benzina a quella a GPL non è però stata rilevata una differenza significativa dell'emissione di tali inquinanti. Il valore medio dell'emissione di THC e CH<sub>4</sub> rilevato in ogni prova RDE è risultato essere molto basso per via della durata relativamente breve della fase con motore freddo (in cui il catalizzatore non ha ancora raggiunto la temperatura di regime e quindi un'alta efficienza di abbattimento di THC e CH<sub>4</sub>) rispetto alla durata complessiva (90-120 minuti) di ogni test.

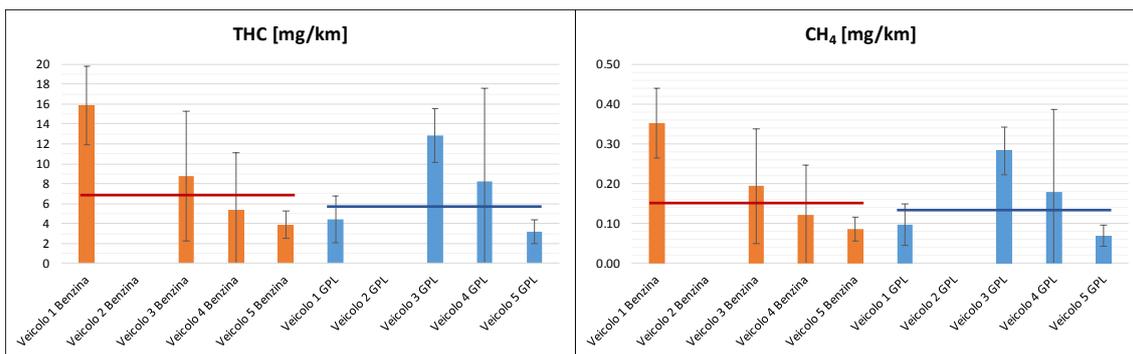


Figura 70 - Confronto tra le emissioni medie di THC e CH<sub>4</sub> rilevate nel corso dei test RDE. L'emissione riportata per ogni alimentazione di ogni veicolo è stata calcolata come valor medio dei due test effettuati con tale configurazione. Le linee rosse rappresentano le emissioni medie dei 5 veicoli con alimentazione a benzina (THC = 6,8 mg/km, CH<sub>4</sub> = 0,15 mg/km) e le linee blu quelle con alimentazione a GPL (THC = 5,7 mg/km, CH<sub>4</sub> = 0,13 mg/km).

Anche le emissioni di CO<sub>2</sub> e il consumo di combustibile (Figura 71) sono stati misurati nel corso dei test RDE e i valori ottenuti sono molto ben confrontabili con i risultati delle prove di laboratorio: nel passaggio all'alimentazione a GPL da quella a benzina, le emissioni di CO<sub>2</sub> sono diminuite (variazione media -11,3%) e il consumo di combustibile è aumentato (variazione media +33,4%).

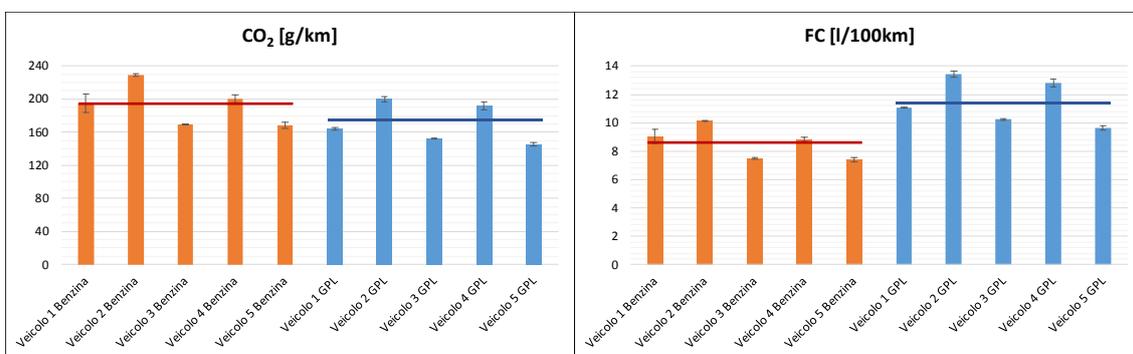


Figura 71 - Confronto tra le emissioni medie di CO<sub>2</sub> e i consumi medi rilevati nel corso dei test RDE. L'emissione e il consumo riportato per ogni alimentazione di ogni veicolo è stato calcolato come valor medio dei due test effettuati con tale configurazione. Le linee rosse rappresentano le emissioni e i consumi medi dei 5 veicoli con alimentazione a benzina (CO<sub>2</sub> = 192,3 g/km, FC = 8,6 l/100km) e le linee blu quelli con alimentazione a GPL (CO<sub>2</sub> = 170,6 g/km, FC = 11,4 l/100km).

Nella Tabella 15 è proposto un confronto riassuntivo delle emissioni e dei consumi rilevati per ogni tipologia di test effettuato con le diverse alimentazioni.

	BENZINA			GPL		
	NEDC	WLTC	RDE	NEDC	WLTC	RDE
CO [mg/km]	270,95	308,92	1047,84	465,34	472,48	419,64
THC [mg/km]	31,30	26,72	6,78	45,53	31,76	5,73
NMHC [mg/km]	28,56	24,59	-	40,25	28,08	-
NOx [mg/km]	13,40	16,74	24,00	8,74	14,54	30,62
CO <sub>2</sub> [g/km]	149,00	138,13	192,35	135,27	127,32	170,61
FC [l/100km]	6,42	5,96	8,58	8,49	7,99	11,44
PM [mg/km]	0,15	0,52	-	0,09	0,13	-
PN PMP [#/km]	2,69E+11	4,74E+11	4,72E+11	1,80E+11	2,92E+11	1,48E+11
PN ELPI [#/km]	1,66E+11	2,85E+11	-	9,83E+10	1,82E+11	-
PN EEPS [#/km]	7,42E+12	1,29E+13	-	5,22E+12	9,48E+12	-
PM soot [mg/km]	0,07	0,18	-	0,05	0,12	-
NH <sub>3</sub> [mg/km]	4,45	8,69	-	17,88	16,64	-
NO <sub>2</sub> [mg/km]	3,98	3,51	-	4,36	3,95	-
1,3-Butadiene [mg/km]	8,52	9,66	-	12,81	13,03	-
Formaldeide [mg/km]	0,07	0,12	-	0,14	0,09	-
Benzene [mg/km]	2,94	3,25	-	7,43	9,24	-
N <sub>2</sub> O [mg/km]	2,79	2,47	-	2,90	2,84	-

Tabella 15 - Confronto tra le emissioni e i consumi rilevati per ogni alimentazione e per ogni tipologia di test effettuato. I dati proposti per ogni ciclo sono stati ottenuti come media dei valori emissivi e dei consumi totali rilevati da ogni veicolo testato. Confrontando i 3 test considerati, per ogni alimentazione è stata evidenziata in rosso l'emissione maggiore e in verde quella minore.

Dai valori proposti nella Tabella 15 è possibile apprezzare la variazione delle emissioni e dei consumi in relazione al test eseguito:

- Tramite le prove RDE sono state rilevate, da un lato le maggiori emissioni medie di NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> e i maggiori consumi medi di combustibile e dall'altro le minori emissioni medie di THC per via della durata relativamente breve della fase con motore freddo (quando vengono generate le maggiori emissioni di THC) rispetto alla durata complessiva di ogni test (90-120 minuti);
- Tramite le prove eseguite sul ciclo WLTC sono state rilevate le maggiori emissioni medie di massa di particolato, numero di particelle, PM *soot*, 1,3-butadiene e benzene;
- Tramite le prove eseguite sul ciclo NEDC sono state rilevate le maggiori emissioni medie di THC, NMHC, NO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>O.

Sulla base dei dati proposti in Tabella 15 risulta quindi impossibile esprimere un giudizio generalizzato su quale tra le prove di laboratorio prese in considerazione, il "vecchio" NEDC e il "nuovo" WLTC, e quella RDE su strada porti, complessivamente, ad una stima maggiore delle emissioni generate dal settore del trasporto stradale oggetto di studio.

In Appendice A viene proposta una sintesi dei risultati ottenuti per ogni prova effettuata e per ogni veicolo testato.

## 5. ELABORAZIONE DATI

---

### 5.1 CONDIVISIONE DATI CON ISPRA

I risultati dei test effettuati da Innovhub-SSI, come concordato con il committente, sono stati utilizzati per determinare numerosi fattori di emissione, carenti nella letteratura tecnico-scientifica, di inquinanti e gas ad effetto serra da autovetture Euro 6 B e C con alimentazione a GPL.

Ai fini dell'aggiornamento dell'inventario italiano delle emissioni in atmosfera, è stato necessario, in considerazione delle specifiche richieste dal modello Copert, elaborare i risultati delle prove effettuate in modo da ottenere i fattori di emissione nel dettaglio per ambito urbano, extra-urbano ed autostradale.

Tramite le equazioni proposte in Appendice B sono stati calcolati i fattori di emissione medi totali e specifici per i diversi ambiti stradali di monossido di carbonio (CO), ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>), idrocarburi incombusti totali (THC), metano (CH<sub>4</sub>), ammoniaca (NH<sub>3</sub>), protossido di azoto (N<sub>2</sub>O) e particolato allo scarico (*PM exhaust*).

Per quanto riguarda i fattori di emissione di particolato allo scarico (*PM exhaust*), essendo disponibili solamente dati medi a livello di ciclo di guida complessivo, è stata effettuata un'ulteriore elaborazione con lo scopo di disaggregare i valori misurati delle emissioni di PM nei singoli contributi attribuibili ad ogni fase del ciclo considerato.

Il calcolo effettuato, anch'esso presente in Appendice B, che è stato proposto da Innovhub-SSI, discusso ed infine accettato da ISPRA, si basa sul peso relativo dell'emissione di PN [# / km] di ogni fase rispetto a quella dell'intero ciclo.

I fattori di emissione delle autovetture GPL Euro 6 dei segmenti *small* e *medium* calcolati sono stati utilizzati da ISPRA per l'aggiornamento della propria banca dati utilizzata per la redazione dell'inventario nazionale delle emissioni in atmosfera. I fattori di emissione "country specific" ottenuti a partire dai risultati dei test condotti da Innovhub SSI hanno quindi sostituito, all'interno del database di ISPRA, i fattori di emissione che erano stati

ricavati dalle funzioni di emissione presenti nel modello Copert, permettendo quindi di avvicinare maggiormente le stime emissive da trasporto stradale alla realtà italiana.

Nelle Figure 72-78 si rappresentano in confronto i nuovi fattori di emissione determinati grazie ai risultati dei test effettuati da Innovhub-SSI e i corrispondenti fattori precedentemente presenti all'interno della banca dati di ISPRA. I corrispondenti valori dei fattori di emissioni e le relative variazioni percentuali sono riassunti nella Tabella 16.

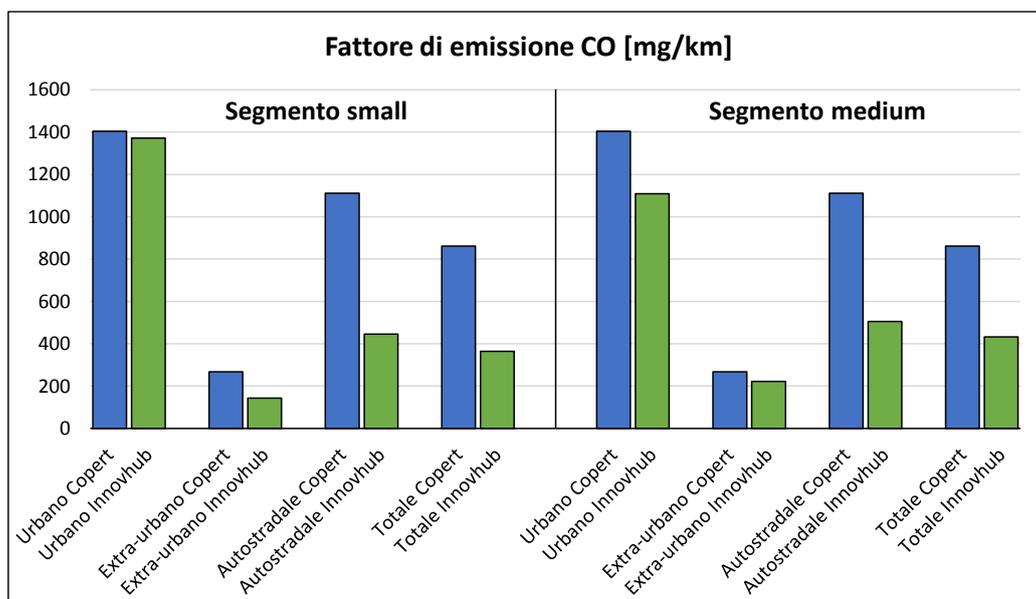


Figura 72 – Confronto tra i nuovi fattori di emissione di CO per le autovetture GPL Euro 6 del segmento small (< 1400 cc) e medium (1400 < cc < 2000) determinati a partire dai test di Innovhub SSI e i corrispondenti fattori di emissione, ricavati a partire dalle funzioni di emissione del modello Copert, precedentemente presenti per l’Euro 6 nella banca dati di ISPRA.

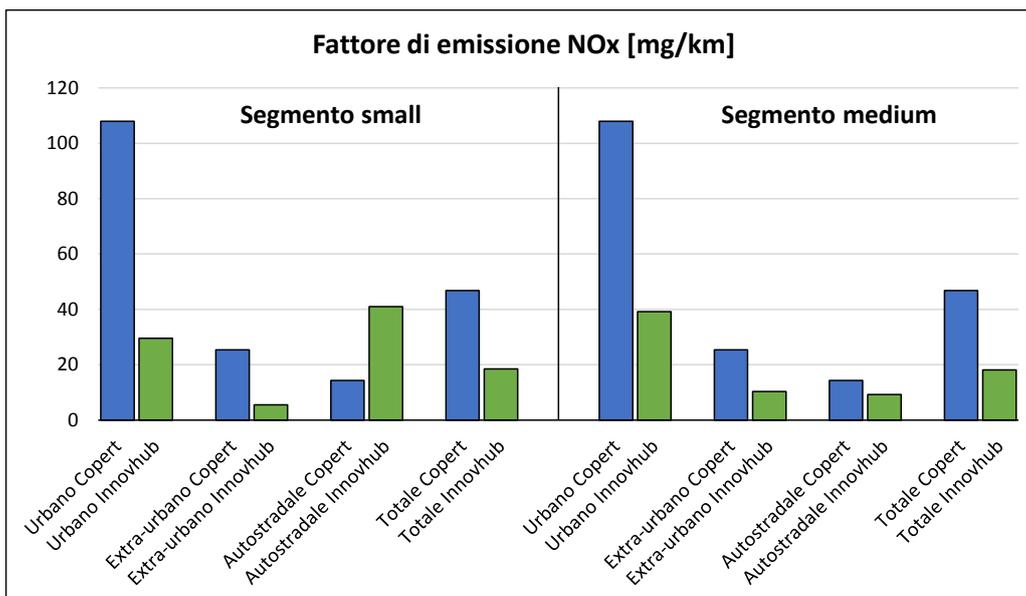


Figura 73 - Confronto tra i nuovi fattori di emissione di NOx per le autovetture GPL Euro 6 del segmento small (< 1400 cc) e medium (1400 < cc < 2000) determinati a partire dai test di Innovhub SSI e i corrispondenti fattori di emissione, ricavati a partire dalle funzioni di emissione del modello Copert, precedentemente presenti per l'Euro 6 nella banca dati di ISPRA.

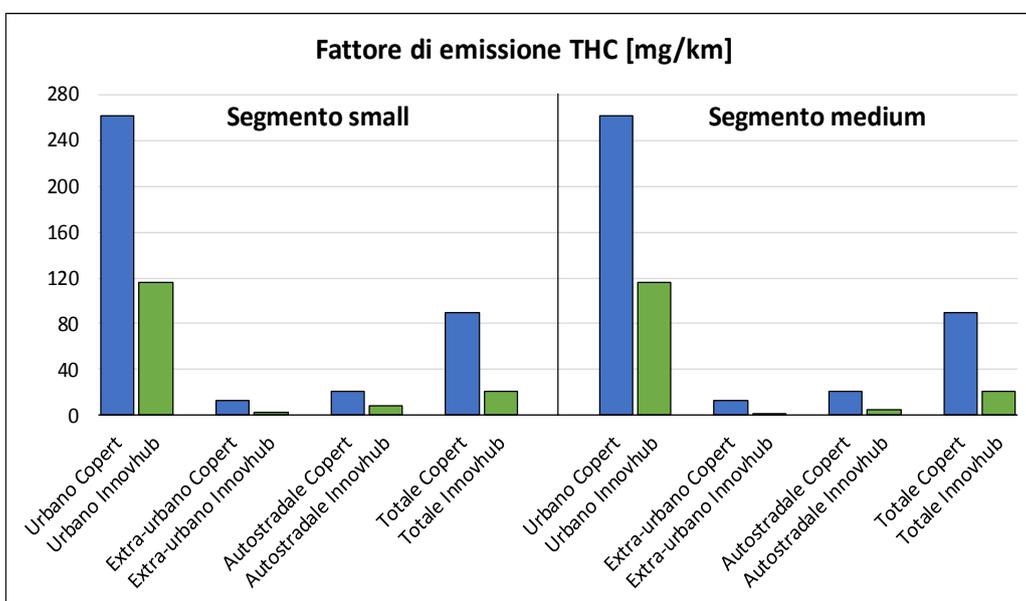


Figura 74 - Confronto tra i nuovi fattori di emissione di THC per le autovetture GPL Euro 6 del segmento small (< 1400 cc) e medium (1400 < cc < 2000) determinati a partire dai test di Innovhub e i corrispondenti fattori di emissione, ricavati a partire dalle funzioni di emissione del modello Copert, precedentemente presenti per l'Euro 6 nella banca dati di ISPRA.

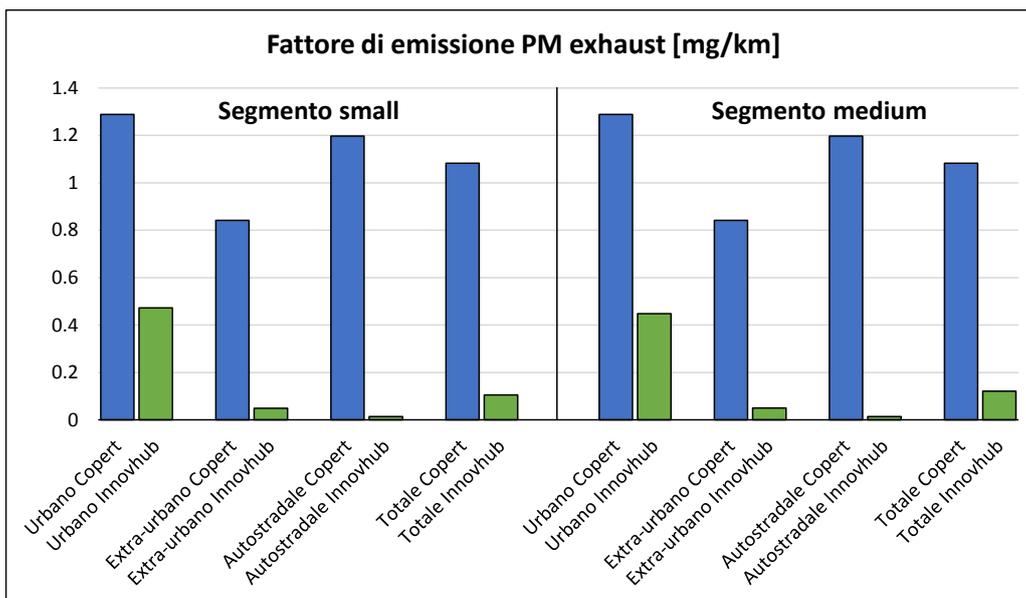


Figura 75 - Confronto tra i nuovi fattori di emissione di PM allo scarico per le autovetture GPL Euro 6 del segmento small (< 1400 cc) e medium (1400 < cc < 2000) determinati a partire dai test di Innovhub SSI e i corrispondenti fattori di emissione, ricavati a partire dalle funzioni di emissione del modello Copert, precedentemente presenti per l'Euro 6 nella banca dati di ISPRA.

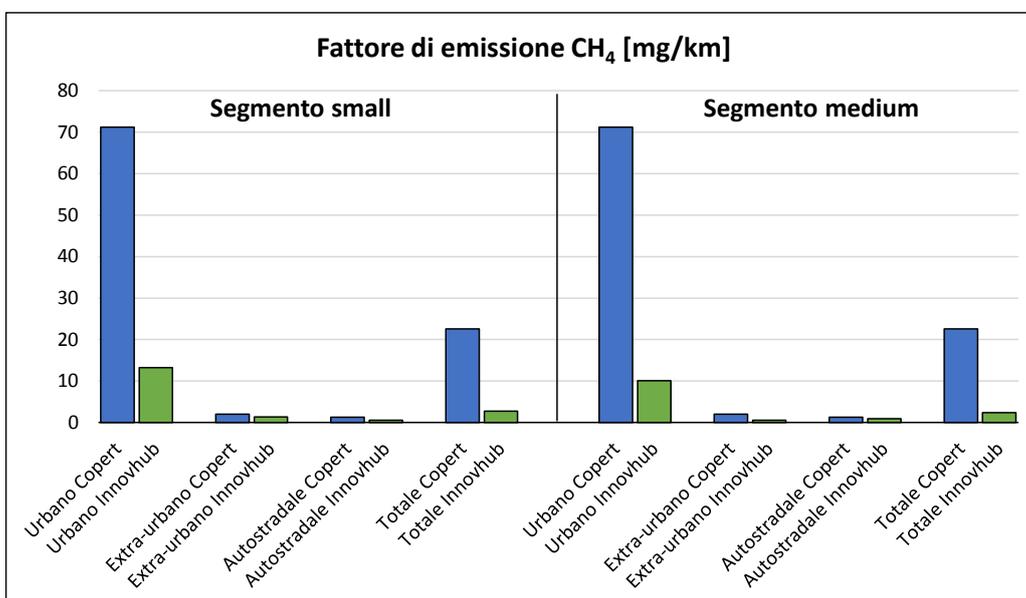


Figura 76 - Confronto tra i nuovi fattori di emissione di CH<sub>4</sub> per le autovetture GPL Euro 6 del segmento small (< 1400 cc) e medium (1400 < cc < 2000) determinati a partire dai test di Innovhub SSI e i corrispondenti fattori di emissione, ricavati a partire dalle funzioni di emissione del modello Copert, precedentemente presenti per l'Euro 6 nella banca dati di ISPRA.

