

## Impiego di una miscela gasolio/biodiesel al 30% (B30) nei motori diesel: effetto sulle emissioni inquinanti

### *Utilization of 30% vol biodiesel/diesel fuel blends (B30) in diesel engines: effects on pollutant emissions*

F. Avella, D. Faedo (\*), A. Macor (°)

(\*) Stazione Sperimentale per i Combustibili – San Donato Milanese Viale A. De Gasperi, 3 20097 San Donato Milanese (MI) Tel. 02516041; Fax 02514286; e-mail: avella@ssc.it

(°) Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi Industriali- Università di Padova, Stradella San Nicola 3, 36100 - Vicenza

#### RIASSUNTO

Vengono presentati i risultati di una sperimentazione finanziata da CNA (Confederazione Nazionale dell'Artigianato e della Piccola e Media Impresa), svolta con l'obiettivo di valutare gli effetti sull'emissione di specie inquinanti non regolamentate determinati dalla sostituzione del gasolio convenzionale (EN 590) con una miscela al 30% di biodiesel in gasolio (B30) per alimentare due autoveicoli commerciali leggeri (categoria N1) Euro 3, dotati di DOC ed EGR. I due autoveicoli sono stati provati in laboratorio secondo i due cicli di guida standard UDC ed EUDC, e il ciclo di guida "Urban" sviluppato nel Progetto europeo ARTEMIS.

I risultati ottenuti hanno indicato un comportamento analogo dei due autoveicoli provati: è stata messa in evidenza la tendenza verso l'aumento dell'emissione dell'ossido di carbonio, degli idrocarburi incombusti e della formaldeide quando erano alimentati con la miscela B30 rispetto al gasolio. Viceversa, i due autoveicoli hanno emesso una minore quantità di particolato totale, di particolato fine (PM<sub>10</sub>) misurato in termini di numero di particelle/km, e delle specie IPA di maggiore interesse dal punto di vista tossicologico. Le conclusioni del programma sono risultate generalmente in linea con quanto riportato in altre pubblicazioni della letteratura tecnica specializzata.

#### SUMMARY

*The results of an experimental work funded by CNA, (National Confederation of Crafts and Small and Medium-Sized Enterprises) are presented.*

*The aim was the evaluation of the effects on non-regulated emissions by fuelling two Euro 3 commercial trucks (class N1) with a 30% v/v biodiesel/diesel blend (B30) in comparison with the conventional diesel fuel. Test vehicles were equipped with DOC and EGR. They were tested in laboratory under standard driving conditions (UDC and EUDC driving cycles) and the "Urban" test cycle developed in the European ARTEMIS Project.*

*The results showed a similar behaviour between the two testing vehicles: it was evidenced the tendency towards an increase of carbon monoxide, total hydrocarbons and formaldehyde emissions when they were fuelled by the B30 blend in comparison with the diesel fuel. Whereas the two vehicles emitted a lower emission of total particulate, fine particles (PM<sub>10</sub>) and of the most interesting PAH species under the toxicological view. The conclusions of the test program were generally in agreement with the results reported in other specialized technical reports.*

## 1. INTRODUZIONE

Il biodiesel impiegato quale combustibile per alimentare i motori diesel rappresenta una promettente alternativa al gasolio convenzionale. Una delle più importanti peculiarità del biodiesel è l'origine da fonti rinnovabili e biodegradabili, poiché prodotto dal trattamento degli oli vegetali con alcoli leggeri (metanolo, etanolo) per formare monoesteri. Attualmente l'interesse maggiore per il biodiesel come combustibile è determinato dal fatto che un suo impiego esteso nei trasporti può contribuire in modo significativo a risolvere il problema dell'effetto serra determinato fondamentalmente dalla forte immissione nell'atmosfera di anidride carbonica generata dalla combustione dei combustibili fossili.

Infatti, l'analisi sull'intero ciclo di vita (LCA) mostra che il biodiesel produce 2–2,5 J di energia per ogni Joule di energia fossile consumata nella sua produzione e che la quantità di anidride carbonica prodotta dalla sua combustione è assorbita dall'ambiente al 50–80%. In altri termini, la sostituzione di 1 kg di gasolio con 1 kg di biodiesel consente un risparmio di 2,5–2,9 kg di anidride carbonica [1–3].