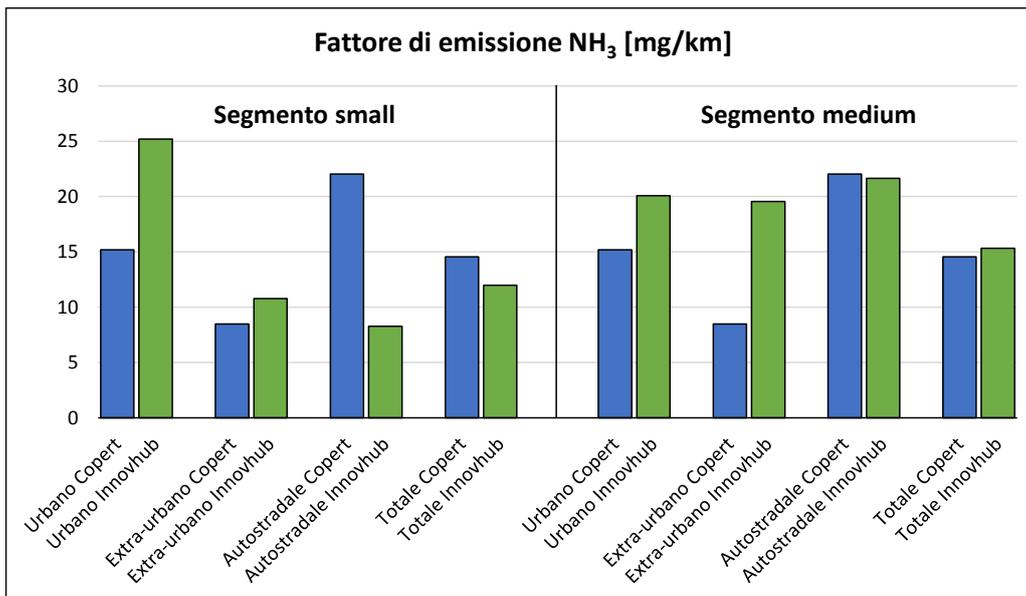


Figura 77 - Confronto tra i nuovi fattori di emissione di NH<sub>3</sub> per le autovetture GPL Euro 6 del segmento small (< 1400 cc) e medium (1400 < cc < 2000) determinati a partire dai test di Innovhub e i corrispondenti fattori di emissione, ricavati a partire dalle funzioni di emissione del modello Copert, precedentemente presenti per l'Euro 6 nella banca dati di ISPRA.

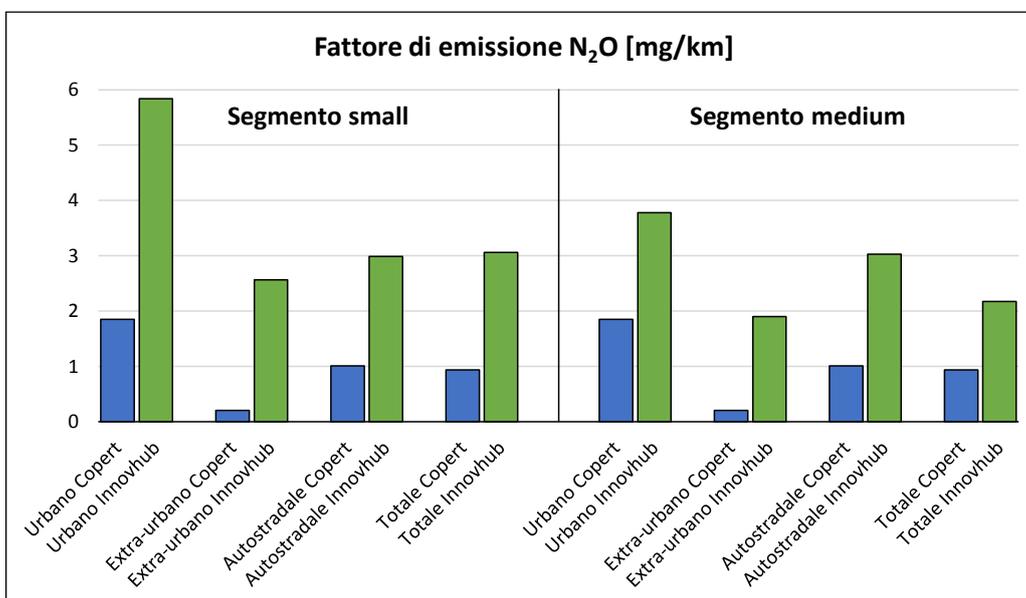


Figura 78 - Confronto tra i nuovi fattori di emissione di N<sub>2</sub>O per le autovetture GPL Euro 6 del segmento small (< 1400 cc) e medium (1400 < cc < 2000) determinati a partire dai test di Innovhub e i corrispondenti fattori di emissione, ricavati a partire dalle funzioni di emissione del modello Copert, precedentemente presenti per l'Euro 6 nella banca dati di ISPRA.

			Copert	Innovhub	Δ
CO [mg/km]	Small	Urbano	1404,40	1371,36	-2,4%
		Extra-urbano	267,83	142,93	-46,6%
		Autostradale	1111,05	445,91	-59,9%
		Totale	861,76	364,58	-57,7%
	Medium	Urbano	1404,40	1109,27	-21,0%
		Extra-urbano	267,83	221,63	-17,2%
		Autostradale	1111,05	504,92	-54,6%
		Totale	861,76	431,94	-49,9%
NOx [mg/km]	Small	Urbano	107,91	29,53	-72,6%
		Extra-urbano	25,37	5,51	-78,3%
		Autostradale	14,31	41,01	186,7%
		Totale	46,82	18,45	-60,6%
	Medium	Urbano	107,91	39,15	-63,7%
		Extra-urbano	25,37	10,34	-59,3%
		Autostradale	14,31	9,22	-35,5%
		Totale	46,82	18,11	-61,3%
THC [mg/km]	Small	Urbano	261,26	115,55	-55,8%
		Extra-urbano	13,36	3,28	-75,5%
		Autostradale	20,50	8,49	-58,6%
		Totale	89,87	21,29	-76,3%
	Medium	Urbano	261,26	116,03	-55,6%
		Extra-urbano	13,36	0,86	-93,6%
		Autostradale	20,50	4,61	-77,5%
		Totale	89,87	21,61	-76,0%
PM exhaust [mg/km]	Small	Urbano	1,29	0,47	-63,3%
		Extra-urbano	0,84	0,05	-94,1%
		Autostradale	1,20	0,01	-98,8%
		Totale	1,08	0,11	-90,3%
	Medium	Urbano	1,29	0,45	-65,3%
		Extra-urbano	0,84	0,05	-94,0%
		Autostradale	1,20	0,01	-98,8%
		Totale	1,08	0,12	-88,8%
CH <sub>4</sub> [mg/km]	Small	Urbano	71,21	13,24	-81,4%
		Extra-urbano	2,01	1,34	-33,5%
		Autostradale	1,26	0,56	-55,5%
		Totale	22,55	2,76	-87,7%
	Medium	Urbano	71,21	10,06	-85,9%
		Extra-urbano	2,01	0,58	-71,1%
		Autostradale	1,26	0,93	-26,3%
		Totale	22,55	2,40	-89,4%
NH <sub>3</sub> [mg/km]	Small	Urbano	15,18	25,19	65,9%
		Extra-urbano	8,48	10,78	27,1%
		Autostradale	22,03	8,27	-62,5%
		Totale	14,56	11,98	-17,7%
	Medium	Urbano	15,18	20,08	32,2%
		Extra-urbano	8,48	19,55	130,5%
		Autostradale	22,03	21,64	-1,8%
		Totale	14,56	15,32	5,3%
N <sub>2</sub> O [mg/km]	Small	Urbano	1,85	5,84	215,5%
		Extra-urbano	0,20	2,57	1176,2%
		Autostradale	1,01	2,99	196,9%
		Totale	0,94	3,06	226,5%
	Medium	Urbano	1,85	3,78	104,3%
		Extra-urbano	0,20	1,90	844,0%
		Autostradale	1,01	3,03	200,9%
		Totale	0,94	2,17	131,5%

Tabella 16 - Confronto e calcolo della variazione percentuale tra tutti i nuovi fattori di emissione per le autovetture GPL Euro 6 determinati a partire dai test di Innovhub e i corrispondenti fattori di emissione, ricavati a partire dalle funzioni di emissione del modello Copert, precedentemente presenti per l'Euro 6 nella banca dati di ISPRA.

Sulla base dei dati proposti nelle Figure 72-78 e in Tabella 16 è possibile dedurre che:

- i nuovi fattori di emissione di CO calcolati a partire dai risultati dei test condotti da Innovhub-SSI sono tutti inferiori dei corrispondenti fattori precedentemente presenti all'interno della banca dati di ISPRA, con una variazione media di -41,6% per il segmento small e di -35,7% per il segmento medium. Per entrambe le classi di cilindrata la variazione maggiore è stata rilevata in ambito autostradale (-59,9% per il segmento small e -54,6% il segmento medium);
- i nuovi fattori di emissione di NOx calcolati a partire dai risultati dei test condotti da Innovhub-SSI sono tutti inferiori dei corrispondenti fattori precedentemente presenti all'interno della banca dati di ISPRA, con unica eccezione quello per l'ambito autostradale riguardante le auto di piccola cilindrata (+186,7%, dato fortemente influenzato dai valori anomali di NOx rilevati, a causa del non adatto *Exhaust Flow Meter Tube* utilizzato, con il veicolo 1 durante la fase di guida autostradale delle prove RDE). La variazione media ottenuta è pari a -6,2% per il segmento small e -55,0% per il segmento medium;
- i nuovi fattori di emissione di THC calcolati a partire dai risultati dei test condotti da Innovhub-SSI sono tutti inferiori dei corrispondenti fattori precedentemente presenti all'interno della banca dati di ISPRA, con una variazione media di -66,5% per il segmento small e di -75,7% per il segmento medium. Per le autovetture di piccola cilindrata la riduzione maggiore è stata rilevata sul fattore di emissione medio totale (-76,3%) mentre per le autovetture di media cilindrata sul fattore di emissione in ambito extra-urbano (-93,6%);
- i nuovi fattori di emissione di PM *exhaust* calcolati a partire dai risultati dei test condotti da Innovhub-SSI sono tutti inferiori dei corrispondenti fattori precedentemente presenti all'interno della banca dati di ISPRA, con una variazione media di -86,6% per il segmento small e di -86,7% per il segmento medium. Per entrambe le classi di cilindrata è stata rilevata la medesima variazione massima (-98,8%) in ambito autostradale;
- i nuovi fattori di emissione di CH<sub>4</sub> calcolati a partire dai risultati dei test condotti da Innovhub-SSI sono tutti inferiori dei corrispondenti fattori precedentemente

presenti all'interno della banca dati di ISPRA, con una variazione media di -64,5% per il segmento small e di -68,2% per il segmento medium. Per entrambe le classi di cilindrata la variazione maggiore è stata rilevata per il fattore di emissione medio totale (-87,7% per il segmento small e -89,4% il segmento medium);

- i nuovi fattori di emissione di NH<sub>3</sub> calcolati a partire dai risultati dei test condotti da Innovhub-SSI non sono caratterizzati da un andamento comune rispetto ai corrispondenti fattori precedentemente presenti all'interno della banca dati di ISPRA. Per l'ambito urbano ed extra-urbano è stato rilevato un aumento per entrambe le classi di cilindrata (variazione massima pari a +65,9% per il segmento small in ambito urbano e +130,5% per il segmento medium in ambito extra-urbano). Per l'ambito autostradale sono state invece rilevate riduzioni per entrambe le categorie di cilindrata, pari a -62,5% per il segmento small e -1,8% per il segmento medium. Il fattore di emissione medio totale è diminuito per il segmento small (-17,7%) mentre è aumentato per il segmento medium (+5,3%).
- i nuovi fattori di emissione di N<sub>2</sub>O calcolati a partire dai risultati dei test condotti da Innovhub-SSI sono tutti superiori dei corrispondenti fattori precedentemente presenti all'interno della banca dati di ISPRA, con una variazione media di +453,8% per il segmento small e di +320,2% per il segmento medium. Per entrambe le classi di cilindrata la variazione maggiore è stata rilevata in ambito extra-urbano (+1176,2% per il segmento small e +844,0% il segmento medium).

Tutti i nuovi fattori di emissione, ad eccezione di quelli del PM allo scarico, determinati per le autovetture GPL Euro 6 di piccola e media cilindrata sono stati già utilizzati da ISPRA per la realizzazione dell'inventario nazionale italiano delle emissioni in atmosfera del 2019. I nuovi fattori di emissione del PM *exhaust* invece, poiché calcolati solo in un secondo momento rispetto agli altri, verranno utilizzati a partire dall'inventario delle emissioni del 2020.

In modo analogo a quanto fatto per i fattori di emissione, sono stati calcolati anche i fattori di consumo di carburante [l/100km] totali e nel dettaglio per ambito urbano, extra-urbano ed autostradale. I risultati di tali elaborazioni, proposti in Appendice C, non

sono però stati recepiti da parte di ISPRA in quanto ritenuti non coerenti a livello di serie storica presente nella banca dati da Euro 0 ad Euro 5.

## 5.2 CONDIVISIONE DATI CON GRUPPO ERMES

Per la condivisione dei dati con il gruppo ERMES, tutte le informazioni e i risultati delle prove effettuate da Innovhub SSI sono stati inseriti in complessi file di calcolo Excel chiamati *'input data sheet'* e forniti al LEA direttamente dal gruppo ERMES. Tali file sono stati accuratamente compilati e riconsegnati per la successiva importazione dei dati all'interno del database del gruppo ERMES e saranno utilizzati per aggiornare i fattori di emissione dei modelli Copert e HBEFA (a partire dalla *release 4.2* del software).

Sono stati compilati 5 file Excel *'input data sheet'* (uno per ogni veicolo testato), ciascuno dei quali formato dai seguenti 16 fogli:

- Un foglio *'ReadMe'* contenente tutte le informazioni generali riguardo il file e la procedura da seguire per l'inserimento dei dati. In questo foglio è inoltre spiegata la categorizzazione dei dati: le informazioni da inserire nel file sono classificate come obbligatorie (*'Mandatory'*), ben gradite (*'Very welcome'*) e opzionali (*'Optional'*) e la distinzione è introdotta attraverso la diversa colorazione delle celle

	= Mandatory (for useful analysis)
	= Very welcome
	= Optional
	= Automatically assigned by Look-up-tables

Figura 79 - Classificazione dei dati da inserire nel file *'input data sheet'* secondo la diversa colorazione delle celle.  
(Fonte: Keller, 2017).

- Un foglio *'VehicleData'* in cui sono state inserite tutte le informazioni riguardo il veicolo testato, tra cui la casa costruttrice, il modello, la tipologia di alimentazione, lo standard Euro di omologazione, la data di immatricolazione, la massa, le caratteristiche del motore, il numero di marce, le gomme, i dispositivi di trattamento del gas di scarico ecc.;
- Un foglio *'EmissionData'* in cui sono stati descritti tutti i test eseguiti, i combustibili utilizzati, le temperature, i coefficienti di calibrazione del banco

dinamometrico, le distanze percorse, tutte le emissioni e i consumi di combustibile medi sia in riferimento alle singole fasi che ai cicli complessivi e tutti i parametri rilevati durante le prove RDE;

- 8 fogli '*ChassisDyno\_Inst*' (uno per ogni test di laboratorio eseguito) in cui sono stati riportati i dati istantanei rilevati con frequenza 1 Hz durante l'esecuzione dei test sul banco dinamometrico, tra cui la velocità, l'emissione di CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, THC, PN, la temperatura e la pressione dell'aria;
- 4 fogli '*PEMS\_Inst*' (uno per ogni test RDE eseguito) in cui sono stati riportati i dati istantanei rilevati con frequenza 1 Hz durante l'esecuzione delle prove RDE, tra cui la velocità, l'altitudine, il numero di satelliti in uso dal GPS, la latitudine, la longitudine, la temperatura, la portata del gas di scarico, e l'emissione di CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO e THC.
- Un foglio '*ANNEX\_Definitions*' in cui sono presenti tutte le definizioni dei termini presenti all'interno del file. Alcuni dati (ed es. quelle dei cicli o delle caratteristiche del veicolo) sono infatti stati inseriti attraverso una selezione tra diverse opzioni predefinite, descritte appunto all'interno di questo foglio.

In Appendice D sono apprezzabili tutte le informazioni richieste dal file Excel '*input data sheet*' in fase di compilazione.

## 6. CONCLUSIONI

---

Il presente lavoro è stato realizzato con lo scopo di descrivere e valorizzare i risultati dei test di emissione allo scarico eseguiti, su commissione da parte di Assogasliquidi Federchimica, dal Laboratorio di Emissioni Autoveicolari di Innovhub-SSI su una flotta di 5 autovetture bifuel GPL/benzina Euro 6 b e c. Nell'ambito del lavoro di tesi i dati ottenuti tramite i test sono stati ri-elaborati e condivisi con ISPRA Ministero Ambiente e col gruppo di ricerca europeo ERMES.

I risultati delle prove sperimentali condotte hanno permesso di concludere che:

- Con entrambe le alimentazioni tutti i limiti emissivi Euro 6 sugli inquinanti regolamentati sono stati rispettati sia in laboratorio che su strada, con unica eccezione il superamento della soglia imposta sul numero di particelle riscontrato con il veicolo 3 (GDI) alimentato a benzina. Lo stesso veicolo, sempre con alimentazione a benzina, avrebbe inoltre superato il limite NTE (in vigore a partire dallo standard Euro 6 d Temp) sul PN durante i test su strada;
- Con l'alimentazione a GPL, rispetto a quella a benzina, sia in laboratorio che su strada sono state rilevate da un lato riduzioni significative delle emissioni di CO<sub>2</sub> (≈ -10%) e del numero di particelle e dall'altro aumenti significativi dei consumi di combustibile (≈ +30%) data la sua densità inferiore rispetto alla benzina;
- Nelle prove eseguite in laboratorio con l'alimentazione a GPL, rispetto a quella a benzina, sono stati rilevati aumenti significativi delle emissioni di THC e NMHC in fase di partenza a motore freddo (quasi azzerate dal catalizzatore una volta raggiunto il regime termico), di CO e di composti gassosi non regolamentati.
- In generale, con entrambe le alimentazioni sono state rilevate emissioni estremamente limitate di PM e NOx.
- Ulteriori test, studi e ricerche sono necessari per le emissioni gassose non regolamentate (NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>, 1,3-butadiene, benzene) e per il continuo aggiornamento dei fattori di emissione, con specifico riferimento ai nuovi veicoli

Euro 6 d Temp ed Euro 6 d che in questi mesi cominciano a comparire sul mercato e su strada.

L'elaborazione dei risultati dei test condotti da Innovhub SSI ha inoltre permesso di determinare i fattori di emissione totali e specifici per l'ambito urbano, extra-urbano ed autostradale di CO, NOx, THC, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O e PM *exhaust* per le autovetture Euro 6 con alimentazione a GPL del segmento *small* e *medium*, ben rappresentativi di questa tipologia di vetture vendute e circolanti in Italia. Tali fattori di emissione, condivisi durante l'attività di tesi con ISPRA, hanno permesso di aggiornare la banca dati utilizzata per la redazione dell'inventario italiano delle emissioni in atmosfera, andando inoltre a colmare una mancanza di fattori di emissione '*country specific*', ovvero ben rappresentativi delle emissioni di moderne autovetture bifuel GPL/benzina in Italia.

Tutti i parametri e i risultati delle prove sperimentali sono stati inoltre condivisi con il gruppo ERMES e saranno utilizzati per l'aggiornamento dei database dei fattori di emissione dei principali modelli europei di calcolo delle emissioni da trasporto stradale: il Copert e l'HBEFA.

Nonostante il considerevole impegno riposto nella quantificazione e nel monitoraggio delle emissioni autoveicolari, risultano necessarie ulteriori campagne sperimentali volte a determinare con continuità fattori di emissione sempre più affidabili ed aggiornati, utili a perfezionare gli inventari delle emissioni in atmosfera e, di conseguenza, anche la pianificazione e l'attuazione delle politiche ambientali.

## BIBLIOGRAFIA

---

European Environment Agency. EMEP/EEA, *Air pollutant emission inventory guidebook* 2016. Technical guidance to prepare national emission inventories. [EEA Technical Report n°21/2016].

Franco, V.; Fontaras, G.; Dilara, P. *Towards improved vehicle emissions estimation in Europe*. Procedia – Social and Behavioral Sciences 48 (2012) 1304 – 1313. 2012.

Franco, V.; Kousoulidou, M.; Muntean, M.; Ntziachristos, L.; Hausberger, S.; Dilara, P. *Road vehicle emission factors development: A review*. Atmospheric Environment. 2013, 70, 84–97.

International Council on Clean Transportation. *Changes to the motor vehicle type-approval system in the European Union*. Policy Update. 2018.

International Council on Clean Transportation. *Real-driving emissions test procedure for exhaust gas pollutant emissions of cars and light commercial vehicles in Europe*. Policy Update. 2017.

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. *Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2017*. National Inventory Report 2019. [ISPRA Report n°307/2019].

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. *Italian Emission Inventory 1990 – 2017*. Informative Inventory Report 2019. [ISPRA Report n°306/2019].

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. *Trasporto su strada. Inventario nazionale delle emissioni e disaggregazione provinciale*. 2010. [ISPRA Report n°124/2010].

Joint Research Centre. European Commission. *Particle Measurement Programme (PMP) Light-duty Inter-laboratory Correlation Exercise (ILCE\_LD) Final Report*. Institute for Environment and Sustainability. 2007. [Report EUR 22775 EN].

Joint Research Centre. *Emission Factors for new and upcoming technologies in road transport*. JRC science and policy report. 2014. [Report EUR 26952 EN].

Keller M. HBEFA-Group. *ERMES LDV emission measurements Database*. 2017.

Matzer C., Rexeis M. *Proposal for test description for cars and LCV for chassis dyno tests and RDE tests as basis for emission factors*. Institute of Internal Combustion Engines and Thermodynamics. Graz University of Technology. 2016.

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM). *Elementi per una roadmap della mobilità sostenibile*. Inquadramento generale e focus sul trasporto stradale. 2017.

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT). *Conto nazionale delle infrastrutture e dei trasporti*. 2017 – 2018.

Miranda, A.I.; Ferreira, J.; Silveira, C.; Relvas, H.; Duque, L.; Roebeling, P.; Lopes, M.; Costa, S.; Monteiro, A.; Gama, C.; Sá, E.; Borrego, C.; Teixeira, J.P. *A cost-efficiency and health benefit approach to improve urban air quality*. *Sci. Total Environ.* 2016, 569 – 570, 342 – 351.

Mock, P.; German, J.; Bandivadekar, A.; Riemersma, I.; Ligterink, N.; Lambrecht, U. *From Laboratory to Road: A Comparison of Official and 'Real-World' Fuel Consumption and CO<sub>2</sub> Values for Cars in Europe and the United States*, ICCT. White Paper. 2013.

Ntziachristos, L.; Gkatzoflias, D.; Kouridis, C.; Samaras, Z. *COPERT: A European road transport emission inventory model*. *Information Technologies in Environmental Engineering*. 2009, 491 – 504.

Valverde, V.; Adria, B.; Clairotte, M.; Pavlovic, J.; Suarez-Bertoa, R.; Giechaskiel, B.; Astoga-Llorens, C.; Fontaras, G. *Emission factors derived from thirteen Euro 6b light-duty vehicles based on laboratory and on-road measurements*. *Atmosphere*. 2019, 10, 243.

World Health Organization. *Review of Evidence on Health Aspects of Air Pollution—REVIHAAP Project*, Technical Report, Regional Office for Europe, Copenhagen. 2013.

## SITOGRAFIA

---

[www.sinanet.isprambiente.it](http://www.sinanet.isprambiente.it)

[www.dieselnet.com](http://www.dieselnet.com)

[www.acea.be](http://www.acea.be)

[www.emisia.com](http://www.emisia.com)

[www.ermes-group.eu](http://www.ermes-group.eu)

[www.hbefa.net](http://www.hbefa.net)

## APPENDICE A

---

Nelle Tabelle 17-41 è proposta una sintesi dei principali risultati ottenuti per ogni veicolo testato. Per i cicli NEDC ed ERMES sono state calcolate le medie, le deviazioni standard e i coefficienti di variazione [%] delle emissioni e dei consumi rilevati sulle 3 prove selezionate con ogni tipologia di alimentazione. Operazione analoga è stata effettuata per ogni gruppo di prove RDE eseguite con il medesimo combustibile. Per ogni test NEDC ed ERMES sono inoltre riportati i risultati del t-test di Student applicato per verificare la significatività statistica delle variazioni emissive e di consumi rilevate nel passaggio dall'alimentazione a benzina a quella a GPL.

# VEICOLO 1

		Benzina						GPL						Δ %	Significatività statistica (t-test di Student)
UDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
CO	mg/km	323,5	182,7	339,1	<b>281,80</b>	<b>86,13</b>	<b>31</b>	837,6	-	1067,0	<b>952,33</b>	<b>162,21</b>	<b>17</b>	237,9	SI'
THC	mg/km	84,6	46,7	62,8	<b>64,69</b>	<b>19,02</b>	<b>29</b>	73,2	130,0	88,5	<b>97,21</b>	<b>29,39</b>	<b>30</b>	50,3	NO
CH <sub>4</sub>	mg/km	2,6	2,3	2,5	<b>2,49</b>	<b>0,15</b>	<b>6</b>	6,7	9,7	7,1	<b>7,82</b>	<b>1,66</b>	<b>21</b>	213,4	SI'
NMHC	mg/km	82,1	44,5	60,4	<b>62,33</b>	<b>18,88</b>	<b>30</b>	66,9	120,8	81,8	<b>89,81</b>	<b>27,84</b>	<b>31</b>	44,1	NO
NO <sub>x</sub>	mg/km	19,8	17,9	20,7	<b>19,44</b>	<b>1,42</b>	<b>7</b>	10,1	12,7	11,6	<b>11,48</b>	<b>1,27</b>	<b>11</b>	-40,9	SI'
CO <sub>2</sub>	g/km	164,6	159,6	160,7	<b>161,66</b>	<b>2,63</b>	<b>2</b>	146,4	147,8	144,4	<b>146,20</b>	<b>1,71</b>	<b>1</b>	-9,6	SI'
PM	mg/km	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	2,8E+11	1,2E+11	1,1E+11	<b>1,68E+11</b>	<b>9,62E+10</b>	<b>57</b>	1,4E+11	2,1E+11	1,2E+11	<b>1,58E+11</b>	<b>4,56E+10</b>	<b>29</b>	-5,9	NO
PN (ELPI)	#/km	1,5E+11	6,3E+10	6,0E+10	<b>9,02E+10</b>	<b>5,00E+10</b>	<b>55</b>	8,0E+10	1,4E+11	7,2E+10	<b>9,84E+10</b>	<b>3,89E+10</b>	<b>39</b>	9,1	NO
PN (EEPS)	#/km	7,8E+12	3,1E+12	3,7E+12	<b>4,90E+12</b>	<b>2,56E+12</b>	<b>52</b>	3,8E+12	7,8E+12	4,1E+12	<b>5,24E+12</b>	<b>2,20E+12</b>	<b>42</b>	7,0	NO
PMsoot	mg/km	0,08	0,01	0,02	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>	<b>104</b>	0,04	0,07	0,02	<b>0,04</b>	<b>0,03</b>	<b>64</b>	12,9	NO
Consumo calc.	l/100km	7,10	6,87	6,93	<b>6,97</b>	<b>0,12</b>	<b>2</b>	8,74	8,94	8,65	<b>8,78</b>	<b>0,15</b>	<b>2</b>	25,9	SI'
EUDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
CO	mg/km	22,1	60,5	77,2	<b>53,28</b>	<b>28,27</b>	<b>53</b>	286,2	145,5	76,7	<b>169,47</b>	<b>106,78</b>	<b>63</b>	218,1	NO
THC	mg/km	0,0	0,0	1,1	<b>0,36</b>	<b>0,62</b>	<b>173</b>	1,5	1,2	1,5	<b>1,40</b>	<b>0,14</b>	<b>10</b>	288,6	NO
CH <sub>4</sub>	mg/km	0,0	0,0	0,0	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	-	0,2	0,0	0,0	<b>0,05</b>	<b>0,11</b>	<b>238</b>	-	NO
NMHC	mg/km	0,0	0,0	1,2	<b>0,40</b>	<b>0,66</b>	<b>166</b>	1,3	1,3	1,5	<b>1,39</b>	<b>0,12</b>	<b>8</b>	246,9	NO
NO <sub>x</sub>	mg/km	1,5	3,1	3,2	<b>2,60</b>	<b>0,93</b>	<b>36</b>	1,6	2,5	2,5	<b>2,18</b>	<b>0,54</b>	<b>25</b>	-16,1	NO
CO <sub>2</sub>	g/km	98,6	97,9	98,1	<b>98,20</b>	<b>0,34</b>	<b>0</b>	89,4	90,6	88,9	<b>89,65</b>	<b>0,88</b>	<b>1</b>	-8,7	SI'
PM	mg/km	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	3,7E+10	1,4E+10	1,0E+10	<b>2,04E+10</b>	<b>1,46E+10</b>	<b>71</b>	2,9E+10	1,1E+10	4,2E+10	<b>2,72E+10</b>	<b>1,57E+10</b>	<b>58</b>	32,9	NO
PN (ELPI)	#/km	2,0E+10	1,1E+10	5,1E+09	<b>1,20E+10</b>	<b>7,53E+09</b>	<b>63</b>	9,3E+09	5,3E+09	2,8E+10	<b>1,43E+10</b>	<b>1,24E+10</b>	<b>86</b>	19,5	NO
PN (EEPS)	#/km	1,1E+12	3,7E+11	3,9E+11	<b>6,30E+11</b>	<b>4,35E+11</b>	<b>69</b>	4,1E+11	2,6E+11	1,2E+12	<b>6,13E+11</b>	<b>4,88E+11</b>	<b>80</b>	-2,7	NO
PMsoot	mg/km	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>173</b>	0,00	0,00	0,01	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>134</b>	215,1	NO
Consumo calc.	l/100km	4,24	4,21	4,22	<b>4,22</b>	<b>0,01</b>	<b>0</b>	5,31	5,37	5,26	<b>5,31</b>	<b>0,05</b>	<b>1</b>	25,9	SI'
NEDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
CO	mg/km	133,1	105,6	174,0	<b>137,56</b>	<b>34,42</b>	<b>25</b>	490,5	-	442,8	<b>466,66</b>	<b>33,78</b>	<b>7</b>	239,2	SI'
THC	mg/km	31,1	16,5	23,9	<b>23,83</b>	<b>7,29</b>	<b>31</b>	28,0	48,9	33,6	<b>36,86</b>	<b>10,80</b>	<b>29</b>	54,7	NO
CH <sub>4</sub>	mg/km	0,9	0,8	0,9	<b>0,85</b>	<b>0,05</b>	<b>6</b>	2,6	3,5	2,6	<b>2,90</b>	<b>0,54</b>	<b>19</b>	240,0	SI'
NMHC	mg/km	30,2	15,8	23,1	<b>23,03</b>	<b>7,24</b>	<b>31</b>	25,6	45,6	31,2	<b>34,12</b>	<b>10,30</b>	<b>30</b>	48,2	NO
NO <sub>x</sub>	mg/km	8,3	8,5	9,6	<b>8,82</b>	<b>0,74</b>	<b>8</b>	4,7	6,2	5,9	<b>5,63</b>	<b>0,78</b>	<b>14</b>	-36,2	SI'
CO <sub>2</sub>	g/km	122,9	120,7	121,2	<b>121,60</b>	<b>1,15</b>	<b>1</b>	110,5	111,8	109,4	<b>110,58</b>	<b>1,19</b>	<b>1</b>	-9,1	SI'
PM	mg/km	0,2	0,0	-	<b>0,10</b>	<b>0,10</b>	<b>98</b>	0,2	0,0	0,1	<b>0,09</b>	<b>0,07</b>	<b>74</b>	-10,6	NO
PN_PMP Compliant	#/km	1,3E+11	5,2E+10	4,6E+10	<b>7,48E+10</b>	<b>4,45E+10</b>	<b>60</b>	7,0E+10	8,4E+10	7,2E+10	<b>7,56E+10</b>	<b>7,84E+09</b>	<b>10</b>	1,1	NO
PN (ELPI)	#/km	6,7E+10	3,0E+10	2,5E+10	<b>4,08E+10</b>	<b>2,29E+10</b>	<b>56</b>	3,6E+10	5,6E+10	4,5E+10	<b>4,55E+10</b>	<b>1,04E+10</b>	<b>23</b>	11,4	NO
PN (EEPS)	#/km	3,6E+12	1,4E+12	1,6E+12	<b>2,20E+12</b>	<b>1,22E+12</b>	<b>55</b>	1,7E+12	3,0E+12	2,3E+12	<b>2,33E+12</b>	<b>6,85E+11</b>	<b>29</b>	5,6	NO
PMsoot	mg/km	0,03	0,00	0,01	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>106</b>	0,01	0,03	0,01	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>46</b>	21,5	NO
Consumo calc.	l/100km	5,29	5,19	5,22	<b>5,24</b>	<b>0,05</b>	<b>1</b>	6,58	6,69	6,52	<b>6,60</b>	<b>0,09</b>	<b>1</b>	26,0	SI'
ERMES		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
CO	mg/km	637,8	610,8	457,2	<b>568,63</b>	<b>97,42</b>	<b>17</b>	400,0	-	347,9	<b>373,95</b>	<b>36,90</b>	<b>10</b>	-34,2	SI'
THC	mg/km	4,3	3,0	5,0	<b>4,11</b>	<b>0,99</b>	<b>24</b>	4,6	3,3	3,7	<b>3,87</b>	<b>0,66</b>	<b>17</b>	-5,9	NO
CH <sub>4</sub>	mg/km	0,7	0,8	1,0	<b>0,84</b>	<b>0,14</b>	<b>16</b>	0,9	0,4	0,5	<b>0,60</b>	<b>0,26</b>	<b>44</b>	-29,1	NO
NMHC	mg/km	3,6	2,3	4,1	<b>3,32</b>	<b>0,93</b>	<b>28</b>	3,8	3,0	3,1	<b>3,31</b>	<b>0,42</b>	<b>13</b>	-0,3	NO
NO <sub>x</sub>	mg/km	18,5	12,3	12,8	<b>14,54</b>	<b>3,47</b>	<b>24</b>	13,5	11,9	44,3	<b>23,25</b>	<b>18,29</b>	<b>79</b>	59,9	NO
CO <sub>2</sub>	g/km	115,6	116,0	116,6	<b>116,04</b>	<b>0,47</b>	<b>0</b>	105,3	105,2	106,0	<b>105,51</b>	<b>0,39</b>	<b>0</b>	-9,1	SI'
PM	mg/km	0,1	0,1	0,2	<b>0,12</b>	<b>0,05</b>	<b>41</b>	0,1	0,0	0,1	<b>0,08</b>	<b>0,05</b>	<b>57</b>	-28,0	NO
PN_PMP Compliant	#/km	7,5E+10	7,8E+10	7,9E+10	<b>7,72E+10</b>	<b>2,03E+09</b>	<b>3</b>	5,7E+10	4,9E+10	4,1E+10	<b>4,92E+10</b>	<b>8,13E+09</b>	<b>17</b>	-36,2	SI'
PN (ELPI)	#/km	3,6E+10	3,9E+10	4,1E+10	<b>3,89E+10</b>	<b>2,58E+09</b>	<b>7</b>	2,8E+10	2,8E+10	2,5E+10	<b>2,72E+10</b>	<b>1,53E+09</b>	<b>6</b>	-30,2	SI'
PN (EEPS)	#/km	5,5E+12	2,0E+12	2,5E+12	<b>3,32E+12</b>	<b>1,86E+12</b>	<b>56</b>	1,8E+12	1,6E+12	2,1E+12	<b>1,84E+12</b>	<b>2,20E+11</b>	<b>12</b>	-44,7	NO
PMsoot	mg/km	0,02	0,01	0,02	<b>0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>22</b>	0,02	0,01	0,02	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>33</b>	-3,5	NO
Consumo calc.	l/100km	5,01	5,02	5,04	<b>5,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0</b>	6,26	6,24	6,30	<b>6,27</b>	<b>0,03</b>	<b>0</b>	24,8	SI'

Tabella 17 - Risultati dei test NEDC + ERMES: emissioni allo scarico regolamentate, PM, PN, CO<sub>2</sub> e consumi.

		Benzina						GPL						Δ, %	Significatività statistica (t-test di Student)
UDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
NH <sub>3</sub>	mg/km	3,71	2,14	4,21	<b>3,35</b>	<b>1,08</b>	<b>32</b>	20,17	22,45	17,06	<b>19,89</b>	<b>2,71</b>	<b>14</b>	493,0	SI'
NO <sub>2</sub>	mg/km	5,29	4,62	5,14	<b>5,02</b>	<b>0,35</b>	<b>7</b>	4,81	5,26	4,75	<b>4,94</b>	<b>0,28</b>	<b>6</b>	-1,5	NO
1,3 Butadiene	mg/km	5,44	5,54	8,31	<b>6,43</b>	<b>1,63</b>	<b>25</b>	13,82	14,40	15,63	<b>14,62</b>	<b>0,92</b>	<b>6</b>	127,3	SI'
Formaldeide	mg/km	0,28	0,16	0,15	<b>0,20</b>	<b>0,07</b>	<b>37</b>	0,11	0,21	0,04	<b>0,12</b>	<b>0,09</b>	<b>74</b>	-40,1	NO
Benzene	mg/km	1,96	0,22	1,38	<b>1,19</b>	<b>0,88</b>	<b>74</b>	0,38	2,57	0,49	<b>1,14</b>	<b>1,23</b>	<b>108</b>	-3,6	NO
N <sub>2</sub> O	mg/km	3,75	5,02	5,19	<b>4,66</b>	<b>0,79</b>	<b>17</b>	6,13	5,21	6,62	<b>5,98</b>	<b>0,72</b>	<b>12</b>	28,5	NO
EUDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
NH <sub>3</sub>	mg/km	1,85	2,15	3,37	<b>2,46</b>	<b>0,81</b>	<b>33</b>	36,54	14,60	9,28	<b>20,14</b>	<b>14,45</b>	<b>72</b>	720,0	NO
NO <sub>2</sub>	mg/km	2,22	2,08	2,18	<b>2,16</b>	<b>0,07</b>	<b>3</b>	2,40	2,55	2,67	<b>2,54</b>	<b>0,13</b>	<b>5</b>	17,4	SI'
1,3 Butadiene	mg/km	4,08	4,74	6,16	<b>4,99</b>	<b>1,06</b>	<b>21</b>	16,36	10,32	10,50	<b>12,39</b>	<b>3,44</b>	<b>28</b>	148,2	SI'
Formaldeide	mg/km	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	-	-	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>	-	-	-	-
Benzene	mg/km	0,22	0,00	0,84	<b>0,35</b>	<b>0,44</b>	<b>124</b>	0,01	3,20	0,01	<b>1,07</b>	<b>1,85</b>	<b>172</b>	203,6	NO
N <sub>2</sub> O	mg/km	1,07	2,20	1,44	<b>1,57</b>	<b>0,57</b>	<b>37</b>	3,14	2,17	3,40	<b>2,90</b>	<b>0,65</b>	<b>22</b>	85,0	SI'
NEDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
NH <sub>3</sub>															

		Benzina	GPL	
Low		1	2	$\Delta$ , %
CO	mg/km	1177,4	5049,7	328,89
THC	mg/km	163,0	337,5	107,04
CH <sub>4</sub>	mg/km	7,5	27,4	263,65
NMHC	mg/km	155,9	311,6	99,89
NO <sub>x</sub>	mg/km	27,3	14,5	-46,98
CO <sub>2</sub>	g/km	163,02	141,84	-13,00
PM	mg/km	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	8,58E+11	7,95E+11	-7,25
PN (ELPI)	#/km	5,49E+11	5,82E+11	6,01
PN (EEPS)	#/km	2,63E+13	2,57E+13	-2,12
PM soot	mg/km	0,45	0,55	21,30
Consumo calc.	l/100km	7,14	8,91	24,89
Middle		1	2	
CO	mg/km	0,00	0,00	-100,00
THC	mg/km	2,74	2,39	-12,82
CH <sub>4</sub>	mg/km	0,02	0,02	4,37
NMHC	mg/km	2,72	2,37	-12,95
NO <sub>x</sub>	mg/km	9,57	1,15	-88,00
CO <sub>2</sub>	g/km	117,34	103,37	-11,91
PM	mg/km	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	1,15E+11	5,08E+10	-56,00
PN (ELPI)	#/km	7,50E+10	3,45E+10	-54,00
PN (EEPS)	#/km	4,02E+12	1,66E+12	-58,57
PM soot	mg/km	0,02	0,01	-53,57
Consumo calc.	l/100km	5,06	6,11	20,65
High		1	2	
CO	mg/km	0,00	44,89	-
THC	mg/km	1,85	1,83	-1,43
CH <sub>4</sub>	mg/km	0,00	0,00	-
NMHC	mg/km	1,86	1,82	-1,82
NO <sub>x</sub>	mg/km	1,61	5,14	218,50
CO <sub>2</sub>	g/km	101,29	90,54	-10,61
PM	mg/km	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	3,68E+10	2,01E+10	-45,33
PN (ELPI)	#/km	2,59E+10	1,28E+10	-50,37
PN (EEPS)	#/km	1,17E+12	6,85E+11	-41,62
PM soot	mg/km	0,00	0,00	-10,44
Consumo calc.	l/100km	4,37	5,36	22,53
Extra-High		1	2	
CO	mg/km	96,36	125,44	30,19
THC	mg/km	4,14	3,99	-3,56
CH <sub>4</sub>	mg/km	0,60	0,56	-6,76
NMHC	mg/km	3,57	3,46	-3,04
NO <sub>x</sub>	mg/km	45,28	32,54	-28,14
CO <sub>2</sub>	g/km	114,92	107,20	-6,72
PM	mg/km	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	2,10E+10	1,32E+10	-37,21
PN (ELPI)	#/km	1,53E+10	7,88E+09	-48,37
PN (EEPS)	#/km	7,12E+11	5,75E+11	-19,29
PM soot	mg/km	0,01	1,96E-02	130,57
Consumo calc.	l/100km	4,97	6,35	27,84
WLTC		1	2	
CO	mg/km	190,35	733,09	285,12
THC	mg/km	24,21	47,57	96,44
CH <sub>4</sub>	mg/km	1,22	3,86	217,46
NMHC	mg/km	23,06	43,91	90,39
NO <sub>x</sub>	mg/km	22,16	15,27	-31,07
CO <sub>2</sub>	g/km	117,60	105,93	-9,93
PM	mg/km	0,04976	0,06364	27,90
PN_PMP Compliant	#/km	1,56E+11	1,28E+11	-18,28
PN (ELPI)	#/km	1,01E+11	9,16E+10	-9,78
PN (EEPS)	#/km	4,92E+12	4,19E+12	-14,79
PM soot	mg/km	0,07	0,08	22,89
Consumo calc.	l/100km	5,09	6,34	24,48

Tabella 19 - Risultati dei test WLTC: emissioni allo scarico regolamentate, PM, PN, CO<sub>2</sub> e consumi.

		Benzina	GPL	
Low		1	2	$\Delta$ , %
NH <sub>3</sub>	mg/km	23,3	50,5	116,69
NO <sub>2</sub>	mg/km	5,5	5,5	-0,73
1,3-Butadiene	mg/km	13,9	26,1	87,95
Formaldeide	mg/km	0,3	0,3	9,66
Benzene	mg/km	2,4	7,3	205,75
N <sub>2</sub> O	mg/km	5,0	4,9	-2,37
Middle		1	2	
NH <sub>3</sub>	mg/km	5,3	8,5	62,05
NO <sub>2</sub>	mg/km	2,8	3,2	13,92
1,3-Butadiene	mg/km	7,9	11,3	43,33
Formaldeide	mg/km	0,0	0,0	-
Benzene	mg/km	1,2	4,6	279,11
N <sub>2</sub> O	mg/km	2,3	3,2	40,79
High		1	2	
NH <sub>3</sub>	mg/km	3,1	6,5	108,48
NO <sub>2</sub>	mg/km	2,4	2,9	21,51
1,3-Butadiene	mg/km	6,5	9,7	49,43
Formaldeide	mg/km	0,0	0,0	-
Benzene	mg/km	1,4	4,0	187,50
N <sub>2</sub> O	mg/km	2,0	2,8	39,46
Extra-High		1	2	
NH <sub>3</sub>	mg/km	4,0	9,6	138,68
NO <sub>2</sub>	mg/km	2,7	3,3	19,75
1,3-Butadiene	mg/km	7,3	11,6	58,36
Formaldeide	mg/km	0,0	0,0	-
Benzene	mg/km	1,5	3,2	113,36
N <sub>2</sub> O	mg/km	2,5	3,5	36,76
WLTC		1	2	
NH <sub>3</sub>	mg/km	6,5	13,9	111,98
NO <sub>2</sub>	mg/km	3,0	3,4	14,18
1,3-Butadiene	mg/km	8,1	12,9	60,10
Formaldeide	mg/km	0,04	0,05	10,50
Benzene	mg/km	1,5	4,3	180,48
N <sub>2</sub> O	mg/km	2,7	3,4	28,35

Tabella 20 - Risultati dei test WLTC: emissioni allo scarico non regolamentate.