A livello europeo l'impiego dei biocombustibili (biodiesel e bioetanolo) nel settore trasporti è stato imposto dalla Commissione ai paesi membri con l'emanazione recente della direttiva 2009/30/CE [4].

L'adattabilità del biodiesel nei motori attuali, caratterizzati da sistemi di alimentazione tecnologicamente avanzati, è stata ampiamente indagata nel corso degli ultimi anni. Questo ha portato alla definizione da parte del CEN della norma tecnica EN 14214 [5] che definisce i requisiti minimi di qualità del biodiesel e i metodi di riferimento per la sua caratterizzazione in laboratorio. Attualmente in Europa il biodiesel destinato ad alimentare i motori è miscelato con gasolio fino al 30% volume (B30), però soltanto le miscele fino al 7% volume (B7) sono considerate intercambiabili col combustibile convenzionale. Comunque, attraverso un'indagine eseguita in ambito CUNA, è stato rilevato che molti modelli di autoveicoli in circolazione in Italia possono essere alimentati con miscele fino al 30% volume senza richiedere interventi sul motore.

Molti studi e sperimentazioni sono stati svolti per indagare gli effetti sulle emissioni e sulle prestazioni degli autoveicoli diesel quando alimentati con biodiesel puro o in miscela con gasolio. I risultati, però, sono molto dispersi e spesso contrastanti, a causa della variabilità delle caratteristiche dei motori provati, delle modalità di prova adottate e dalla materia prima di provenienza del biodiesel. Nonostante questa variabilità, si possono individuare alcune tendenze generali, almeno nei riguardi delle emissioni regolamentate e delle prestazioni.

In linea generale l'emissione dell'ossido di carbonio, degli idrocarburi incombusti e del particolato tende a diminuire in modo proporzionale alla concentrazione di biodiesel nel gasolio, mentre quella degli ossidi di azoto tende a crescere fino ad un massimo di 10%. [6-9].

Ancora più difficile è la valutazione globale relativa all'emissione di specie inquinanti non regolamentate, quali i composti carbonilici, gli IPA e i N-IPA, data la scarsità di dati sperimentali disponibili in letteratura. È noto che alcuni membri della famiglia di idrocarburi policiclici aromatici e nitro-aromatici sono considerate come "*probably carcinogenic to humans*" dallo IARC [10]. Le poche informazioni raccolte indicano una tendenza verso la riduzione dell'emissione degli IPA e dei N-IPA e verso l'incremento di quella delle aldeidi, con particolare riferimento alla formaldeide e all'acroleina [3, 6, 11, 12].

Il più basso contenuto energetico del biodiesel rispetto al gasolio determina un maggior consumo di combustibile nell'esercizio dell'autoveicolo, anche se il rendimento globale del motore non subisce apprezzabili variazioni [3]. Effetti negativi, talvolta osservati in prove di durata su motore al banco-freno o su autoveicoli in esercizio prolungato alimentati con miscela gasolio/biodiesel, si riconducono alla formazione eccessiva

(rispetto al gasolio) di depositi sugli iniettori e sulle valvole e di lacche che provocano l'incollaggio delle fasce elastiche dei pistoni.

Questi effetti, naturalmente, sono ascrivibili ai particolari tipi di biodiesel impiegati nelle indagini sperimentali, non conformi alle norme di qualità (EN 14214, ASTM D6751) a cui fanno riferimento i prodotti commerciali. Infatti, le suddette norme prescrivono i limiti di accettabilità anche delle caratteristiche chimico-fisiche (densità, viscosità, contenuto di solidi sospesi, residuo carbonioso, stabilità all'ossidazione, glicerolo libero, valore di acidità) implicate nella insorgenza dei fenomeni indesiderati.

Queste condizioni sono necessarie affinché un prodotto commerciale possa essere impiegato nei motori, anche quelli delle ultime generazioni dotati di apparati di iniezione sofisticati, senza provocare gli effetti segnalati.

Il presente lavoro è il risultato di una ricerca finanziata dalla Confederazione Nazionale dell'Artigianato e della Piccola e Media Impresa – Associazione Provinciale di Venezia, svolta con lo scopo di determinare gli effetti provocati dalla sostituzione del gasolio con una miscela gasolio/biodiesel al 30% volume sugli inquinanti regolamentati e di alcune specie non regolamentate emessi da autoveicoli diesel leggeri. Con questo lavoro si intende fornire un contributo alla valutazione dei benefici di natura ambientale che conseguono all'utilizzo di miscele di gasolio arricchite in biodiesel negli autoveicoli.

## 2. PARTE SPERIMENTALE

### 2.1 - Autoveicoli di prova

La sperimentazione è stata eseguita con due autoveicoli LD (categoria N1) Euro 3, rappresentativi della categoria di autoveicoli commerciali (furgoni) che costituiscono il parco circolante in Italia (tabella 1).

Il livello di omologazione Euro 3 degli esemplari provati è stato scelto perché si ritiene che questi possano rappresentare al meglio la maggior parte degli autoveicoli di questa categoria nel tempo attuale e nei prossimi 4 – 5 anni.

Uno degli autoveicoli selezionati era equipaggiato con un motore diesel di cilindrata 1900 cc, l'altro con un motore di cilindrata 2400 cc. Entrambi erano dotati di sistema di iniezione *common rail*, di catalizzatore ossidante (DOC) e di sistema di ricircolazione dei gas di scarico (EGR).

Autoveicolo	Renault MASTER	Renault TRAFIC
modello	120 dCi	100 dCi
livello di omologazione	Euro 3	Euro 3
targa	DC423BJ	CT147PX
chilometraggio	~ 66.000 km	~ 101.000 km
cilindrata	2463 cc	1870 cc
N. cilindri / N. valvole/cil	4/4	4/2
potenza max	84 kW @ 3500 rpm	74 kW @ 3500 rpm
coppia max	290 Nm @ 1600 rpm	240 Nm @ 2000 rpm
aspirazione	TC	TC
sistema di alimentazione	<i>common rail</i>	<i>common rail</i>
dispositivi antinquinamento	catalizzatore ossidante	catalizzatore ossidante

Tabella 1  
Principali  
caratteristiche  
degli autoveicoli  
di prova

nazioni analitiche per verificarne la conformità con le rispettive norme di riferimento europee EN 590 [13] ed EN 14214 [5] (tabella 2).

Anche la miscela B30 impiegata per le prove era risultata conforme alla norma CUNA NC 637-02 [14] che esprime i requisiti minimi di qualità delle miscele gasolio/biodiesel fino al 30% volume distribuite sul mercato nazionale (tabella 3).

Il numero di cetano del combustibile ottenuto dopo la miscelazione del gasolio col biodiesel è aumentato di poco più di un punto (N.C. = 54), mentre il contenuto di zolfo si è abbassato di circa 10 mg/kg rispetto ai corrispondenti valori del gasolio di riferimento.

### 2.2 - Combustibili di prova

Gli autoveicoli sono alimentati inizialmente con un gasolio commerciale preso come combustibile di riferimento (B0) e, successivamente, con una miscela (B30) costituita dallo stesso gasolio e, per il 30% in volume, da un biodiesel commerciale derivato da olio di colza. Prima della miscelazione sia il gasolio di riferimento che il biodiesel erano stati caratterizzati in laboratorio con le principali determi-

nazioni analitiche per verificarne la conformità con le rispettive norme di riferimento euro-