		Benzina					GPL				
City		1	2	Media	d.s.	CV, %	3	4	Media	d.s.	CV, %
CO	mg/km	246	121	183,6	88,7	48	204	96	149,7	76,6	51
THC	mg/km	4,4	12,1	8,3	5,4	66	3,9	3,4	3,6	0,4	10
CH4	mg/km	0,10	0,27	0,2	0,1	66	0,08	0,07	0,08	0,01	10
NOx	mg/km	9,4	6,4	7,9	2,1	26	22,3	12,0	17,1	7,3	43
CO2	g/km	256	232	244,1	17,4	7	184	204	193,9	14,1	7
PN_CPC	#/km	1,92E+11	1,51E+11	1,7E+11	2,9E+10	17	5,65E+10	4,27E+11	2,42E+11	2,62E+11	108
Consumo calc.	l/100km	11,4	10,3	10,9	0,8	7	12,3	13,7	13,0	1,0	7
Rural		1	2	Media	d.s.	CV, %	3	4	Media	d.s.	CV, %
CO	mg/km	527	995	761,1	330,4	43	927	295	611,2	446,5	73
THC	mg/km	7,1	9,4	8,3	1,6	19	6,4	2,1	4,3	3,0	71
CH4	mg/km	0,16	0,21	0,2	0,0	19	0,14	0,05	0,09	0,07	71
NOx	mg/km	24,5	15,9	20,2	6,1	30	16,1	24,0	20,0	5,6	28
CO2	g/km	141	129	135,0	8,1	6	120	111	115,6	6,4	6
PN_CPC	#/km	1,83E+10	1,46E+10	1,6E+10	2,6E+09	16	3,01E+10	6,25E+09	1,82E+10	1,69E+10	93
Consumo calc.	l/100km	6,3	5,8	6,1	0,3	5	8,2	7,5	7,8	0,5	6
Motorway		1	2	Media	d.s.	CV, %	3	4	Media	d.s.	CV, %
CO	mg/km	11970	13437	12703,3	1037,7	8	2471	224	1347,6	1589,1	118
THC	mg/km	27,7	38,5	33,1	7,6	23	8,8	2,6	5,7	4,4	76
CH4	mg/km	0,61	0,85	0,7	0,2	23	0,19	0,06	0,13	0,10	76
NOx	mg/km	79,5	98,1	88,8	13,1	15	76,8	157,0	116,9	56,7	49
CO2	g/km	203	202	202,9	0,6	0	177	174	175,8	2,3	1
PN_CPC	#/km	7,37E+11	9,59E+11	8,5E+11	1,6E+11	18	1,72E+10	1,89E+10	1,80E+10	1,19E+09	7
Consumo calc.	l/100km	10,0	10,1	10,1	0,1	1	12,2	11,7	12,0	0,3	3
Media ciclo		1	2	Media	d.s.	CV, %	3	4	Media	d.s.	CV, %
CO	mg/km	4254	4213	4233,6	28,5	1	1078	200	639,1	620,5	97
THC	mg/km	13,0	18,6	15,8	4,0	25	6,1	2,7	4,4	2,4	53
CH4	mg/km	0,29	0,41	0,4	0,1	25	0,13	0,06	0,10	0,05	53
NOx	mg/km	37,5	35,8	36,7	1,2	3	36,3	63,1	49,7	19,0	38
CO2	g/km	203	187	195,2	11,5	6	163	165	164,1	1,5	1
PN_CPC	#/km	3,21E+11	3,32E+11	3,3E+11	7,3E+09	2	3,72E+10	1,62E+11	9,95E+10	8,81E+10	89
Consumo calc.	l/100km	9,4	8,7	9,0	0,5	6	11,0	11,1	11,1	0,0	0

Tabella 21 - Risultati dei test RDE: emissioni gassose, PN e consumi.

## VEICOLO 2

		Benzina						GPL						Δ, %	Significatività statistica (t-test di Student)
UDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
CO	mg/km	1953,6	1319,3	1185,4	1486,09	410,40	28	1682,4	925,7	1319,0	1309,03	378,46	29	-11,9	NO
THC	mg/km	176,6	146,2	168,5	163,77	15,79	10	211,2	147,0	187,0	181,74	32,42	18	11,0	NO
CH <sub>4</sub>	mg/km	12,5	8,8	11,7	11,02	1,94	18	13,9	10,9	12,0	12,25	1,50	12	11,2	NO
NMHC	mg/km	165,0	138,0	157,6	153,55	13,99	9	197,7	136,4	175,3	169,82	31,03	18	10,6	NO
NOx	mg/km	7,0	10,1	9,1	8,72	1,62	19	11,5	32,3	14,8	19,50	11,16	57	123,7	NO
CO <sub>2</sub>	g/km	248,6	249,0	245,3	247,63	2,04	1	221,7	233,1	227,7	227,52	5,71	3	-8,1	SI'
PM	mg/km	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	7,9E+11	5,0E+11	4,2E+11	5,71E+11	1,96E+11	34	3,0E+11	3,7E+11	4,0E+11	3,59E+11	5,00E+10	14	-37,2	NO
PN (ELPI)	#/km	5,4E+11	3,3E+11	2,3E+11	3,68E+11	1,57E+11	43	2,1E+11	2,1E+11	2,1E+11	2,07E+11	9,87E+08	0	-43,8	NO
PN (EEPS)	#/km	2,4E+13	1,6E+13	1,2E+13	1,73E+13	6,19E+12	36	1,1E+13	9,0E+12	9,8E+12	9,93E+12	9,72E+11	10	-42,7	NO
PM soot	mg/km	0,12	0,08	0,04	0,08	0,04	53	0,05	0,03	0,05	0,04	0,01	23	-46,7	NO
Consumo calc.	l/100km	10,65	10,61	10,45	10,57	0,10	1	14,35	14,99	14,69	14,68	0,32	2	38,9	SI'
		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
EUUC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
CO	mg/km	218,0	209,2	233,4	220,22	12,27	6	158,9	98,0	105,9	120,94	33,15	27	-45,1	SI'
THC	mg/km	0,0	0,2	0,4	0,21	0,19	93	1,3	1,5	0,0	0,95	0,83	87	362,0	NO
CH <sub>4</sub>	mg/km	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	-	0,0	1,1	0,0	0,39	0,66	170	-	-
NMHC	mg/km	0,0	0,5	0,5	0,34	0,30	87	1,3	0,4	0,2	0,63	0,59	94	83,8	NO
NOx	mg/km	0,8	1,0	1,1	0,96	0,15	16	3,0	3,0	2,2	2,73	0,50	18	185,9	SI'
CO <sub>2</sub>	g/km	142,1	140,5	140,0	140,88	1,05	1	131,6	127,6	125,0	128,07	3,31	3	-9,1	SI'
PM	mg/km	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	9,8E+10	1,0E+11	5,2E+10	8,41E+10	2,75E+10	33	8,2E+09	2,2E+10	1,3E+10	1,46E+10	7,16E+09	49	-82,7	SI'
PN (ELPI)	#/km	8,7E+10	7,2E+10	4,6E+10	6,83E+10	2,06E+10	30	9,7E+09	2,5E+10	8,6E+09	1,44E+10	9,14E+09	63	-78,9	SI'
PN (EEPS)	#/km	3,5E+12	3,0E+12	1,7E+12	2,73E+12	9,20E+11	34	6,6E+11	7,8E+11	6,1E+11	6,82E+11	8,76E+10	13	-75,0	NO
PM soot	mg/km	0,02	0,02	0,00	0,01	0,01	83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	77	-82,5	NO
Consumo calc.	l/100km	6,01	5,94	5,93	5,96	0,04	1	8,41	8,15	7,99	8,18	0,21	3	37,3	SI'
		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
NEDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
CO	mg/km	858,2	621,6	585,6	688,50	148,10	22	721,7	403,3	552,5	559,14	159,31	28	-18,8	NO
THC	mg/km	65,2	54,5	62,6	60,73	5,59	9	78,8	55,2	68,8	67,62	11,86	18	11,3	NO
CH <sub>4</sub>	mg/km	4,6	3,3	4,3	4,08	0,71	17	5,1	4,7	4,4	4,76	0,36	8	16,8	NO
NMHC	mg/km	60,0	51,6	58,7	56,73	4,52	8	73,8	50,6	64,6	63,02	11,71	19	11,1	NO
NOx	mg/km	3,1	4,4	4,0	3,83	0,68	18	6,1	13,8	6,8	8,92	4,25	48	132,8	NO
CO <sub>2</sub>	g/km	181,4	180,8	179,0	180,39	1,25	1	164,9	166,5	162,8	164,74	1,85	1	-8,7	SI'
PM	mg/km	0,1	0,0	0,2	0,09	0,09	95	0,0	0,0	0,3	0,11	0,18	173	14,1	NO
PN_PMP Compliant	#/km	3,5E+11	2,5E+11	1,9E+11	2,64E+11	8,36E+10	32	1,2E+11	1,5E+11	1,6E+11	1,41E+11	2,11E+10	15	-46,5	NO
PN (ELPI)	#/km	2,5E+11	1,7E+11	1,2E+11	1,79E+11	7,01E+10	39	8,2E+10	9,2E+10	8,1E+10	8,53E+10	6,13E+09	7	-52,3	NO
PN (EEPS)	#/km	1,1E+13	8,0E+12	5,4E+12	8,13E+12	2,83E+12	35	4,5E+12	3,8E+12	4,0E+12	4,09E+12	3,33E+11	8	-49,7	NO
PM soot	mg/km	0,06	0,04	0,02	0,04	0,02	59	0,02	0,01	0,02	0,02	0,00	14	-54,9	NO
Consumo calc.	l/100km	7,72	7,68	7,60	7,67	0,06	1	10,61	10,67	10,45	10,58	0,11	1	38,0	SI'
		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
ERMES		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
CO	mg/km	631,2	355,0	787,1	591,11	218,81	37	342,3	395,4	301,5	346,40	47,10	14	-41,4	NO
THC	mg/km	0,5	1,6	1,9	1,36	0,73	53	2,4	0,9	0,9	1,39	0,87	63	1,9	NO
CH <sub>4</sub>	mg/km	0,4	0,3	0,5	0,42	0,09	22	0,4	0,3	0,3	0,34	0,06	18	-19,3	NO
NMHC	mg/km	0,1	1,3	1,4	0,98	0,73	75	2,0	0,6	0,6	1,06	0,81	77	8,8	NO
NOx	mg/km	2,4	2,3	2,8	2,49	0,25	10	6,6	12,5	-	9,52	4,17	44	281,6	NO
CO <sub>2</sub>	g/km	162,3	161,9	161,4	161,91	0,45	0	153,1	147,1	146,5	148,91	3,68	2	-8,0	SI'
PM	mg/km	0,2	0,1	0,1	0,11	0,05	44	0,1	0,2	0,3	0,18	0,10	54	67,4	NO
PN_PMP Compliant	#/km	2,2E+11	9,1E+10	9,8E+10	1,36E+11	7,26E+10	53	2,2E+10	4,7E+10	9,0E+10	5,31E+10	3,41E+10	64	-61,0	NO
PN (ELPI)	#/km	9,4E+11	1,1E+12	8,2E+11	9,50E+11	1,39E+11	15	1,1E+12	1,2E+12	8,6E+11	1,05E+12	1,66E+11	16	10,1	NO
PN (EEPS)	#/km	1,5E+14	1,7E+14	1,4E+14	1,53E+14	1,36E+13	9	1,7E+14	1,9E+14	1,6E+14	1,74E+14	1,58E+13	9	14,2	NO
PM soot	mg/km	0,06	0,03	0,02	0,04	0,02	59	0,02	0,03	0,03	0,03	0,00	9	-26,3	NO
Consumo calc.	l/100km	6,89	6,86	6,87	6,87	0,02	0	9,80	9,43	9,37	9,53	0,24	2	38,7	SI'

Tabella 22 - Risultati dei test NEDC + ERMES: emissioni allo scarico regolamentate, PM, PN, CO<sub>2</sub> e consumi.

		Benzina						GPL						Δ, %	Significatività statistica (t-test di Student)
UDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	1	2	3	Media	d.s.	CV, %		
NH <sub>3</sub>	mg/km	11,97	11,47	8,18	10,54	2,06	20	12,69	7,43	11,94	10,69	2,85	27	1,4	NO
NO <sub>2</sub>	mg/km	7,91	8,19	7,60	7,90	0,29	4	8,10	7,95	7,00	7,68	0,60	8	-2,8	NO
1,3 Butadiene	mg/km	16,58	14,73	14,27	15,19	1,23	8	15,53	11,41	17,41	14,78	3,07	21	-2,7	NO
Formaldeide	mg/km	0,38	0,34	0,16	0,30	0,12	40	0,80	0,53	0,07	0,46	0,37	79	56,7	NO
Benzene	mg/km	9,81	6,18	9,11	8,37	1,92	23	11,42	4,92	11,80	9,38	3,87	41	12,1	NO
N <sub>2</sub> O	mg/km	2,03	2,60	1,46	2,03	0,57	28	1,62	1,14	2,35	1,70	0,61	36	-16,3	NO
		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	1	2	3	Media	d.s.	CV, %		
EUUC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	1	2	3	Media	d.s.	CV, %		
NH <sub>3</sub>	mg/km	3,54	3,37	2,54	3,15	0,54	17	2,86	3,32	3,87	3,35	0,51	15	6,3	NO
NO <sub>2</sub>	mg/km	3,30	3,27	3,33	3,30	0,03	1	3,38	3,39	3,25	3,34	0,08	2	1,3	NO
1,3 Butadiene	mg/km	7,60	7,40	6,47	7,16	0,61	8	6,96	7,38	7,71	7,35	0,38	5	2,7	NO
Formaldeide	mg/km	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-
Benzene	mg/km	1,08	0,24	1,04	0,79	0,48	61	1,91	7,04	3,51	4,15	2,62	63	428,5	NO
N <sub>2</sub> O	mg/km	1,64	2,24	1,19	1,69	0,53	31	1,86	1,55	1,73	1,72	0,16	9	1,3	NO
		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	1	2	3	Media	d.s.	CV, %		
NEDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	1	2	3	Media	d.s.	CV, %		
NH <sub>3</sub>	mg/km	6,65	6,38	4,62	5,89	1,10	19	6,49	4,83	6,84	6,06	1,07	18	2,9	NO
NO <sub>2</sub>	mg/km	5,00	5,10	4,91	5,00	0,09	2	5,12	5,07	4,63	4,94	0,27	5	-1,2	NO
1,3 Butadiene	mg/km	10,92	10,13	9,35	10,13	0,78	8	10,12	8,87	11,28	10,09	1,21	12	-0,4	NO
Formaldeide	mg/km	0,14	0,13	0,06	0,11	0,04	40	0,29	0,19	0,02	0,17	0,14	79	56,3	NO
Benzene	mg/km	4,30	2,45	4,03	3,59	1,00	28	5,42	6,26	6,56	6,08	0,59	10	69,3	SI'

		Benzina	GPL	Δ, %
<b>Low</b>		1	2	
CO	mg/km	1699,4	1048,8	-38,28
THC	mg/km	316,2	235,1	-25,65
CH <sub>4</sub>	mg/km	17,7	12,9	-26,98
NMHC	mg/km	299,8	222,6	-25,77
NO <sub>x</sub>	mg/km	23,7	31,4	32,48
CO <sub>2</sub>	g/km	240,56	218,91	-9,00
PM	mg/km	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	1,90E+12	1,67E+12	-11,78
PN (ELPI)	#/km	1,16E+12	1,01E+12	-12,31
PN (EEPS)	#/km	4,65E+13	4,25E+13	-8,56
PM soot	mg/km	0,76	0,88	16,96
Consumo calc.	l/100km	10,31	14,11	36,93
<b>Middle</b>		1	2	
CO	mg/km	431,58	168,82	-60,88
THC	mg/km	2,97	0,50	-83,19
CH <sub>4</sub>	mg/km	1,05	0,23	-77,87
NMHC	mg/km	2,00	0,27	-86,30
NO <sub>x</sub>	mg/km	7,82	18,87	141,22
CO <sub>2</sub>	g/km	162,71	143,77	-11,64
PM	mg/km	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	1,50E+11	3,68E+10	-75,54
PN (ELPI)	#/km	1,19E+11	2,82E+10	-76,34
PN (EEPS)	#/km	4,33E+12	1,47E+12	-66,16
PM soot	mg/km	0,01	0,01	-52,39
Consumo calc.	l/100km	6,90	9,19	33,24
<b>High</b>		1	2	
CO	mg/km	299,29	268,43	-10,31
THC	mg/km	1,95	0,23	-88,02
CH <sub>4</sub>	mg/km	0,12	0,07	-43,41
NMHC	mg/km	1,83	0,17	-90,90
NO <sub>x</sub>	mg/km	3,69	8,11	119,88
CO <sub>2</sub>	g/km	139,48	134,82	-3,34
PM	mg/km	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	1,82E+11	7,81E+10	-57,11
PN (ELPI)	#/km	1,37E+11	5,47E+10	-60,14
PN (EEPS)	#/km	4,41E+12	2,37E+12	-46,31
PM soot	mg/km	0,04	0,02	-51,18
Consumo calc.	l/100km	5,91	8,63	46,06
<b>Extra-High</b>		1	2	
CO	mg/km	375,17	287,11	-23,47
THC	mg/km	3,06	2,87	-6,12
CH <sub>4</sub>	mg/km	0,77	1,61	110,12
NMHC	mg/km	2,35	1,31	-44,43
NO <sub>x</sub>	mg/km	0,92	2,92	217,68
CO <sub>2</sub>	g/km	167,81	153,81	-8,34
PM	mg/km	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	2,28E+11	2,86E+10	-87,46
PN (ELPI)	#/km	1,51E+11	2,06E+10	-86,32
PN (EEPS)	#/km	5,50E+12	2,33E+12	-57,63
PM soot	mg/km	0,07	2,85E-02	-61,96
Consumo calc.	l/100km	7,11	9,84	38,46
<b>WLTC</b>		1	2	
CO	mg/km	540,16	358,52	-33,63
THC	mg/km	44,52	32,48	-27,05
CH <sub>4</sub>	mg/km	2,88	2,36	-18,24
NMHC	mg/km	41,85	30,19	-27,87
NO <sub>x</sub>	mg/km	6,22	11,56	85,93
CO <sub>2</sub>	g/km	167,76	154,57	-7,86
PM	mg/km	2,25973	0,29660	-86,87
PN_PMP Compliant	#/km	4,21E+11	2,64E+11	-37,19
PN (ELPI)	#/km	2,74E+11	1,65E+11	-39,92
PN (EEPS)	#/km	1,04E+13	7,51E+12	-27,77
PM soot	mg/km	0,14	0,14	-5,64
Consumo calc.	l/100km	7,12	9,90	39,05

Tabella 24 - Risultati dei test WLTC: emissioni allo scarico regolamentate, PM, PN, CO<sub>2</sub> e consumi.

		Benzina	GPL	Δ, %
<b>Low</b>		1	2	
NH <sub>3</sub>	mg/km	16,0	7,0	-55,92
NO <sub>2</sub>	mg/km	8,5	8,3	-2,30
1,3-Butadiene	mg/km	15,9	14,5	-8,43
Formaldeide	mg/km	2,0	0,6	-69,31
Benzene	mg/km	7,3	6,4	-11,77
N <sub>2</sub> O	mg/km	0,9	1,9	124,06
<b>Middle</b>		1	2	
NH <sub>3</sub>	mg/km	2,2	2,7	22,43
NO <sub>2</sub>	mg/km	3,7	3,6	-3,87
1,3-Butadiene	mg/km	5,1	6,5	28,72
Formaldeide	mg/km	0,0	0,0	-
Benzene	mg/km	0,9	0,9	10,14
N <sub>2</sub> O	mg/km	1,1	1,5	40,35
<b>High</b>		1	2	
NH <sub>3</sub>	mg/km	1,6	2,4	44,95
NO <sub>2</sub>	mg/km	3,1	3,1	0,36
1,3-Butadiene	mg/km	5,2	6,8	32,10
Formaldeide	mg/km	0,0	0,0	-
Benzene	mg/km	1,1	3,5	216,39
N <sub>2</sub> O	mg/km	1,1	1,6	38,53
<b>Extra-High</b>		1	2	
NH <sub>3</sub>	mg/km	1,6	2,8	79,98
NO <sub>2</sub>	mg/km	3,9	4,1	3,74
1,3-Butadiene	mg/km	0,0	0,0	33,83
Formaldeide	mg/km	0,0	0,0	-
Benzene	mg/km	1,5	2,3	54,57
N <sub>2</sub> O	mg/km	1,7	2,3	33,65
<b>WLTC</b>		1	2	
NH <sub>3</sub>	mg/km	3,6	3,2	-11,63
NO <sub>2</sub>	mg/km	4,2	4,2	-0,05
1,3-Butadiene	mg/km	7,1	8,6	20,99
Formaldeide	mg/km	0,27	0,08	-69,42
Benzene	mg/km	2,0	2,9	45,53
N <sub>2</sub> O	mg/km	1,3	1,8	44,17

Tabella 25 - Risultati dei test WLTC: emissioni allo scarico non regolamentate.

		Benzina					GPL				
City		1	2	Media	d.s.	CV, %	3	4	Media	d.s.	CV, %
CO	mg/km	344	408	375,6	45,3	12	246	569	407,5	228,4	56
THC	mg/km	2,8	0,0	1,4	2,0	141	0,0	0,0	0,0	0,0	-
CH4	mg/km	0,06	0,00	0,0	0,0	141	0,00	0,00	0,00	0,00	-
NOx	mg/km	12,0	15,1	13,5	2,2	16	41,7	23,2	32,4	13,1	40
CO2	g/km	266	240	253,1	18,4	7	234	225	229,6	5,9	3
PN_CPC	#/km	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Consumo calc.	l/100km	11,8	10,6	11,2	0,9	8	15,6	15,1	15,4	0,4	2
Rural		1	2	Media	d.s.	CV, %	3	4	Media	d.s.	CV, %
CO	mg/km	212	342	277,2	92,4	33	313	299	305,8	10,2	3
THC	mg/km	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	-
CH4	mg/km	0,00	0,00	0,0	0,0	-	0,00	0,00	0,00	0,00	-
NOx	mg/km	3,4	5,6	4,5	1,6	35	10,3	11,2	10,8	0,6	6
CO2	g/km	176	179	178,0	2,1	1	147	147	147,4	0,0	0
PN_CPC	#/km	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Consumo calc.	l/100km	7,8	7,9	7,9	0,1	1	9,9	9,9	9,9	0,0	0
Motorway		1	2	Media	d.s.	CV, %	3	4	Media	d.s.	CV, %
CO	mg/km	473	833	652,9	254,8	39	833	947	890,1	80,8	9
THC	mg/km	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	3,4	1,7	2,4	141
CH4	mg/km	0,00	0,00	0,0	0,0	-	0,00	0,07	0,04	0,05	141
NOx	mg/km	6,7	8,3	7,5	1,2	15	14,9	13,1	14,0	1,3	9
CO2	g/km	230	262	245,9	22,7	9	220	210	214,6	6,9	3
PN_CPC	#/km	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Consumo calc.	l/100km	10,2	11,6	10,9	1,0	9	14,8	14,2	14,5	0,4	3
Media ciclo		1	2	Media	d.s.	CV, %	3	4	Media	d.s.	CV, %
CO	mg/km	349	532	440,4	129,7	29	458	618	537,8	113,4	21
THC	mg/km	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	-
CH4	mg/km	0,00	0,00	0,0	0,0	-	0,00	0,00	0,00	0,00	-
NOx	mg/km	7,6	10,0	8,8	1,7	19	23,3	16,2	19,7	5,0	25
CO2	g/km	228	230	229,0	1,3	1	202	198	200,0	3,4	2
PN_CPC	#/km	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Consumo calc.	l/100km	10,1	10,2	10,1	0,0	0	13,6	13,3	13,4	0,2	1

Tabella 26 - Risultati dei test RDE: emissioni gassose, PN e consumi.