parametro	u.m.	Metodo (gasolio / biodiesel)	GASOLIO		BIODIESEL	
			valore trovato	Limiti EN 590-04	valore trovato	Limiti EN 14214
Densità @ 15 °C	kg/m <sup>3</sup>	UNI EN ISO 12185	838,4	820 - 845	883,8	860 - 900
Viscosità @ 40°C	mm <sup>2</sup> /s	UNI EN ISO 3104	3,220	2,00- 4,50	4,381	3,50 - 5,00
Contenuto di zolfo	mg/kg	UNI EN ISO 20884 / UNI EN ISO 20846	30,7	≤ 50	3,0	≤ 10,0
Idrocarburi monoaromatici	% m/m	EN 12916	20,9	-	-	-
Idrocarburi diaromatici	% m/m	EN 12916	4,2	-	-	-
Idrocarburi triaromatici	% m/m	EN 12916	0,7	-	-	-
Idrocarburi poliaromatici	% m/m	EN 12916	4,9	≤ 11	-	-
Idrocarburi aromatici totali	% m/m	EN 12916	25,8	-	-	-
Contenuto di acqua	mg/kg	ISO 12937 / ISO 6296	90	≤ 200	150	≤ 500
Contenuto di FAME	% vol	UNI EN 14078 / EN 14103-03	< 1,7	≤ 5	96,3	≥ 96,5
Residuo carbonioso (10% residuo)	% m/m	UNI EN ISO 10370	< 0,01	≤ 0,30	0,22	≤ 0,30
Contaminazione totale	mg/kg	EN 12662	4,7	≤ 24	4,5	≤ 24
Contenuto di ceneri	% m/m	EN ISO 6245	< 0,001	≤ 0,01	< 0,001	≤ 0,02
Numero di cetano	-	UNI EN ISO 5165	53,7	≥ 51,0	52,6	≥ 51,0
T95 (il 95% in vol. evapora @...)	°C	ISO 3405	363,2	≤ 360	-	-
E250 °C (evaporato @ 250 °C)	% vol		24,9	≤ 65	-	-
E350 °C (evaporato @ 350 °C)	% vol		92,0	≥ 85	-	-
Contenuto di fosforo	mg/kg	UNI EN 14107	-	-	< 4	≤ 10,0
Contenuto di esteri	% m/m	EN 14103-03	-	-	96,3	≥ 96,5
Contenuto di monogliceridi	% m/m	EN 14105-03	-	-	0,68	≤ 0,80
Contenuto di digliceridi	% m/m	EN 14105-03	-	-	0,12	≤ 0,20
Contenuto di trigliceridi	% m/m	EN 14105-03	-	-	0,01	≤ 0,20
Contenuto di glicerolo libero	% m/m	EN 14105-03	-	-	0,007	≤ 0,02
Contenuto di glicerolo totale	% m/m	EN 14105-03	-	-	0,200	≤ 0,25
Metilestere acido linolenico	% m/m	EN 12916	-	-	8,3	≤ 12,0
Contenuto di metanolo	% m/m	EN 14110-03	-	-	0,19	≤ 0,20
Acidità	mgKOH/g	EN 14104-03	-	-	0,45	≤ 0,50
Numero di iodio calcolato	-	EN 14214-03	-	-	119	≤ 120
Stabilità all'ossidazione @ 110°C	h	EN 14112-03	-	-	8,9	≥ 6,0
Contenuto di Na + K	mg/kg	UNI EN 14538	-	-	4,9	≤ 5,0
Contenuto di Mg + Ca	mg/kg	UNI EN 14538	-	-	< 1	≤ 5,0

Tabella 2  
Principali  
caratteristiche dei  
componenti della  
miscela B30

La concentrazione di idrocarburi policiclici aromatici si è ridotta in modo proporzionale al contenuto di biodiesel nella miscela (30%).

### 2.3 - Modalità operative

Il protocollo di prova prevedeva l'esecuzione di tre prove ripetute nelle medesime condizioni sperimentali in due fasi distinte per ciascun autoveicolo. Nella prima fase l'autoveicolo è stato alimentato con il gasolio di riferimento, nella seconda con la miscela B30.

In ogni condizione sperimentale sono stati campionati e analizzati i gas di scarico emessi in marcia simulata su un banco dinamometrico a rulli secondo la sequenza dei cicli di guida (figura 1):

- ciclo di guida urbano standard europeo (UDC = *Urban Driving Cycle*)
- ciclo di guida extra-urbano standard europeo (EUDC = *Extra Urban Driving Cycle*)

- ciclo di guida CADC “Urban”, sviluppato nell’ambito del Progetto europeo ARTEMIS per una rappresentazione più realistica delle condizioni di guida in ambiente urbano di una tipica città europea, caratterizzata da frequenti cambi di marcia e accelerazioni più spinte [15].