## VEICOLO 3

		Benzina						GPL						Δ, %	Significatività statistica (t-test di Student)
UDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
CO	mg/km	323,2	328,5	317,2	322,99	5,65	2	698,5	762,2	639,1	699,89	61,56	9	116,7	SI'
THC	mg/km	34,2	44,9	36,1	38,38	5,72	15	109,1	96,7	98,2	101,33	6,77	7	164,0	SI'
CH <sub>4</sub>	mg/km	7,8	8,9	7,9	8,21	0,58	7	16,2	17,8	16,1	16,69	0,95	6	103,2	SI'
NMHC	mg/km	26,9	36,7	28,7	30,77	5,18	17	93,4	79,4	82,5	85,10	7,34	9	176,6	SI'
NOx	mg/km	30,5	36,6	30,9	32,66	3,39	10	30,6	31,2	32,4	31,41	0,89	3	-3,8	NO
CO <sub>2</sub>	g/km	185,7	187,6	183,6	185,63	2,03	1	173,8	179,2	176,8	176,60	2,73	2	-4,9	SI'
PM	mg/km	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	8,6E+11	1,2E+12	1,1E+12	1,08E+12	2,00E+11	19	8,2E+11	1,1E+12	8,4E+11	9,25E+11	1,64E+11	18	-14,1	NO
PN (ELPI)	#/km	5,7E+11	7,9E+11	5,7E+11	6,45E+11	1,26E+11	20	4,1E+11	7,9E+10	5,1E+11	3,34E+11	2,26E+11	68	-48,3	NO
PN (EEPS)	#/km	2,4E+13	3,4E+13	2,5E+13	2,77E+13	5,19E+12	19	1,6E+13	2,9E+13	2,1E+13	2,23E+13	6,27E+12	28	-19,7	NO
PM soot	mg/km	0,38	0,58	0,37	0,44	0,12	28	0,33	0,60	0,43	0,45	0,14	31	2,0	NO
Consumo calc.	l/100km	8,04	8,12	7,95	8,04	0,09	1	10,67	11,00	10,84	10,84	0,17	2	34,8	SI'
EUDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
CO	mg/km	12,1	17,2	8,2	12,50	4,52	36	29,3	36,2	74,3	46,60	24,28	52	272,9	NO
THC	mg/km	0,9	0,1	0,7	0,55	0,42	77	3,0	2,8	3,9	3,25	0,59	18	487,9	SI'
CH <sub>4</sub>	mg/km	0,2	0,2	0,1	0,20	0,06	29	1,9	1,8	2,7	2,13	0,47	22	978,3	SI'
NMHC	mg/km	0,7	0,0	0,5	0,42	0,37	90	1,2	1,0	1,3	1,19	0,15	13	185,2	SI'
NOx	mg/km	1,3	1,3	2,1	1,58	0,42	27	0,7	0,4	1,3	0,81	0,45	56	-48,6	NO
CO <sub>2</sub>	g/km	107,6	107,3	106,7	107,18	0,46	0	99,1	101,4	100,0	100,18	1,19	1	-6,5	SI'
PM	mg/km	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	3,9E+11	4,0E+11	4,8E+11	4,25E+11	5,21E+10	12	1,2E+11	1,0E+11	1,6E+11	1,29E+11	3,12E+10	24	-69,6	SI'
PN (ELPI)	#/km	2,4E+11	2,5E+11	2,6E+11	2,52E+11	8,45E+09	3	6,0E+10	4,5E+09	1,1E+11	5,86E+10	5,37E+10	92	-76,7	SI'
PN (EEPS)	#/km	1,0E+13	1,1E+13	1,1E+13	1,08E+13	5,26E+11	5	2,5E+12	2,9E+12	4,5E+12	3,29E+12	1,06E+12	32	-69,6	SI'
PM soot	mg/km	0,13	0,13	0,15	0,14	0,01	9	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01	49	-38,3	SI'
Consumo calc.	l/100km	4,64	4,63	4,60	4,63	0,02	0	6,03	6,18	6,10	6,10	0,07	1	31,9	SI'
NEDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
CO	mg/km	126,7	132,3	122,2	127,06	5,06	4	275,6	303,8	282,7	287,38	14,66	5	126,2	SI'
THC	mg/km	13,2	16,7	13,7	14,51	1,87	13	42,1	37,4	38,7	39,40	2,40	6	171,5	SI'
CH <sub>4</sub>	mg/km	3,0	3,4	3,0	3,15	0,24	8	7,1	7,7	7,6	7,49	0,31	4	137,5	SI'
NMHC	mg/km	10,4	13,5	10,9	11,59	1,65	14	35,1	29,9	31,3	32,11	2,70	8	177,1	SI'
NOx	mg/km	12,1	14,4	12,7	13,05	1,18	9	11,7	11,8	12,8	12,09	0,58	5	-7,3	NO
CO <sub>2</sub>	g/km	136,4	137,0	135,0	136,13	1,00	1	126,6	130,1	128,4	128,35	1,77	1	-5,7	SI'
PM	mg/km	0,0	0,0	0,0	0,01	0,01	47	0,0	-	0,1	0,06	0,03	56	324,8	NO
PN_PMP Compliant	#/km	5,6E+11	7,1E+11	7,2E+11	6,65E+11	8,98E+10	13	3,8E+11	4,7E+11	4,1E+11	4,23E+11	4,75E+10	11	-36,5	SI'
PN (ELPI)	#/km	3,7E+11	4,5E+11	3,8E+11	3,97E+11	4,60E+10	12	1,9E+11	3,2E+10	2,6E+11	1,60E+11	1,16E+11	73	-59,7	SI'
PN (EEPS)	#/km	1,5E+13	1,9E+13	1,6E+13	1,71E+13	2,01E+12	12	7,6E+12	1,3E+13	1,1E+13	1,03E+13	2,49E+12	24	-39,7	SI'
PM soot	mg/km	0,22	0,30	0,23	0,25	0,04	17	0,13	0,23	0,17	0,18	0,05	29	-29,4	NO
Consumo calc.	l/100km	5,89	5,92	5,84	5,88	0,04	1	7,74	7,96	7,85	7,85	0,11	1	33,4	SI'
ERMES		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
CO	mg/km	11,0	8,3	13,3	10,86	2,50	23	68,3	40,9	32,3	47,16	18,81	40	334,2	NO
THC	mg/km	1,3	0,8	1,3	1,14	0,29	25	3,4	3,4	3,0	3,24	0,22	7	183,4	SI'
CH <sub>4</sub>	mg/km	0,4	0,4	0,4	0,40	0,03	6	1,0	1,1	1,1	1,07	0,07	7	166,3	SI'
NMHC	mg/km	1,0	0,4	0,9	0,77	0,29	37	2,4	2,3	1,9	2,20	0,24	11	185,4	SI'
NOx	mg/km	11,8	10,5	10,9	11,07	0,69	6	10,4	8,0	6,8	8,42	1,84	22	-23,9	NO
CO <sub>2</sub>	g/km	121,9	121,6	121,1	121,53	0,41	0	113,3	114,0	112,9	113,41	0,53	0	-6,7	SI'
PM	mg/km	-	0,1	0,2	0,11	0,05	48	0,1	0,1	0,1	0,11	0,02	16	-4,8	NO
PN_PMP Compliant	#/km	6,1E+11	6,1E+11	7,0E+11	6,41E+11	5,01E+10	8	1,3E+11	3,6E+10	4,2E+10	6,83E+10	5,08E+10	74	-89,3	SI'
PN (ELPI)	#/km	3,6E+11	3,6E+11	3,7E+11	3,64E+11	1,54E+09	0	5,6E+10	3,8E+09	9,7E+10	5,25E+10	4,69E+10	89	-85,6	SI'
PN (EEPS)	#/km	1,6E+13	1,6E+13	1,7E+13	1,62E+13	3,16E+11	2	1,6E+13	1,7E+13	3,0E+13	2,08E+13	7,62E+12	37	28,1	NO
PM soot	mg/km	0,22	0,23	0,23	0,22	0,01	3	0,04	0,03	0,03	0,03	0,01	18	-84,7	SI'
Consumo calc.	l/100km	5,26	5,25	5,23	5,25	0,02	0	6,91	6,94	6,88	6,91	0,03	0	31,7	SI'

Tabella 27 - Risultati dei test NEDC + ERMES: emissioni allo scarico regolamentate, PM, PN, CO<sub>2</sub> e consumi.

		Benzina						GPL						Δ, %	Significatività statistica (t-test di Student)
UDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
NH <sub>3</sub>	mg/km	4,76	6,15	5,31	5,41	0,70	13	13,54	10,89	8,56	10,99	2,49	23	103,4	SI'
NO <sub>2</sub>	mg/km	4,98	5,51	5,23	5,24	0,26	5	6,45	6,33	6,80	6,52	0,24	4	24,5	SI'
1,3 Butadiene	mg/km	10,02	12,92	12,29	11,74	1,52	13	16,35	16,54	15,78	16,22	0,40	2	38,2	SI'
Formaldeide	mg/km	0,22	0,06	0,03	0,10	0,10	98	0,11	0,31	0,19	0,20	0,10	50	93,4	NO
Benzene	mg/km	1,02	18,36	4,01	7,79	9,27	119	12,00	24,98	13,15	16,71	7,18	43	114,4	NO
N <sub>2</sub> O	mg/km	5,84	5,52	4,35	5,24	0,79	15	6,04	5,92	5,62	5,86	0,22	4	11,9	NO
EUDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
NH <sub>3</sub>	mg/km	3,78	5,73	4,34	4,62	1,00	22	6,73	7,98	8,50	7,74	0,91	12	67,7	SI'
NO <sub>2</sub>	mg/km	2,34	2,38	2,42	2,38	0,04	2	3,03	2,88	3,08	3,00	0,10	3	25,9	SI'
1,3 Butadiene	mg/km	6,44	7,74	7,58	7,25	0,71	10	8,35	9,73	9,80	9,29	0,82	9	28,1	SI'
Formaldeide	mg/km	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-
Benzene	mg/km	0,18	8,79	1,69	3,56	4,60	129	4,81	14,27	4,17	7,75	5,65	73	117,9	NO
N <sub>2</sub> O	mg/km	1,86	1,88	1,42	1,72	0,26	15	1,91	2,32	2,00	2,08	0,22	10	20,8	NO
NEDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
NH <sub>3</sub>	mg/km	4,14	5,88	4,70	4,91	0,89	18	9,24	9,05	8,52	8,94	0,37	4	82,1	SI'
NO <sub>2</sub>	mg/km	3,31	3,54	3,46	3,44	0,11	3	4,29	4,15	4,45	4,30	0,15	4	25,1	SI'
1,3 Butadiene	mg/km	7,76	9,66	9,32	8,91	1,01	11	11,30	12,24	12,01	11,85	0,49	4	33,0	SI'
Formaldeide	mg/km	0,08	0,02	0,01	0,04	0,04	98	0,04	0,11	0,07	0,07	0,04	50	93,4	NO
Benzene	mg/km	0,49	12,33	2,55	5,12	6,33	123	7,46	18,22	7,49	11,05	6,20	56	115,8	NO
N <sub>2</sub> O	mg/km	3,33	3,23	2,50	3,02	0,45	15	3,43	3,65	3,34	3,47	0,16	5	15,0	NO
ERMES		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
NH <sub>3</sub>	mg/km	0,96	1,17	1,49	1,21	0,27	22	3,11	1,66	1,86	2,21	0,78	36	83,2	NO
NO <sub>2</sub>	mg/km	1,63	1,60	1,68	1,64	0,04	2	2,11	1,92	2,06	2,03	0,10	5	24,0	SI'
1,3															

		Benzina	GPL	
		1	2	$\Delta$ , %
<b>Low</b>				
CO	mg/km	1112,0	1303,7	17,24
THC	mg/km	80,6	138,5	71,93
CH <sub>4</sub>	mg/km	13,9	27,2	94,77
NMHC	mg/km	67,6	112,1	65,76
NOx	mg/km	56,8	55,0	-3,24
CO <sub>2</sub>	g/km	185,64	177,07	-4,62
PM	mg/km	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	3,77E+12	3,72E+12	-1,34
PN (ELPI)	#/km	2,02E+12	2,01E+12	-0,85
PN (EEPS)	#/km	7,14E+13	7,53E+13	5,44
PM soot	mg/km	2,07	1,98	-4,44
Consumo calc.	l/100km	8,10	10,93	34,98
<b>Middle</b>				
CO	mg/km	0,00	178,82	-
THC	mg/km	1,37	9,94	623,44
CH <sub>4</sub>	mg/km	0,83	7,25	770,02
NMHC	mg/km	0,60	2,88	380,33
NOx	mg/km	9,98	6,58	-34,08
CO <sub>2</sub>	g/km	124,24	115,68	-6,89
PM	mg/km	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	4,61E+11	5,51E+11	19,72
PN (ELPI)	#/km	2,69E+11	3,39E+11	26,03
PN (EEPS)	#/km	1,21E+13	1,51E+13	25,10
PM soot	mg/km	0,14	0,15	5,26
Consumo calc.	l/100km	5,36	7,06	31,71
<b>High</b>				
CO	mg/km	25,59	44,20	72,76
THC	mg/km	0,32	1,91	499,74
CH <sub>4</sub>	mg/km	0,00	1,13	-
NMHC	mg/km	0,33	0,81	147,02
NOx	mg/km	6,28	6,39	1,84
CO <sub>2</sub>	g/km	108,21	100,21	-7,40
PM	mg/km	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	4,13E+11	2,60E+11	-37,07
PN (ELPI)	#/km	2,37E+11	1,71E+11	-27,89
PN (EEPS)	#/km	1,01E+13	6,10E+12	-39,59
PM soot	mg/km	-	-	-
Consumo calc.	l/100km	4,67	6,11	30,69
<b>Extra-High</b>				
CO	mg/km	37,58	75,08	99,82
THC	mg/km	3,41	3,14	-8,07
CH <sub>4</sub>	mg/km	1,07	1,09	1,69
NMHC	mg/km	2,42	2,08	-14,08
NOx	mg/km	6,36	2,83	-55,51
CO <sub>2</sub>	g/km	111,70	106,75	-4,43
PM	mg/km	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	9,06E+11	6,94E+10	-92,34
PN (ELPI)	#/km	4,82E+11	4,34E+10	-90,99
PN (EEPS)	#/km	2,06E+13	1,70E+12	-91,77
PM soot	mg/km	0,36	3,22E-02	-90,96
Consumo calc.	l/100km	4,82	6,51	34,90
<b>WLTC</b>				
CO	mg/km	168,78	249,75	47,97
THC	mg/km	12,28	22,11	80,02
CH <sub>4</sub>	mg/km	2,40	5,82	142,40
NMHC	mg/km	10,06	16,45	63,56
NOx	mg/km	13,77	11,61	-15,67
CO <sub>2</sub>	g/km	122,99	115,89	-5,78
PM	mg/km	0,11562	0,22319	93,04
PN_PMP Compliant	#/km	1,04E+12	7,11E+11	-31,89
PN (ELPI)	#/km	5,67E+11	4,03E+11	-28,91
PN (EEPS)	#/km	2,24E+13	1,56E+13	-30,47
PM soot	mg/km	0,48	0,32	-33,00
Consumo calc.	l/100km	5,32	7,08	33,13

Tabella 29 - Risultati dei test WLTC: emissioni allo scarico regolamentate, PM, PN, CO<sub>2</sub> e consumi.

		Benzina	GPL	
		1	2	$\Delta$ , %
<b>Low</b>				
NH <sub>3</sub>	mg/km	20,4	19,4	-5,00
NO <sub>2</sub>	mg/km	5,6	6,6	17,93
1,3-Butadiene	mg/km	17,3	16,0	-7,27
Formaldeide	mg/km	0,6	0,7	26,44
Benzene	mg/km	12,2	22,9	88,28
N <sub>2</sub> O	mg/km	9,6	6,6	-31,01
<b>Middle</b>				
NH <sub>3</sub>	mg/km	7,6	14,7	92,19
NO <sub>2</sub>	mg/km	3,0	3,7	22,83
1,3-Butadiene	mg/km	10,0	11,8	17,62
Formaldeide	mg/km	0,0	0,0	-
Benzene	mg/km	13,6	21,5	57,89
N <sub>2</sub> O	mg/km	2,7	2,5	-4,76
<b>High</b>				
NH <sub>3</sub>	mg/km	4,7	7,1	51,14
NO <sub>2</sub>	mg/km	2,3	2,9	26,23
1,3-Butadiene	mg/km	7,6	8,0	5,42
Formaldeide	mg/km	0,0	0,0	-
Benzene	mg/km	7,1	13,8	93,04
N <sub>2</sub> O	mg/km	1,9	1,8	-2,88
<b>Extra-High</b>				
NH <sub>3</sub>	mg/km	3,0	7,0	133,75
NO <sub>2</sub>	mg/km	2,9	3,7	27,21
1,3-Butadiene	mg/km	8,7	9,6	10,74
Formaldeide	mg/km	0,0	0,0	-
Benzene	mg/km	6,0	15,8	161,89
N <sub>2</sub> O	mg/km	2,6	2,5	-4,36
<b>WLTC</b>				
NH <sub>3</sub>	mg/km	6,8	10,2	51,05
NO <sub>2</sub>	mg/km	3,1	3,8	23,89
1,3-Butadiene	mg/km	9,8	10,4	6,68
Formaldeide	mg/km	0,08	0,10	26,42
Benzene	mg/km	8,7	17,3	97,93
N <sub>2</sub> O	mg/km	3,3	2,8	-14,35

Tabella 30 - Risultati dei test WLTC: emissioni allo scarico non regolamentate.

		Benzina					GPL				
City		1	2	Media	d.s.	CV, %	3	4	Media	d.s.	CV, %
CO	mg/km	53	100	76,2	33,3	44	52	94	72,8	30,0	41
THC	mg/km	3,5	32,6	18,0	20,6	114	13,9	16,4	15,2	1,8	12
CH4	mg/km	0,08	0,72	0,4	0,5	114	0,30	0,36	0,33	0,04	12
NOx	mg/km	18,3	29,2	23,8	7,7	33	51,9	43,5	47,7	5,9	12
CO2	g/km	195	191	192,6	2,8	1	168	175	171,3	4,8	3
PN_CPC	#/km	1,37E+12	1,18E+12	1,3E+12	1,4E+11	11	5,08E+11	5,91E+11	5,49E+11	5,87E+10	11
Consumo calc.	l/100km	8,6	8,4	8,5	0,1	1	11,3	11,7	11,5	0,3	2
Rural		1	2	Media	d.s.	CV, %	3	4	Media	d.s.	CV, %
CO	mg/km	21	28	24,4	4,8	20	60	37	48,3	16,3	34
THC	mg/km	0,0	0,0	0,0	0,0	-	1,9	0,6	1,3	0,9	69
CH4	mg/km	0,00	0,00	0,0	0,0	-	0,04	0,01	0,03	0,02	69
NOx	mg/km	3,0	1,0	2,0	1,4	71	1,6	2,1	1,8	0,3	18
CO2	g/km	121	122	121,6	0,2	0	128	110	118,7	12,9	11
PN_CPC	#/km	7,15E+11	6,94E+11	7,0E+11	1,5E+10	2	1,29E+11	1,04E+11	1,17E+11	1,76E+10	15
Consumo calc.	l/100km	5,4	5,4	5,4	0,0	0	8,6	7,4	8,0	0,9	11
Motorway		1	2	Media	d.s.	CV, %	3	4	Media	d.s.	CV, %
CO	mg/km	110	103	106,1	5,0	5	295	176	235,5	83,9	36
THC	mg/km	9,5	5,9	7,7	2,5	33	27,6	14,5	21,1	9,2	44
CH4	mg/km	0,21	0,13	0,2	0,1	33	0,61	0,32	0,46	0,20	44
NOx	mg/km	29,5	32,5	31,0	2,2	7	8,7	14,8	11,8	4,3	36
CO2	g/km	188	189	188,7	0,3	0	159	166	162,6	4,8	3
PN_CPC	#/km	1,22E+12	1,09E+12	1,2E+12	9,1E+10	8	1,53E+11	2,78E+11	2,15E+11	8,81E+10	41
Consumo calc.	l/100km	8,4	8,4	8,4	0,0	0	10,8	11,2	11,0	0,3	3
Media ciclo		1	2	Media	d.s.	CV, %	3	4	Media	d.s.	CV, %
CO	mg/km	62	78	69,8	11,7	17	135	104	119,5	22,1	19
THC	mg/km	4,2	13,4	8,8	6,5	74	14,8	11,0	12,9	2,7	21
CH4	mg/km	0,09	0,30	0,2	0,1	74	0,32	0,24	0,28	0,06	21
NOx	mg/km	17,2	21,4	19,3	3,0	15	22,1	21,2	21,7	0,6	3
CO2	g/km	170	169	169,1	0,8	0	153	152	152,3	0,6	0
PN_CPC	#/km	1,11E+12	9,96E+11	1,1E+12	8,3E+10	8	2,73E+11	3,37E+11	3,05E+11	4,48E+10	15
Consumo calc.	l/100km	7,5	7,5	7,5	0,0	0	10,3	10,2	10,3	0,1	1

Tabella 31 - Risultati dei test RDE: emissioni gassose, PN e consumi.

## VEICOLO 4

		Benzina						GPL						Δ, %	Significatività statistica (t-test di Student)
UDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
CO	mg/km	706,3	648,5	617,1	657,30	45,25	7	1892,9	1947,7	1717,0	1852,53	120,56	7	181,8	SI'
THC	mg/km	-	58,4	74,9	66,61	11,67	18	118,6	113,3	138,5	123,46	13,31	11	85,3	SI'
CH <sub>4</sub>	mg/km	7,8	7,4	9,9	8,38	1,37	16	19,9	17,4	19,0	18,78	1,24	7	124,1	SI'
NMHC	mg/km	-	51,4	65,5	58,41	9,96	17	99,3	96,3	120,0	105,19	12,91	12	80,1	SI'
NO <sub>x</sub>	mg/km	15,9	20,0	25,9	20,62	5,01	24	-	13,8	12,3	13,03	1,04	8	-36,8	NO
CO <sub>2</sub>	g/km	175,2	186,1	179,4	180,22	5,46	3	164,3	160,4	162,6	162,46	1,94	1	-9,9	SI'
PM	mg/km	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	3,3E+11	1,3E+11	2,4E+11	2,32E+11	9,68E+10	42	4,1E+11	3,4E+11	3,3E+11	3,59E+11	4,54E+10	13	55,1	NO
PN (ELPI)	#/km	2,0E+11	1,0E+11	1,9E+11	1,65E+11	5,46E+10	33	3,2E+11	3,4E+11	1,9E+11	2,82E+11	8,34E+10	30	71,2	NO
PN (EEPS)	#/km	1,1E+13	5,0E+12	8,8E+12	8,25E+12	3,01E+12	36	1,6E+13	1,6E+13	1,1E+13	1,41E+13	2,75E+12	19	70,8	SI'
PMsoot	mg/km	0,05	0,01	0,07	0,04	0,03	64	0,09	0,13	0,05	0,09	0,04	47	105,3	NO
Consumo calc.	l/100km	7,61	8,06	7,78	7,82	0,23	3	10,31	10,08	10,19	10,19	0,12	1	30,4	SI'
EUUDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
CO	mg/km	8,2	1,3	7,8	5,73	3,87	68	79,9	84,6	60,7	75,05	12,66	17	1210,4	SI'
THC	mg/km	0,0	0,0	0,0	-	-	-	0,3	0,3	0,9	0,50	0,38	76	-	-
CH <sub>4</sub>	mg/km	0,0	0,1	0,2	0,10	0,10	97	0,2	0,3	0,5	0,31	0,15	49	207,8	NO
NMHC	mg/km	0,0	0,0	0,0	-	-	-	0,1	0,0	0,5	0,20	0,26	130	-	-
NO <sub>x</sub>	mg/km	1,7	2,4	0,4	1,51	1,02	67	-	1,2	1,0	1,07	0,13	12	-29,5	NO
CO <sub>2</sub>	g/km	112,9	117,5	117,1	115,83	2,53	2	105,0	104,2	104,6	104,58	0,37	0	-9,7	SI'
PM	mg/km	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	1,1E+10	1,2E+10	1,3E+10	1,21E+10	5,84E+08	5	1,2E+10	6,3E+09	1,1E+10	9,88E+09	3,17E+09	32	-18,6	NO
PN (ELPI)	#/km	8,1E+09	1,6E+10	9,8E+09	1,14E+10	4,23E+09	33	1,3E+10	9,2E+09	8,6E+09	1,02E+10	2,28E+09	22	-10,2	NO
PN (EEPS)	#/km	6,2E+11	5,0E+11	5,1E+11	5,42E+11	6,96E+10	17	6,1E+11	5,0E+11	5,2E+11	5,44E+11	6,14E+10	11	0,3	NO
PMsoot	mg/km	0,00	0,00	0,00	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	34	-	-
Consumo calc.	l/100km	4,86	5,06	5,04	4,99	0,11	2	6,46	6,42	6,44	6,44	0,02	0	29,1	SI'
NEDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
CO	mg/km	265,4	240,2	232,0	245,86	17,39	7	752,3	772,2	670,1	731,54	54,10	7	197,5	SI'
THC	mg/km	-	21,5	27,6	24,55	4,25	17	44,2	42,0	51,6	45,90	5,02	11	87,0	SI'
CH <sub>4</sub>	mg/km	2,9	2,8	3,8	3,15	0,56	18	7,5	6,6	7,3	7,13	0,44	6	126,3	SI'
NMHC	mg/km	-	18,8	23,2	21,04	3,10	15	36,9	35,5	44,5	38,97	4,81	12	85,2	SI'
NO <sub>x</sub>	mg/km	7,0	8,9	9,8	8,55	1,44	17	-	5,8	5,1	5,48	0,47	9	-36,0	SI'
CO <sub>2</sub>	g/km	135,9	142,8	140,0	139,56	3,48	2	127,0	125,0	125,9	125,96	1,00	1	-9,7	SI'
PM	mg/km	0,5	0,5	0,2	0,43	0,17	40	0,0	0,0	0,0	0,00	0,01	173	-98,9	NO
PN_PMP Compliant	#/km	1,3E+11	5,7E+10	9,5E+10	9,30E+10	3,53E+10	38	1,6E+11	1,3E+11	1,3E+11	1,39E+11	1,87E+10	13	49,4	NO
PN (ELPI)	#/km	8,0E+10	4,8E+10	7,6E+10	6,78E+10	1,74E+10	26	1,3E+11	1,3E+11	7,4E+10	1,11E+11	3,18E+10	29	63,0	NO
PN (EEPS)	#/km	4,4E+12	2,2E+12	3,6E+12	3,38E+12	1,14E+12	34	6,3E+12	6,0E+12	4,4E+12	5,55E+12	1,05E+12	19	64,1	NO
PMsoot	mg/km	0,02	0,00	0,02	0,02	0,01	64	0,03	0,05	0,02	0,03	0,02	47	106,8	NO
Consumo calc.	l/100km	5,88	6,17	6,05	6,03	0,15	2	7,89	7,77	7,82	7,83	0,06	1	29,8	SI'
ERMES		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
CO	mg/km	529,8	507,0	529,3	522,04	13,03	2	228,9	245,3	173,7	215,96	37,51	17	-58,6	SI'
THC	mg/km	0,0	0,0	0,0	-	-	-	0,6	0,0	0,5	0,39	0,34	88	-	-
CH <sub>4</sub>	mg/km	0,9	0,5	0,6	0,65	0,21	32	0,1	0,4	0,2	0,25	0,18	71	-61,8	SI'
NMHC	mg/km	0	0,7	0	0,74	-	-	0,5	0,7	0,3	0,54	0,20	37	-27,2	-
NO <sub>x</sub>	mg/km	8,4	8,4	6,5	7,76	1,13	15	28,9	25,8	35,1	29,93	4,73	16	285,5	SI'
CO <sub>2</sub>	g/km	125,5	126,9	125,5	125,96	0,84	1	120,7	120,3	119,8	120,26	0,43	0	-4,5	SI'
PM	mg/km	0,3	0,2	0,1	0,21	0,11	52	0,1	0,0	0,0	0,02	0,03	173	-90,6	NO
PN_PMP Compliant	#/km	1,3E+11	6,6E+10	1,1E+11	1,03E+11	3,47E+10	34	1,3E+11	8,3E+09	1,0E+11	1,05E+11	2,41E+09	23	-89,8	SI'
PN (ELPI)	#/km	8,9E+10	5,1E+10	8,1E+10	7,37E+10	2,02E+10	27	7,7E+10	1,7E+10	7,1E+09	3,38E+10	3,80E+10	112	-54,1	NO
PN (EEPS)	#/km	3,5E+12	2,5E+12	3,5E+12	3,17E+12	6,08E+11	19	8,6E+11	9,0E+11	8,8E+11	8,81E+11	1,96E+10	2	-72,2	SI'
PMsoot	mg/km	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	47	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	32	-46,8	NO
Consumo calc.	l/100km	5,44	5,50	5,44	5,46	0,04	1	7,44	7,42	7,39	7,42	0,03	0	35,9	SI'

Tabella 32 - Risultati dei test NEDC + ERMES: emissioni allo scarico regolamentate, PM, PN, CO<sub>2</sub> e consumi.

		Benzina						GPL						Δ, %	Significatività statistica (t-test di Student)
UDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	1	2	3	Media	d.s.	CV, %		
NH <sub>3</sub>	mg/km	2,31	6,10	3,33	3,91	1,96	50	6,96	10,57	12,58	10,04	2,85	28	156,4	SI'
NO <sub>2</sub>	mg/km	6,53	6,93	5,17	6,21	0,93	15	7,10	6,79	6,74	6,88	0,19	3	10,7	NO
1,3 Butadiene	mg/km	6,32	9,86	9,59	8,59	1,97	23	8,70	11,50	11,30	10,50	1,56	15	22,2	NO
Formaldeide	mg/km	0,02	0,04	0,00	0,02	0,02	91	0,21	0,03	0,09	0,11	0,09	82	436,6	NO
Benzene	mg/km	2,11	5,35	2,99	3,49	1,68	48	4,67	6,25	6,94	5,95	1,16	19	70,8	NO
N <sub>2</sub> O	mg/km	8,48	6,13	4,99	6,53	1,78	27	3,21	3,79	3,73	3,58	0,32	9	-45,3	NO
EUUDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	1	2	3	Media	d.s.	CV, %		
NH <sub>3</sub>	mg/km	1,26	4,22	1,56	2,35	1,63	70	5,67	7,57	8,56	7,26	1,47	20	209,6	SI'
NO <sub>2</sub>	mg/km	3,04	2,74	3,03	2,94	0,17	6	2,73	2,76	4,27	3,25	0,88	27	10,8	NO
1,3 Butadiene	mg/km	3,37	6,22	5,11	4,90	1,44	29	5,81	7,90	7,60	7,11	1,13	16	44,9	NO
Formaldeide	mg/km	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-
Benzene	mg/km	0,00	0,33	0,28	0,20	0,18	87	0,30	3,37	-	1,84	2,17	118	801,1	NO
N <sub>2</sub> O	mg/km	0,66	1,35	1,28	1,10	0,38	35	1,39	1,78	1,75	1,64	0,22	13	49,9	NO
NEDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	1	2	3	Media	d.s.	CV, %		
NH <sub>3</sub>	mg/km	1,64	4,92	2,21	2,92	1,75	60	6,15	8,68	10,04	8,29	1,97	24	183,4	SI'
NO <sub>2</sub>	mg/km	4,33	4,29	3,82	4,14	0,28	7	4,35	4,25	5,18	4,59	0,51	11	10,8	NO
1,3 Butadiene	mg/km	4,46	7,57	6,76	6,26	1,61	26	6,88	9,23	8,96	8,36	1,29	15	33,5	NO
Formaldeide	mg/km	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	91	0,08	0,01	0,03	0,04	0,03	82	437,9	NO
Benzene	mg/km	0,78	2,18	1,28	1,41	0,71	50	1,92	4,43	-	3,18	1,77	56	124,8	NO
N <sub>2</sub> O	mg/km	3,54	3,11	2,65	3,10	0,44	14	2,07	2,52	2,48	2,36	0,25	11	-24,0	NO
ERMES		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	1	2	3	Media	d.s.	CV, %		
NH <sub>3</sub>	mg/km	5,57	4,74	2,36	4,23	1,67	39	3,95	4,98	4,51	4,48	0,52	12	6,0	NO
NO <sub>2</sub>	mg/km	5,54	1,93	2,16	3,21	2,02	63	2,57	2,32	2,62	2,50	0,16	6	-22,0	NO
1,3 Butadiene	mg/km	8,30	6,57	5,20	6,69	1,55									

		Benzina	GPL	
Low		1	2	Δ, %
CO	mg/km	1858,6	3494,6	88,03
THC	mg/km	153,9	172,1	11,87
CH <sub>4</sub>	mg/km	13,6	25,4	86,03
NMHC	mg/km	141,0	147,4	4,59
NOx	mg/km	29,8	26,6	-10,73
CO <sub>2</sub>	g/km	159,88	152,24	-4,78
PM	mg/km	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	8,72E+11	3,82E+11	-56,22
PN (ELPI)	#/km	5,74E+11	2,22E+11	-61,32
PN (EEPS)	#/km	2,78E+13	1,57E+13	-43,69
PM soot	mg/km	0,27	0,09	-67,74
Consumo calc.	l/100km	7,03	9,73	38,41
Middle		1	2	
CO	mg/km	233,78	470,06	101,07
THC	mg/km	1,63	4,62	182,88
CH <sub>4</sub>	mg/km	0,83	2,39	187,84
NMHC	mg/km	0,85	2,29	170,67
NOx	mg/km	11,94	10,48	-12,24
CO <sub>2</sub>	g/km	116,07	110,85	-4,49
PM	mg/km	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	1,10E+11	2,47E+10	-77,46
PN (ELPI)	#/km	6,13E+10	1,54E+10	-74,92
PN (EEPS)	#/km	3,23E+12	9,94E+11	-69,25
PM soot	mg/km	0,00	0,00	-75,19
Consumo calc.	l/100km	5,01	6,86	36,87
High		1	2	
CO	mg/km	83,15	246,36	196,30
THC	mg/km	0,57	0,00	-
CH <sub>4</sub>	mg/km	0,00	0,57	-
NMHC	mg/km	0,56	0,00	-
NOx	mg/km	3,33	2,22	-33,32
CO <sub>2</sub>	g/km	109,85	105,32	-4,12
PM	mg/km	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	5,19E+10	1,27E+10	-75,61
PN (ELPI)	#/km	3,95E+10	1,05E+10	-73,41
PN (EEPS)	#/km	1,84E+12	4,76E+11	-74,09
PM soot	mg/km	0,01	0,00	-100,00
Consumo calc.	l/100km	4,74	6,50	37,25
Extra-High		1	2	
CO	mg/km	79,87	181,02	126,64
THC	mg/km	2,01	0,30	-84,95
CH <sub>4</sub>	mg/km	0,16	0,44	175,03
NMHC	mg/km	1,86	0,00	-
NOx	mg/km	1,32	7,06	436,51
CO <sub>2</sub>	g/km	135,80	124,30	-8,47
PM	mg/km	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	4,93E+10	1,20E+10	-75,74
PN (ELPI)	#/km	4,09E+10	1,78E+10	-56,45
PN (EEPS)	#/km	4,29E+12	3,55E+12	-17,37
PM soot	mg/km	0,01	1,91E-02	33,69
Consumo calc.	l/100km	5,85	7,66	30,88
WLTC		1	2	
CO	mg/km	348,19	701,19	101,38
THC	mg/km	21,62	23,96	10,84
CH <sub>4</sub>	mg/km	2,04	4,20	106,18
NMHC	mg/km	19,69	20,09	2,03
NOx	mg/km	7,88	8,87	12,47
CO <sub>2</sub>	g/km	126,97	119,44	-5,94
PM	mg/km	0,06352	0,00551	-91,33
PN_PMP Compliant	#/km	1,71E+11	6,40E+10	-62,68
PN (ELPI)	#/km	1,15E+11	4,22E+10	-63,37
PN (EEPS)	#/km	6,44E+12	3,69E+12	-42,63
PM soot	mg/km	0,04	0,02	-56,97
Consumo calc.	l/100km	5,49	7,42	34,99

Tabella 34 - Risultati dei test WLTC: emissioni allo scarico regolamentate, PM, PN, CO<sub>2</sub> e consumi.

		Benzina	GPL	
Low		1	2	Δ, %
NH <sub>3</sub>	mg/km	14,2	27,0	90,15
NO <sub>2</sub>	mg/km	5,9	6,8	15,47
1,3-Butadiene	mg/km	12,5	14,9	18,69
Formaldeide	mg/km	0,0	0,4	-
Benzene	mg/km	1,4	6,2	351,77
N <sub>2</sub> O	mg/km	4,6	4,6	0,06
Middle		1	2	
NH <sub>3</sub>	mg/km	9,4	19,1	103,93
NO <sub>2</sub>	mg/km	2,8	3,2	13,80
1,3-Butadiene	mg/km	7,2	9,7	34,33
Formaldeide	mg/km	0,0	0,0	-
Benzene	mg/km	0,0	1,2	-
N <sub>2</sub> O	mg/km	1,5	1,1	-30,91
High		1	2	
NH <sub>3</sub>	mg/km	8,1	20,4	153,33
NO <sub>2</sub>	mg/km	2,3	2,8	20,51
1,3-Butadiene	mg/km	7,1	11,3	59,20
Formaldeide	mg/km	0,0	0,0	-
Benzene	mg/km	0,1	6,5	7940,26
N <sub>2</sub> O	mg/km	1,5	1,5	0,05
Extra-High		1	2	
NH <sub>3</sub>	mg/km	10,1	27,1	168,89
NO <sub>2</sub>	mg/km	3,2	3,9	24,16
1,3-Butadiene	mg/km	11,3	17,5	54,82
Formaldeide	mg/km	0,0	0,0	-
Benzene	mg/km	1,9	16,3	773,73
N <sub>2</sub> O	mg/km	2,9	2,9	1,91
WLTC		1	2	
NH <sub>3</sub>	mg/km	9,9	23,4	137,34
NO <sub>2</sub>	mg/km	3,2	3,8	19,41
1,3-Butadiene	mg/km	9,3	13,6	46,19
Formaldeide	mg/km	0,00	0,06	-
Benzene	mg/km	0,9	8,9	918,52
N <sub>2</sub> O	mg/km	2,4	2,4	-3,07

Tabella 35 - Risultati dei test WLTC: emissioni allo scarico non regolamentate.

		Benzina					GPL				
City		1	2	Media	d.s.	CV, %	3	4	Media	d.s.	CV, %
CO	mg/km	254	166	210,1	62,1	30	442	764	603,4	227,8	38
THC	mg/km	20,8	0,0	10,4	14,7	141	3,1	38,0	20,5	24,6	120
CH4	mg/km	0,46	0,00	0,2	0,3	141	0,07	0,83	0,45	0,54	120
NOx	mg/km	76,7	74,9	75,8	1,2	2	162,3	46,9	104,6	81,6	78
CO2	g/km	214	214	214,4	0,1	0	213	239	226,2	18,4	8
PN_CPC	#/km	3,21E+11	1,65E+11	2,4E+11	1,1E+11	46	1,83E+11	1,56E+11	1,69E+11	1,90E+10	11
Consumo calc.	l/100km	9,5	9,4	9,4	0,0	0	14,2	16,0	15,1	1,3	8
Rural		1	2	Media	d.s.	CV, %	3	4	Media	d.s.	CV, %
CO	mg/km	65	55	59,6	7,2	12	342	251	296,5	64,6	22
THC	mg/km	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	-
CH4	mg/km	0,00	0,00	0,0	0,0	-	0,00	0,00	0,00	0,00	-
NOx	mg/km	54,0	20,1	37,1	24,0	65	26,5	18,2	22,4	5,8	26
CO2	g/km	162	176	169,1	9,8	6	147	149	148,1	1,7	1
PN_CPC	#/km	0,00E+00	1,15E+12	5,8E+11	8,2E+11	141	7,50E+09	6,70E+09	7,10E+09	5,63E+08	8
Consumo calc.	l/100km	7,1	7,7	7,4	0,4	6	9,8	10,0	9,9	0,1	1
Motorway		1	2	Media	d.s.	CV, %	3	4	Media	d.s.	CV, %
CO	mg/km	1089	388	738,4	495,5	67	1773	681	1227,2	772,1	63
THC	mg/km	5,8	4,3	5,1	1,1	21	1,3	4,0	2,6	1,9	73
CH4	mg/km	0,13	0,10	0,1	0,0	21	0,03	0,09	0,06	0,04	73
NOx	mg/km	8,5	9,0	8,8	0,3	4	13,5	6,7	10,1	4,8	47
CO2	g/km	210	217	213,5	4,7	2	199	189	193,9	6,6	3
PN_CPC	#/km	0,00E+00	1,11E+11	5,6E+10	7,9E+10	141	7,63E+09	5,04E+09	6,34E+09	1,83E+09	29
Consumo calc.	l/100km	9,3	9,6	9,4	0,1	2	13,4	12,7	13,0	0,5	4
Media ciclo		1	2	Media	d.s.	CV, %	3	4	Media	d.s.	CV, %
CO	mg/km	475	206	340,5	190,1	56	855	579	716,9	195,3	27
THC	mg/km	9,4	1,4	5,4	5,6	104	1,6	14,9	8,2	9,4	115
CH4	mg/km	0,21	0,03	0,1	0,1	104	0,03	0,33	0,18	0,21	115
NOx	mg/km	47,0	36,1	41,5	7,7	19	71,3	24,6	47,9	33,0	69
CO2	g/km	197	203	200,2	4,6	2	188	195	191,4	4,7	2
PN_CPC	#/km	1,16E+11	4,50E+11	2,8E+11	2,4E+11	84	7,09E+10	5,92E+10	6,51E+10	8,24E+09	13
Consumo calc.	l/100km	8,7	8,9	8,8	0,2	2	12,6	13,0	12,8	0,3	2

Tabella 36 - Risultati dei test RDE: emissioni gassose, PN e consumi.

# VEICOLO 5

		Benzina						GPL						Δ, %	Significatività statistica (t-test di Student)
UDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
CO	mg/km	273,3	322,7	282,1	292,70	26,37	9	487,6	525,9	592,5	535,36	53,11	10	82,9	SI'
THC	mg/km	82,7	91,0	92,6	88,75	5,32	6	92,5	106,9	107,7	102,34	8,55	8	15,3	NO
CH <sub>4</sub>	mg/km	7,5	6,1	5,8	6,46	0,88	14	9,7	9,4	10,8	10,00	0,74	7	54,8	SI'
NMHC	mg/km	75,6	85,3	87,0	82,64	6,15	7	83,0	97,7	97,1	92,61	8,32	9	12,1	NO
NO <sub>x</sub>	mg/km	88,5	79,4	69,1	79,01	9,70	12	31,2	27,7	21,9	26,92	4,69	17	-65,9	SI'
CO <sub>2</sub>	g/km	236,3	234,1	231,9	234,12	2,19	1	205,9	203,9	203,4	204,38	1,32	1	-12,7	SI'
PM	mg/km	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	3,1E+11	2,9E+11	5,1E+11	3,72E+11	1,23E+11	33	1,5E+11	1,3E+11	9,2E+10	1,22E+11	2,80E+10	23	-67,1	NO
PN (ELPI)	#/km	1,6E+11	1,7E+11	2,8E+11	2,04E+11	6,53E+10	32	9,0E+10	6,6E+10	1,2E+11	9,07E+10	2,54E+10	28	-55,4	NO
PN (EEPS)	#/km	9,0E+12	9,5E+12	1,0E+13	9,53E+12	5,78E+11	6	6,0E+12	4,5E+12	5,1E+12	5,20E+12	7,26E+11	14	-45,5	SI'
PM soot	mg/km	0,02	0,03	0,07	0,04	0,03	61	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	37	-70,2	NO
Consumo calc.	l/100km	10,31	10,22	10,12	10,21	0,09	1	13,50	13,38	13,36	13,41	0,08	1	31,3	SI'
EUDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
CO	mg/km	82,5	61,4	83,9	75,94	12,61	17	114,1	171,3	118,8	134,73	31,75	24	77,4	NO
THC	mg/km	0,4	0,0	0,4	0,28	0,25	87	1,1	0,0	0,0	0,38	0,65	173	32,1	NO
CH <sub>4</sub>	mg/km	0,2	0,1	0,3	0,25	0,10	40	0,8	1,2	0,8	0,95	0,22	23	285,3	SI'
NMHC	mg/km	0,2	0	0,1	0,15	0,07	50	0,3	0	0	0,31	-	-	110,4	-
NO <sub>x</sub>	mg/km	4,8	9,3	3,4	5,82	3,06	53	2,1	3,6	2,4	2,70	0,78	29	-53,6	NO
CO <sub>2</sub>	g/km	127,5	130,4	127,1	128,37	1,79	1	113,3	115,3	111,2	113,24	2,06	2	-11,8	SI'
PM	mg/km	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	1,7E+11	3,7E+10	3,1E+11	1,73E+11	1,37E+11	79	1,1E+11	6,9E+10	1,9E+11	1,22E+11	6,28E+10	52	-29,5	NO
PN (ELPI)	#/km	1,1E+11	3,0E+10	2,0E+11	1,11E+11	8,30E+10	75	7,8E+10	5,7E+10	1,4E+11	8,99E+10	4,06E+10	47	-18,7	NO
PN (EEPS)	#/km	4,3E+12	1,3E+12	7,8E+12	4,46E+12	3,25E+12	73	2,8E+12	1,8E+12	4,6E+12	3,07E+12	1,43E+12	45	-31,1	NO
PM soot	mg/km	0,03	0,01	0,07	0,03	0,03	90	0,02	0,02	0,04	0,03	0,01	40	-18,8	NO
Consumo calc.	l/100km	5,55	5,68	5,54	5,59	0,08	1	7,40	7,54	7,27	7,40	0,14	2	32,5	SI'
NEDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
CO	mg/km	152,5	157,7	157,1	155,76	2,83	2	251,0	301,7	293,1	281,95	27,11	10	81,0	SI'
THC	mg/km	30,6	33,5	34,4	32,86	2,00	6	34,6	39,3	39,6	37,85	2,80	7	15,2	NO
CH <sub>4</sub>	mg/km	2,9	2,3	2,4	2,53	0,32	12	4,1	4,2	4,5	4,28	0,20	5	68,8	SI'
NMHC	mg/km	27,9	31,2	32,2	30,42	2,26	7	30,6	33,6	34,8	33,01	2,16	7	8,5	NO
NO <sub>x</sub>	mg/km	35,5	35,1	27,7	32,76	4,42	13	12,8	12,5	9,6	11,59	1,77	15	-64,6	SI'
CO <sub>2</sub>	g/km	167,5	168,6	165,8	167,30	1,41	1	147,2	147,8	145,1	146,73	1,44	1	-12,3	SI'
PM	mg/km	0,3	0,0	0,1	0,13	0,18	135	0,1	0,3	0,2	0,20	0,13	66	53,1	NO
PN_PMP Compliant	#/km	2,2E+11	1,3E+11	3,9E+11	2,46E+11	1,29E+11	52	1,2E+11	9,1E+10	1,5E+11	1,22E+11	3,20E+10	26	-50,5	NO
PN (ELPI)	#/km	1,3E+11	8,2E+10	2,3E+11	1,45E+11	7,39E+10	51	8,2E+10	6,0E+10	1,3E+11	9,02E+10	3,48E+10	39	-37,7	NO
PN (EEPS)	#/km	6,0E+12	4,3E+12	8,7E+12	6,33E+12	2,18E+12	35	3,9E+12	2,8E+12	4,8E+12	3,85E+12	9,94E+11	26	-39,1	NO
PM soot	mg/km	0,03	0,02	0,07	0,04	0,03	75	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	31	-40,5	NO
Consumo calc.	l/100km	7,30	7,35	7,23	7,29	0,06	1	9,64	9,69	9,51	9,61	0,09	1	31,8	SI'
ERMES		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	4	5	6	Media	d.s.	CV, %		
CO	mg/km	239,1	243,7	260,3	247,71	11,11	4	408,7	311,5	267,1	329,11	72,41	22	32,9	NO
THC	mg/km	6,3	3,1	4,6	4,63	1,60	35	5,6	4,8	6,6	5,65	0,90	16	22,2	NO
CH <sub>4</sub>	mg/km	1,6	1,3	1,2	1,37	0,24	17	2,0	2,4	2,1	2,17	0,17	8	57,7	SI'
NMHC	mg/km	4,7	1,8	3,4	3,33	1,43	43	3,6	2,5	4,5	3,55	1,01	29	6,6	NO
NO <sub>x</sub>	mg/km	23,4	30,1	25,4	26,29	3,47	13	23,5	20,7	28,6	24,30	3,99	16	-7,6	NO
CO <sub>2</sub>	g/km	153,0	152,3	153,9	153,06	0,77	1	129,6	140,1	136,2	135,31	5,29	4	-11,6	SI'
PM	mg/km	0,5	0,2	-	-	-	-	0,3	0,3	0,1	0,22	0,07	34	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	1,6E+11	1,4E+11	8,7E+10	1,29E+11	3,81E+10	30	2,4E+11	1,4E+11	1,7E+11	1,81E+11	5,02E+10	28	40,7	NO
PN (ELPI)	#/km	3,9E+12	2,6E+12	1,3E+11	2,19E+12	1,90E+12	87	1,9E+12	8,9E+11	8,5E+10	9,49E+11	8,94E+11	94	-56,6	NO
PN (EEPS)	#/km	3,0E+14	2,1E+14	2,9E+13	1,79E+14	1,37E+14	76	2,1E+14	1,6E+14	1,4E+14	1,68E+14	3,39E+13	20	-6,5	NO
PM soot	mg/km	0,05	0,03	0,02	0,04	0,01	35	0,06	0,04	0,04	0,05	0,01	22	34,1	NO
Consumo calc.	l/100km	6,67	6,64	6,71	6,67	0,03	1	8,50	9,17	8,92	8,87	0,34	4	32,8	SI'

Tabella 37 - Risultati dei test NEDC + ERMES: emissioni allo scarico regolamentate, PM, PN, CO<sub>2</sub> e consumi.

		Benzina						GPL						Δ, %	Significatività statistica (t-test di Student)
UDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	1	2	3	Media	d.s.	CV, %		
NH <sub>3</sub>	mg/km	4,02	4,03	6,16	4,74	1,23	26	30,19	39,41	59,19	42,93	14,81	35	806,6	SI'
NO <sub>2</sub>	mg/km	6,76	6,09	6,56	6,47	0,34	5	7,05	7,06	6,38	6,83	0,39	6	5,5	NO
1,3-Butadiene	mg/km	14,56	14,22	18,41	15,73	2,33	15	23,55	24,75	29,03	25,78	2,88	11	63,9	SI'
Formaldeide	mg/km	0,34	0,37	0,10	0,27	0,15	54	1,00	1,24	0,97	1,07	0,15	14	295,1	SI'
Benzene	mg/km	5,20	7,84	4,85	5,97	1,63	27	29,57	20,69	18,61	22,96	5,82	25	284,8	SI'
N <sub>2</sub> O	mg/km	4,38	4,32	5,68	4,80	0,77	16	4,83	4,38	3,88	4,37	0,48	11	-9,0	NO
EUDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	1	2	3	Media	d.s.	CV, %		
NH <sub>3</sub>	mg/km	5,80	5,57	7,67	6,35	1,15	18	39,59	56,84	47,33	47,92	8,64	18	655,1	SI'
NO <sub>2</sub>	mg/km	2,72	2,76	2,80	2,76	0,04	2	3,30	3,33	2,99	3,20	0,19	6	16,1	NO
1,3-Butadiene	mg/km	8,27	8,59	11,43	9,43	1,74	18	16,57	19,90	15,93	17,47	2,14	12	85,2	SI'
Formaldeide	mg/km	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-
Benzene	mg/km	1,04	4,05	3,12	2,74	1,54	56	14,76	11,68	8,17	11,53	3,30	29	321,1	SI'
N <sub>2</sub> O	mg/km	2,09	2,14	3,01	2,41	0,51	21	2,20	2,28	1,70	2,06	0,32	15	-14,6	NO
NEDC		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	1	2	3	Media	d.s.	CV, %		
NH <sub>3</sub>	mg/km	5,15	5,00	7,11	5,75	1,18	20	36,15	50,43	51,69	46,09	8,63	19	701,1	SI'
NO <sub>2</sub>	mg/km	4,20	3,99	4,19	4,12	0,12	3	4,67	4,70	4,24	4,54	0,26	6	9,9	NO
1,3-Butadiene	mg/km	10,57	10,67	14,01	11,75	1,96	17	19,13	21,68	20,75	20,52	1,29	6	74,6	SI'
Formaldeide	mg/km	0,12	0,14	0,04	0,10	0,05	54	0,37	0,46	0,36	0,39	0,06	14	294,6	SI'
Benzene	mg/km	2,57	5,45	3,76	3,93	1,45	37	20,19	14,99	12,01	15,73	4,14	26	300,7	SI'
N <sub>2</sub> O	mg/km	2,93	2,94	3,99	3,29	0,61	19	3,16	3,06	2,50	2,91	0,36	12	-11,6	NO
ERMES		1	2	3	Media	d.s.	CV, %	1	2	3	Media	d.s.	CV, %		
NH <sub>3</sub>	mg/km	10,02	5,08	5,98	7,03	2,64	38	9,64	11,52	15,51	12,22	3,00	25	74,0	NO
NO <sub>2</sub>	mg/km	2,93	2,16	2,27	2,45	0,42	17	2,39	2,55	2,34	2,43				

		Benzina	GPL	
		1	2	Δ, %
<b>Low</b>				
CO	mg/km	801,8	651,9	-18,70
THC	mg/km	187,2	206,3	10,24
CH <sub>4</sub>	mg/km	11,5	10,7	-6,92
NMHC	mg/km	176,3	195,9	11,13
NOx	mg/km	130,3	62,8	-51,81
CO <sub>2</sub>	g/km	221,11	215,03	-2,75
PM	mg/km	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	1,72E+12	1,61E+12	-6,39
PN (ELPI)	#/km	9,20E+11	6,72E+11	-26,91
PN (EEPS)	#/km	4,23E+13	3,56E+13	-15,84
PM soot	mg/km	0,46	0,27	-40,99
Consumo calc.	l/100km	9,70	14,14	45,84
<b>Middle</b>				
CO	mg/km	93,93	399,62	325,44
THC	mg/km	0,33	1,68	412,93
CH <sub>4</sub>	mg/km	1,14	1,67	47,14
NMHC	mg/km	0,00	0,05	-
NOx	mg/km	31,41	26,39	-16,00
CO <sub>2</sub>	g/km	147,02	133,20	-9,40
PM	mg/km	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	1,36E+12	1,81E+11	-86,65
PN (ELPI)	#/km	8,73E+11	1,21E+11	-86,13
PN (EEPS)	#/km	3,19E+13	4,87E+12	-84,75
PM soot	mg/km	0,46	0,04	-90,31
Consumo calc.	l/100km	6,40	8,73	36,46
<b>High</b>				
CO	mg/km	38,91	134,35	245,26
THC	mg/km	0,00	1,41	-
CH <sub>4</sub>	mg/km	0,26	0,39	51,16
NMHC	mg/km	0,00	1,03	-
NOx	mg/km	16,15	16,40	1,53
CO <sub>2</sub>	g/km	132,58	114,24	-13,83
PM	mg/km	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	4,68E+10	7,31E+10	56,10
PN (ELPI)	#/km	2,63E+10	4,80E+10	82,48
PN (EEPS)	#/km	1,47E+12	1,89E+12	28,72
PM soot	mg/km	0,01	0,02	42,29
Consumo calc.	l/100km	5,77	7,47	29,49
<b>Extra-High</b>				
CO	mg/km	449,56	310,23	-30,99
THC	mg/km	17,03	12,80	-24,83
CH <sub>4</sub>	mg/km	3,58	3,26	-9,00
NMHC	mg/km	13,64	9,63	-29,40
NOx	mg/km	13,98	18,56	32,79
CO <sub>2</sub>	g/km	155,16	140,36	-9,54
PM	mg/km	-	-	-
PN_PMP Compliant	#/km	1,68E+11	5,46E+10	-67,47
PN (ELPI)	#/km	1,59E+11	2,20E+11	38,30
PN (EEPS)	#/km	2,19E+13	2,86E+13	30,93
PM soot	mg/km	0,04	3,52E-02	-5,73
Consumo calc.	l/100km	6,78	9,19	35,59
<b>WLTC</b>				
CO	mg/km	297,11	319,83	7,65
THC	mg/km	30,98	32,71	6,86
CH <sub>4</sub>	mg/km	3,11	3,04	-2,26
NMHC	mg/km	28,26	29,75	7,54
NOx	mg/km	33,67	25,37	-24,66
CO <sub>2</sub>	g/km	155,30	140,77	-9,36
PM	mg/km	0,10561	0,05343	-49,41
PN_PMP Compliant	#/km	5,81E+11	2,93E+11	-49,52
PN (ELPI)	#/km	3,66E+11	2,07E+11	-43,39
PN (EEPS)	#/km	2,04E+13	1,65E+13	-19,17
PM soot	mg/km	0,17	0,06	-63,49
Consumo calc.	l/100km	6,78	9,23	36,10

Tabella 39 - Risultati dei test WLTC: emissioni allo scarico regolamentate, PM, PN, CO<sub>2</sub> e consumi.

		Benzina	GPL	
		1	2	Δ, %
<b>Low</b>				
NH <sub>3</sub>	mg/km	4,9	22,8	369,04
NO <sub>2</sub>	mg/km	7,1	7,8	9,42
1,3-Butadiene	mg/km	18,0	27,2	51,04
Formaldeide	mg/km	1,6	1,2	-26,90
Benzene	mg/km	8,5	23,6	179,69
N <sub>2</sub> O	mg/km	4,9	6,5	32,40
<b>Middle</b>				
NH <sub>3</sub>	mg/km	6,6	52,4	692,87
NO <sub>2</sub>	mg/km	3,7	4,0	10,05
1,3-Butadiene	mg/km	9,6	22,5	134,85
Formaldeide	mg/km	0,0	0,0	-
Benzene	mg/km	2,1	14,3	577,45
N <sub>2</sub> O	mg/km	2,3	3,2	42,46
<b>High</b>				
NH <sub>3</sub>	mg/km	3,2	20,4	532,61
NO <sub>2</sub>	mg/km	3,1	3,3	5,87
1,3-Butadiene	mg/km	7,9	13,1	65,47
Formaldeide	mg/km	0,0	0,0	-
Benzene	mg/km	1,8	8,4	374,95
N <sub>2</sub> O	mg/km	1,9	2,8	43,75
<b>Extra-High</b>				
NH <sub>3</sub>	mg/km	38,5	35,0	-8,90
NO <sub>2</sub>	mg/km	3,8	4,3	13,81
1,3-Butadiene	mg/km	20,3	20,8	2,22
Formaldeide	mg/km	0,0	0,0	-62,07
Benzene	mg/km	2,8	11,7	313,76
N <sub>2</sub> O	mg/km	2,6	3,9	47,18
<b>WLTC</b>				
NH <sub>3</sub>	mg/km	16,6	32,5	95,35
NO <sub>2</sub>	mg/km	4,0	4,4	10,17
1,3-Butadiene	mg/km	14,0	19,6	40,24
Formaldeide	mg/km	0,22	0,16	-27,91
Benzene	mg/km	3,1	12,8	312,75
N <sub>2</sub> O	mg/km	2,6	3,8	41,92

Tabella 40 - Risultati dei test WLTC: emissioni allo scarico non regolamentate.

		Benzina					GPL				
City		1	2	Media	d.s.	CV, %	3	4	Media	d.s.	CV, %
CO	mg/km	119	59	89,0	42,7	48	57	104	80,3	33,1	41
THC	mg/km	0,0	0,6	0,3	0,4	141	2,5	2,7	2,6	0,1	5
CH4	mg/km	0,00	0,01	0,0	0,0	141	0,05	0,06	0,06	0,00	5
NOx	mg/km	31,2	31,1	31,1	0,1	0	35,3	34,8	35,1	0,3	1
CO2	g/km	232	213	222,2	13,2	6	179	190	184,5	7,5	4
PN_CPC	#/km	3,81E+11	2,86E+11	3,3E+11	6,7E+10	20	3,26E+11	1,22E+11	2,24E+11	1,44E+11	64
Consumo calc.	l/100km	10,2	9,3	9,8	0,6	6	11,9	12,6	12,2	0,5	4
Rural		1	2	Media	d.s.	CV, %	3	4	Media	d.s.	CV, %
CO	mg/km	114	72	92,9	29,1	31	14	64	38,9	34,9	90
THC	mg/km	0,0	0,4	0,2	0,3	141	0,0	0,0	0,0	0,0	-
CH4	mg/km	0,00	0,01	0,0	0,0	141	0,00	0,00	0,00	0,00	-
NOx	mg/km	3,6	0,0	1,8	2,6	141	1,5	2,4	1,9	0,7	35
CO2	g/km	129	130	129,2	0,7	1	114	114	114,1	0,2	0
PN_CPC	#/km	5,26E+10	2,94E+10	4,1E+10	1,6E+10	40	2,51E+10	9,87E+09	1,75E+10	1,08E+10	62
Consumo calc.	l/100km	5,7	5,7	5,7	0,0	0	7,6	7,6	7,6	0,0	0
Motorway		1	2	Media	d.s.	CV, %	3	4	Media	d.s.	CV, %
CO	mg/km	302	259	280,3	30,4	11	47	221	133,9	123,2	92
THC	mg/km	9,6	13,4	11,5	2,7	24	5,4	9,4	7,4	2,8	38
CH4	mg/km	0,21	0,30	0,3	0,1	24	0,12	0,21	0,16	0,06	38
NOx	mg/km	5,1	7,6	6,3	1,8	28	0,0	5,6	2,8	4,0	141
CO2	g/km	145	148	146,7	2,5	2	133	131	132,3	1,4	1
PN_CPC	#/km	4,22E+11	1,29E+11	2,8E+11	2,1E+11	75	1,20E+11	1,06E+11	1,13E+11	1,04E+10	9
Consumo calc.	l/100km	6,4	6,5	6,5	0,1	1	8,8	8,7	8,8	0,1	1
Media ciclo		1	2	Media	d.s.	CV, %	3	4	Media	d.s.	CV, %
CO	mg/km	180	130	154,7	35,6	23	40	130	84,9	63,3	75
THC	mg/km	3,1	4,8	4,0	1,2	30	2,3	4,0	3,2	1,2	38
CH4	mg/km	0,07	0,11	0,1	0,0	30	0,05	0,09	0,07	0,03	38
NOx	mg/km	13,8	13,6	13,7	0,2	1	13,1	15,1	14,1	1,4	10
CO2	g/km	170	166	168,2	3,2	2	144	147	145,3	2,2	2
PN_CPC	#/km	2,94E+11	1,55E+11	2,2E+11	9,8E+10	44	1,64E+11	8,16E+10	1,23E+11	5,86E+10	48
Consumo calc.	l/100km	7,5	7,3	7,4	0,2	2	9,5	9,8	9,6	0,2	2

Tabella 41 - Risultati dei test RDE: emissioni gassose, PN e consumi.

## APPENDICE B

Tramite le equazioni seguenti sono stati calcolati i fattori di emissione specifici per i diversi ambiti stradali di monossido di carbonio (CO), ossidi di azoto (NOx), idrocarburi incombusti totali (THC), metano (CH<sub>4</sub>), ammoniaca (NH<sub>3</sub>), protossido di azoto (N<sub>2</sub>O):

$$FE_{i,GPL,SMALL,URBANO} = \frac{1}{6} \times (FE_{i,GPL,UDC,1} + FE_{i,GPL,LOW,1} + FE_{i,GPL,URBAN,1} + FE_{i,GPL,UDC,3} + FE_{i,GPL,LOW,3} + FE_{i,GPL,URBAN,3})$$

$$FE_{i,GPL,MEDIUM,URBANO} = \frac{1}{9} \times (FE_{i,GPL,UDC,2} + FE_{i,GPL,LOW,2} + FE_{i,GPL,URBAN,2} + FE_{i,GPL,UDC,4} + FE_{i,GPL,LOW,4} + FE_{i,GPL,URBAN,4} + FE_{i,GPL,UDC,5} + FE_{i,GPL,LOW,5} + FE_{i,GPL,URBAN,5})$$

dove,

$FE_{i,GPL,SMALL,URBANO}$  = fattore di emissione [mg/km] del composto i per le autovetture GPL Euro 6 di piccola cilindrata per l'ambito urbano;

$FE_{i,GPL,MEDIUM,URBANO}$  = fattore di emissione [mg/km] del composto i per le autovetture GPL Euro 6 di media cilindrata per l'ambito urbano;

$FE_{i,GPL,UDC,n}$  = fattore di emissione medio [mg/km] del composto i rilevato sulle fasi UDC dei cicli NEDC eseguiti con il veicolo n alimentato a GPL;

$FE_{i,GPL,LOW,n}$  = fattore di emissione [mg/km] del composto i rilevato sulla fase LOW del ciclo WLTC eseguito con il veicolo n alimentato a GPL;

$FE_{i,GPL,URBAN,n}$  = fattore di emissione medio [mg/km] del composto i rilevato sulle fasi Urbane delle 2 prove RDE eseguite con il veicolo n alimentato a GPL.

$$FE_{i,GPL,SMALL,EXTRA-URBANO} = \frac{1}{8} \times (FE_{i,GPL,EUDC,1} + FE_{i,GPL,MIDDLE,1} + FE_{i,GPL,HIGH,1} + FE_{i,GPL,RURAL,1} + FE_{i,GPL,EUDC,3} + FE_{i,GPL,MIDDLE,3} + FE_{i,GPL,HIGH,3} + FE_{i,GPL,RURAL,3})$$

$$FE_{i,GPL,MEDIUM,EXTRA-URBANO} = \frac{1}{12} \times (FE_{i,GPL,EUDC,2} + FE_{i,GPL,MIDDLE,2} + FE_{i,GPL,HIGH,2} + FE_{i,GPL,RURAL,2} + FE_{i,GPL,EUDC,4} + FE_{i,GPL,MIDDLE,4} + FE_{i,GPL,HIGH,4} + FE_{i,GPL,RURAL,4} + FE_{i,GPL,EUDC,5} + FE_{i,GPL,MIDDLE,5} + FE_{i,GPL,HIGH,5} + FE_{i,GPL,RURAL,5})$$

dove,

$FE_{i,GPL,SMALL,EXTRA-URBANO}$  = fattore di emissione [mg/km] del composto i per le autovetture GPL Euro 6 di piccola cilindrata per l'ambito extra-urbano;

$FE_{i,GPL,MEDIUM,EXTRA-URBANO}$  = fattore di emissione [mg/km] del composto i per le autovetture GPL Euro 6 di media cilindrata per l'ambito extra-urbano;

$FE_{i,GPL,EUDC,n}$  = fattore di emissione medio [mg/km] del composto i rilevato sulle fasi EUDC dei cicli NEDC eseguiti con il veicolo n alimentato a GPL;

$FE_{i,GPL,MIDDLE,n}$  = fattore di emissione [mg/km] del composto i rilevato sulla fase MIDDLE del ciclo WLTC eseguito con il veicolo n alimentato a GPL;

$FE_{i,GPL,HIGH,n}$  = fattore di emissione [mg/km] del composto i rilevato sulla fase HIGH del ciclo WLTC eseguito con il veicolo n alimentato a GPL;

$FE_{i,GPL,RURAL,n}$  = fattore di emissione medio [mg/km] del composto i rilevato sulle fasi Rurali delle 2 prove RDE eseguite con il veicolo n alimentato a GPL.

$$FE_{i,GPL,SMALL,AUTOSTRADALE} = \frac{1}{4} \times (FE_{i,GPL,EXTRA-HIGH,1} + FE_{i,GPL,MOTORWAY,1} + FE_{i,GPL,EXTRA-HIGH,3} + FE_{i,GPL,MOTORWAY,3})$$

$$FE_{i,GPL,MEDIUM,AUTOSTRADALE} = \frac{1}{6} \times (FE_{i,GPL,EXTRA-HIGH,2} + FE_{i,GPL,MOTORWAY,2} + FE_{i,GPL,EXTRA-HIGH,4} + FE_{i,GPL,MOTORWAY,4} + FE_{i,GPL,EXTRA-HIGH,5} + FE_{i,GPL,MOTORWAY,5})$$

dove,

$FE_{i,GPL,SMALL,AUTOSTRADALE}$  = fattore di emissione [mg/km] del composto i per le autovetture GPL Euro 6 di piccola cilindrata per l'ambito autostradale;

$FE_{i,GPL,MEDIUM,AUTOSTRADALE}$  = fattore di emissione [mg/km] del composto i per le autovetture GPL Euro 6 di media cilindrata per l'ambito autostradale;

$FE_{i,GPL,EXTRA-HIGH,n}$  = fattore di emissione [mg/km] del composto i rilevato sulla fase EXTRA-HIGH del ciclo WLTC eseguito con il veicolo n alimentato a GPL;

$FE_{i,GPL,MOTORWAY,n}$  = fattore di emissione medio [mg/km] del composto i rilevato sulle fasi Autostradali delle 2 prove RDE eseguite con il veicolo n alimentato a GPL.

Per quanto riguarda i fattori di emissione di particolato allo scarico (*PM exhaust*), sono di seguito proposte le equazioni utilizzate per disaggregare, essendo disponibili solamente dati medi a livello di ciclo di guida complessivo, i valori misurati delle emissioni di PM nei singoli contributi attribuibili ad ogni fase del ciclo considerato.

Per ogni veicolo sono state quindi applicate le seguenti equazioni:

$$FE_{PM,GPL,UDC,n} = FE_{PM,GPL,NEDC,n} \times (PN_{GPL,UDC,n} \div PN_{GPL,NEDC,n})$$

$$FE_{PM,GPL,EUDC,n} = FE_{PM,GPL,NEDC,n} \times (PN_{GPL,EUDC,n} \div PN_{GPL,NEDC,n})$$

$$FE_{PM,GPL,LOW,n} = FE_{PM,GPL,WLTC,n} \times (PN_{GPL,LOW,n} \div PN_{GPL,WLTC,n})$$

$$FE_{PM,GPL,MIDDLE,n} = FE_{PM,GPL,WLTC,n} \times (PN_{GPL,MIDDLE,n} \div PN_{GPL,WLTC,n})$$

$$FE_{PM,GPL,HIGH,n} = FE_{PM,GPL,WLTC,n} \times (PN_{GPL,HIGH,n} \div PN_{GPL,WLTC,n})$$

$$FE_{PM,GPL,EXTRA-HIGH,n} = FE_{PM,GPL,WLTC,n} \times (PN_{GPL,EXTRA-HIGH,n} \div PN_{GPL,WLTC,n})$$

dove,

$FE_{PM,GPL,t,n}$  = fattore di emissione medio di PM [mg/km] calcolato per la fase considerata (t = UDC, EUDC, LOW, MIDDLE, HIGH, EXTRA-HIGH) per il veicolo n alimentato a GPL;

$FE_{PM,GPL,NEDC,n}$  = fattore di emissione medio di PM [mg/km] rilevato sui 3 cicli NEDC eseguiti con il veicolo n alimentato a GPL;

$FE_{PM,GPL,WLTC,n}$  = fattore di emissione di PM [mg/km] rilevato sul ciclo WLTC eseguito con il veicolo n alimentato a GPL;

$PN_{GPL,t,n}$  = emissione di PN [# /km] rilevata per la fase considerata (t = UDC, EUDC, LOW, MIDDLE, HIGH, EXTRA-HIGH) per il veicolo n alimentato a GPL (per le fasi UDC ed EUDC è stata utilizzata l'emissione media calcolata sui 3 cicli NEDC effettuati).

$PN_{GPL,NEDC,n}$  = emissione media di PN [# /km] rilevata sui 3 cicli NEDC eseguiti con il veicolo n alimentato a GPL;

$PN_{GPL,WLTC,n}$  = emissione di PN [# /km] rilevata sul ciclo WLTC eseguito con il veicolo n alimentato a GPL.

Per il calcolo dei fattori di emissione specifici per i diversi ambiti stradali di particolato allo scarico (PM *exhaust*) sono state utilizzate le seguenti equazioni:

$$FE_{PM,GPL,SMALL,URBANO} = \frac{1}{4} \times (FE_{PM,GPL,UDC,1} + FE_{PM,GPL,LOW,1} + FE_{PM,GPL,UDC,3} + FE_{PM,GPL,LOW,3})$$

$$FE_{PM,GPL,MEDIUM,URBANO} = \frac{1}{6} \times (FE_{PM,GPL,UDC,2} + FE_{PM,GPL,LOW,2} + FE_{PM,GPL,UDC,4} + FE_{PM,GPL,LOW,4} + FE_{PM,GPL,UDC,5} + FE_{PM,GPL,LOW,5})$$

dove,

$FE_{PM,GPL,SMALL,URBANO}$  = fattore di emissione [mg/km] di PM per le autovetture GPL Euro 6 di piccola cilindrata per l'ambito urbano;

$FE_{PM,GPL,MEDIUM,URBANO}$  = fattore di emissione [mg/km] di PM per le autovetture GPL Euro 6 di media cilindrata per l'ambito urbano.

$$FE_{PM,GPL,SMALL,EXTRA-URBANO} = \frac{1}{6} \times (FE_{PM,GPL,EUDC,1} + FE_{PM,GPL,MIDDLE,1} + FE_{PM,GPL,HIGH,1} + FE_{PM,GPL,EUDC,3} + FE_{PM,GPL,MIDDLE,3} + FE_{PM,GPL,HIGH,3})$$

$$FE_{PM,GPL,MEDIUM,EXTRA-URBANO} = \frac{1}{9} \times (FE_{PM,GPL,EUDC,2} + FE_{PM,GPL,MIDDLE,2} + FE_{PM,GPL,HIGH,2} + FE_{PM,GPL,EUDC,4} + FE_{PM,GPL,MIDDLE,4} + FE_{PM,GPL,HIGH,4} + FE_{PM,GPL,EUDC,5} + FE_{PM,GPL,MIDDLE,5} + FE_{PM,GPL,HIGH,5})$$

dove,

$FE_{PM,GPL,SMALL,EXTRA-URBANO}$  = fattore di emissione [mg/km] di PM per le autovetture GPL Euro 6 di piccola cilindrata per l'ambito extra-urbano;

$FE_{PM,GPL,MEDIUM,EXTRA-URBANO}$  = fattore di emissione [mg/km] di PM per le autovetture GPL Euro 6 di media cilindrata per l'ambito extra-urbano.

$$FE_{PM,GPL,SMALL,AUTOSTRADALE} = \frac{1}{2} \times (FE_{PM,GPL,EXTRA-HIGH,1} + FE_{PM,GPL,EXTRA-HIGH,3})$$

$$FE_{PM,GPL,MEDIUM,AUTOSTRADALE} = \frac{1}{3} \times (FE_{PM,GPL,EXTRA-HIGH,2} + FE_{PM,GPL,EXTRA-HIGH,4} + FE_{PM,GPL,EXTRA-HIGH,5})$$

dove,

$FE_{PM,GPL,SMALL,AUTOSTRADALE}$  = fattore di emissione [mg/km] di PM per le autovetture GPL Euro 6 di piccola cilindrata per l'ambito autostradale;

$FE_{PM,GPL,MEDIUM,AUTOSTRADALE}$  = fattore di emissione [mg/km] di PM per le autovetture GPL Euro 6 di media cilindrata per l'ambito autostradale.

Tramite le seguenti equazioni sono invece stati calcolati i fattori di emissione medi totali per il CO, NO<sub>x</sub>, THC, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub> e N<sub>2</sub>O:

$$FE_{i,GPL,SMALL} = \frac{1}{8} \times (FE_{i,GPL,NEDC,1} + FE_{i,GPL,ERMES,1} + FE_{i,GPL,WLTC,1} + FE_{i,GPL,RDE,1} + FE_{i,GPL,NEDC,3} + FE_{i,GPL,ERMES,3} + FE_{i,GPL,WLTC,3} + FE_{i,GPL,RDE,3})$$

$$FE_{i,GPL,MEDIUM} = \frac{1}{12} \times (FE_{i,GPL,NEDC,2} + FE_{i,GPL,ERMES,2} + FE_{i,GPL,WLTC,2} + FE_{i,GPL,RDE,2} + FE_{i,GPL,NEDC,4} + FE_{i,GPL,ERMES,4} + FE_{i,GPL,WLTC,4} + FE_{i,GPL,RDE,4} + FE_{i,GPL,NEDC,5} + FE_{i,GPL,ERMES,5} + FE_{i,GPL,WLTC,5} + FE_{i,GPL,RDE,5})$$

dove,

$FE_{i,GPL,SMALL}$  = fattore di emissione medio generale [mg/km] del composto i per le autovetture GPL Euro 6 di piccola cilindrata;

$FE_{i,GPL,MEDIUM}$  = fattore di emissione medio generale [mg/km] del composto i per le autovetture GPL Euro 6 di media cilindrata;

$FE_{i,GPL,NEDC,n}$  = fattore di emissione medio del composto i [mg/km] rilevato sui 3 cicli NEDC eseguiti con il veicolo n alimentato a GPL;

$FE_{i,GPL,ERMES,n}$  = fattore di emissione medio del composto i [mg/km] rilevato sui 3 cicli ERMES eseguiti con il veicolo n alimentato a GPL;

$FE_{i,GPL,WLTC,n}$  = fattore di emissione del composto i [mg/km] rilevato sul ciclo WLTC eseguito con il veicolo n alimentato a GPL;

$FE_{i,GPL,RDE,n}$  = fattore di emissione medio del composto i [mg/km] rilevato sulle 2 prove RDE eseguite con il veicolo n alimentato a GPL.

Simili equazioni sono state utilizzate per il calcolo dei fattori di emissione medi totali per il PM exhaust, considerando però che la misura della massa di particolato non è stata effettuata durante le prove RDE:

$$FE_{PM,GPL,SMALL} = \frac{1}{6} \times (FE_{PM,GPL,NEDC,1} + FE_{PM,GPL,ERMES,1} + FE_{PM,GPL,WLTC,1} + FE_{PM,GPL,NEDC,3} + FE_{PM,GPL,ERMES,3} + FE_{PM,GPL,WLTC,3})$$

$$FE_{PM,GPL,MEDIUM} = \frac{1}{9} \times (FE_{PM,GPL,NEDC,2} + FE_{PM,GPL,ERMES,2} + FE_{PM,GPL,WLTC,2} + FE_{PM,GPL,NEDC,4} + FE_{PM,GPL,ERMES,4} + FE_{PM,GPL,WLTC,4} + FE_{PM,GPL,NEDC,5} + FE_{PM,GPL,ERMES,5} + FE_{PM,GPL,WLTC,5})$$

dove,

$FE_{PM,GPL,SMALL}$  = fattore di emissione medio generale di PM [mg/km] per le autovetture GPL Euro 6 di piccola cilindrata;

$FE_{PM,GPL,MEDIUM}$  = fattore di emissione medio generale di PM [mg/km] per le autovetture GPL Euro 6 di media cilindrata;

$FE_{PM,GPL,NEDC,n}$  = fattore di emissione medio di PM [mg/km] rilevato sui 3 cicli NEDC eseguiti con il veicolo n alimentato a GPL;

$FE_{PM,GPL,ERMES,n}$  = fattore di emissione medio di PM [mg/km] rilevato sui 3 cicli ERMES eseguiti con il veicolo n alimentato a GPL;

$FE_{PM,GPL,WLTC,n}$  = fattore di emissione di PM [mg/km] rilevato sul ciclo WLTC eseguito con il veicolo n alimentato a GPL.

## APPENDICE C

---

Nella Tabella 42 sono proposti i fattori di consumo di GPL calcolati a partire dai risultati dei test effettuati da Innovhub SSI.

<b>FC [l/100km]</b>	<b>Small</b>	Urbano	10,66
		Extra-urbano	6,48
		Autostradale	8,94
		Totale	7,80
	<b>Medium</b>	Urbano	13,22
		Extra-urbano	8,06
		Autostradale	10,50
		Totale	9,69

*Tabella 42 – Fattori di consumo medi di GPL totali e riferiti ai diversi ambiti stradali per le autovetture GPL Euro 6 del segmento small (< 1400 cc) e medium (1400 < cc < 2000) determinati a partire dai test di Innovhub.*

## APPENDICE D

---

Nelle Figure 80-83 sono apprezzabili le informazioni richieste dal file excel *'input data sheet'*, compilato individualmente per ognuno dei 5 veicoli testati nell'ambito della condivisione dei dati con il gruppo ERMES.

Vehicle attributes	Vehicle-No. (internal nr or name used by Lab to identify veh)	[text]
	Laboratory name	[predefined]
	Manufacturer	[text]
	Trade Name / Model	[text]
	Additional model specification (optional)	[text]
	Vehicle Category	[predefined]
	Size Class	[predefined]
	Technology	[predefined]
	EU Emission standard / Euro-Class / Emission Approval	[predefined]
	EC_TypeApproval (optional)	[text]
	Engine Capacity	[ccm]
	Power	[kW]
	Rated Engine Speed	[rpm]
	Idling Speed	[rpm]
	Max Torque	[Nm]
	Max Torque Speed	[rpm]
	Max Vehicle Speed	[km/h]
	Empty mass	[kg]
	Test weight	[kg]
	Comment Test weight	[text]
	Mileage	[km]
	Vehicle provenance	[predefined]
	State (new/used)	[text]
	Gearbox type	[predefined]
	Number of speeds	[nr]
	Injection System	[predefined]
	Exhaust Gas Aftertreatment	DPF ["yes" if applicable, else: empty]
DPF type		[text]
Three-Way Catalyst		["yes" or empty]
Oxidation Catalyst		["yes" or empty]
SCR (Selective catalytic reduction)		["yes" or empty]
NOx-trap / NSK (NOx-Speicher-katalysator)		["yes" or empty]
EGR (Exhaust Gas Recirculation)		["yes" or empty]
Other Exhaust Gas Aftertreatment Systems	[text]	
Vehicle attributes	OEM (for alternative fuel veh. only (CNG, LPG etc)	[text]
	Tyre - dimension	[text]
	Axle drive ratio	[nr]
	Transmission ratio gear 1	[nr]
	Transmission ratio gear 2	[nr]
	Transmission ratio gear 3	[nr]
	Transmission ratio gear 4	[nr]
	Transmission ratio gear 5	[nr]
	Transmission ratio gear 6	[nr]
	VIN (Vehicle identification number)	[text]
	Certificaton nr	[text]
	Registration (Year)	[nr]
	Registration (Month)	[nr]
	Registration (Day)	[nr]
	Test (Year)	[nr]
	Test (Month)	[nr]
	Test (Day)	[nr]
	Name of measurement campaign	[text]
	power ICE	[kW]
	power EM	[kW]
	battery type	[text]
	battery capacity	[kWh]
	nom. volt.	[V]
no. of cells	[nr]	
level of hybr.	[text]	
hybrid type	[text]	
Type Approval Info	Type Approval (NEDC) CO2	[g/km]
	Type Approval (NEDC) CO	[g/km]
	Type Approval (NEDC) HC	[g/km]
	Type Approval (NEDC) NOx	[g/km]
	Type Approval (NEDC) HC+NOx	[g/km]
	Type Approval (NEDC) PM	[g/km]
	Type Approval (NEDC) Fuel Consumption	[l/100km]
	Any comment concerning the vehicle	[text]

Figura 80 - Foglio 'VehicleData' (Fonte: Keller, 2017).

Vehicle Attributes	Vehicle-No. (internal nr or name used by Lab) -> refer to Col A in Sheet 'VehicleData'	[---]
	Lab_name	[---]
	Manufacturer	[---]
	Trade Name	[---]
	Vehicle Category	[predefined]
	Size Class	[predefined]
	fuel type of vehicle	[predefined]
	EuroClass (Emission Approval)	[predefined]
Test attributes	chronological Test Nr (unique nr. per test and veh)	[nr]
	RepeatTestNr (relevant onl if tests are repeated)	[nr]
	Any comment concerning the test	[text]
	Driving cycle or PEMS route	[predefined]
	Start condition	[predefined]
	Fuel type of test	[predefined]
	Payload (optional, for LCV)	[%]
	Fuel Density	[Kg/L]
	Fuel Energy density	[MJ/kg]
	Ambient temperature (if not standard)	[Degree Celsius]
	Range of Ambient temperature	[text]
	Ambient temperature Min	[Degree Celsius]
	Ambient temperature Max	[Degree Celsius]
	Inertia weight (car weight + driver + load)	[Kg]
	Road driving resistance (road coast down) - f0	[kg m s-2]
	Road driving resistance (road coast down) - f1	[kg s-1]
	Road driving resistance (road coast down) - f2	[kg m-1]
Source for weight and road load	[text]	
Gear change strategy	[text]	
	Distance	[km]
Emission data	CO	g/km
	HC	g/km
	NOx	g/km
	NO2	g/km
	HC+NOx	g/km
	CO2 without SOC correction	g/km
	FC L/100km	L/100km
	FC g/km	g/km
	FC MJ/km	MJ/km
	FC m3/100km	
	PM	g/km
	PM(PMP)	g/km
	PN	#/km
	CH4	g/km
	Formaldehyde	g/km
	Acetaldehyde	g/km
	Alcohols	g/km
NH3	g/km	
N2O	g/km	
CO2 with SOC correction	g/km	
PEMS evaluation result with EMROAD	Trip valid (yes/no)	[yes/no]
	CO	g/km
	HC	g/km
	NOx	g/km
	CO2	g/km
	PN	g/km
PEMS evaluation result with CLEAR	Trip valid (yes/no)	[yes/no]
	CO	g/km
	HC	g/km
	NOx	g/km
	CO2	g/km
	PN	g/km
PEMS Parameters (optional)	95Percentile (v*a_pos) total trip	m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>
	95Percentile (v*a_pos) urban part	m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>
	cumulated positive altitude gain total trip	m/100km
	cumulated positive altitude gain urban part	m/100km
	Mileage share Urban	%
	Mileage share rural	%
	Mileage share motorway	%
	RPA total trip	m/s <sup>2</sup>
RPA urban part	m/s <sup>2</sup>	
	EMROAD % of normal windows	%

Figura 81 - Foglio 'EmissionData' (Fonte: Keller, 2017).

Modal values:		
Time	time	[s]
roller test bed	Measured vehicle speed	[km/h]
	road gradient	[%]
	simulated tractive force	[N]
	measured tractive force	[N]
modal values	measured fuel consumption	[g/s]
	CO2	[g/s]
	NOx	[g/s]
	NO	[g/s]
	CO	[g/s]
	HC	[g/s]
	Particle number	[#/s]
Current Clamp	Current from/to battery	[A] (+when to battery)
	Voltage at Battery	[V]
ECU data, if available	vehicle speed	[km/h]
	fuel consumption	[g/s]
	(effective) engine torque	[Nm]
	engine speed (either from ECU or from external sensor)	[rpm]
	Gear	[#]
external sensors / measurement devices if available	engine speed from external sensor	[rpm]
	cardan torque - signal from telemetry analogue output	[V]
	cardan torque	[Nm]
	engine cooling fan speed	[rpm]
	ambient air temperature	[°C]
	air pressure	[bar] abs
	alternator loading current	[A]
	fuel consumption from mobile fuel cons meas.	[g/s]
PEMS system	Corrected Exhaust Mass Flow Rate	[kg/s]
	instantaneous mass CO <sub>2</sub>	[g/s]
	Corrected Instantaneous Mass NO	[g/s]
	Corrected Instantaneous Mass NO2	[g/s]
	Corrected Instantaneous Mass NOx	[g/s]
	Corrected Instantaneous Mass CO	[g/s]
	Corrected Instantaneous Mass HC	[g/s]
	Instantaneous Mass AVL MSS	[g/s]
temperature sensors if available	temperature engine coolant	[°C]
	temperature engine oil	[°C]
	temperature transmission oil	[°C]
	temperature exhaust gas after turbocharger / before aftertreatment	[°C]
	temperature exhaust after aftertreatment	[°C]
other measured quantities	Bag number (1,2 or 3)	[#]
	SubCycle	[#]
	Reference vehicle speed	[km/h]
	please specify	[please specify]

Figura 82 - Foglio 'ChassisDyno\_Inst' (Fonte: Keller, 2017).

Modal values:		
Time	time	[s]
GPS 1 or PEMS system	Vehicle (ground) speed	[km/h]
	Altitude measured	[m] asl
	Altitude filtered according to RDE regulation	[m] asl
	Number of satellites in use	[#]
	Latitude	e.g. [deg]
	Longitude	e.g. [deg]
GPS 2, if available	Vehicle (ground) speed	[km/h]
	Altitude	[m] asl
	Number of satellites in use	[#]
	Latitude	e.g. [deg]
	Longitude	e.g. [deg]
Current Clamp	Current from/to battery	[A] (+when to battery)
	Voltage at Battery	[V]
ECU data, if available	vehicle speed	[km/h]
	fuel consumption	[g/s]
	(effective) engine torque	[Nm]
	engine speed	[rpm]
	gear	[#]
external sensors / measurement devices if available	Engine speed from external sensor	[rpm]
	cardan torque - signal from telemetry analogue output	[V]
	cardan torque	[Nm]
	engine cooling fan speed	[rpm]
	ambient temperature	[°C]
	air pressure	[bar] abs
	alternator loading current	[A]
	fuel consumption from mobile fuel cons meas.	[g/s]
PEMS system	Exhaust Mass Flow Rate	[kg/s]
	instantaneous mass CO <sub>2</sub>	[g/s]
	Instantaneous Mass NO	[g/s]
	Instantaneous Mass NO <sub>2</sub>	[g/s]
	Instantaneous Mass NO <sub>x</sub>	[g/s]
	Instantaneous Mass CO	[g/s]
	Instantaneous Mass HC	[g/s]
	Instantaneous Mass AVL MSS	[g/s]
temperature sensors if available	temperature engine coolant	[°C]
	temperature engine oil	[°C]
	temperature transmission oil	[°C]
	temperature exhaust gas after turbocharger / before aftertreatment	[°C]
	temperature exhaust after aftertreatment	[°C]
other measured quantities	please specify	[please specify]
	please specify	[please specify]

Figura 83 - Foglio 'PEMS\_Inst' (Fonte: Keller, 2017).