Tabella 3  
Principali  
caratteristiche  
chimico-fisiche  
della miscela B30

parametro	u.m.	metodo	MISCELA B30	
			valore trovato	Limiti CUNA NC 637-02
Densità @ 15 °C	kg/m <sup>3</sup>	UNI EN ISO 12185	851,9	820 – 860
Viscosità @ 40°C	mm <sup>2</sup> /s	UNI EN ISO 3104	3,494	2,00 – 4,60
Contenuto di zolfo	mg/kg	UNI EN ISO 20884	19,8	≤ 50
Idrocarburi monoaromatici	% m/m	EN 12916	14,6	-
Idrocarburi diaromatici	% m/m	EN 12916	2,9	-
Idrocarburi triaromatici	% m/m	EN 12916	0,5	-
Idrocarburi poliaromatici	% m/m	EN 12916	3,4	≤ 11
Idrocarburi aromatici totali	% m/m	EN 12916	18,0	-
Contenuto di acqua	mg/kg	ISO 12937	90	≤ 200
Contenuto di FAME	% vol	UNI EN 14078	31,5	20 - 30
Residuo carbonioso (10% residuo)	% m/m	UNI EN ISO 10370	0,09	≤ 0,30
Contaminazione totale	mg/kg	EN 12662	12	≤ 24
Corrosione su rame (3h @ 50 °C)	-	EN ISO 2160	1a	Classe 1
Contenuto di ceneri	% m/m	EN ISO 6245	< 0,001	≤ 0,01
Numero di cetano	-	UNI EN ISO 5165	54,8	≥ 51,0
T95 (il 95% in vol. evapora @...)	°C	ISO 3405	356,5	≤ 360
E250 °C (evaporato @ 250 °C)	% vol	ISO 3405	13,5	≤ 65
E350 °C (evaporato @ 350 °C)	% vol	ISO 3405	95,3	≥ 85

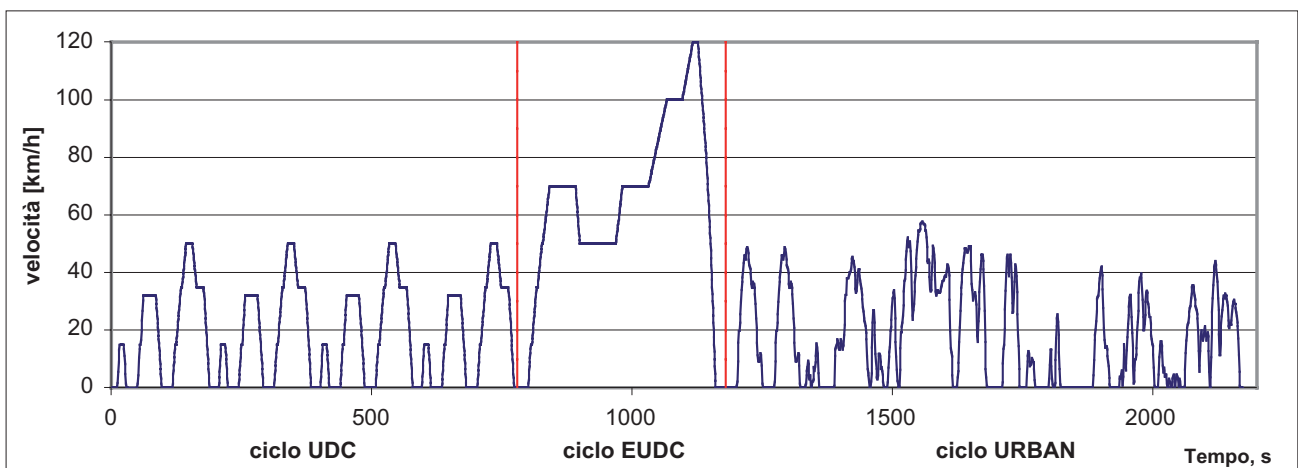


Fig. 1  
Sequenza e  
caratteristiche  
dei cicli di guida

		UDC	EUDC	URBAN
Durata	s	780	400	993
Velocità media	km/h	19,0	62,6	17,7
Velocità massima	km/h	50,0	120,0	57,7
Lunghezza di percorso	km	4,052	6,955	4,87
tempo a regime minimo	%	30,8	10,0	28



formati sono stati estratti con acetonitrile e analizzati tramite un cromatografo liquido WATERS 990 con rilevatore a rete di diodi. I valori inferiori al limite di rilevabilità strumentale, non definiti, sono stati convenzionalmente imposti pari alla metà del valore limite analizzabile con l'HPLC. Questo criterio è quello maggiormente accreditato dalla comunità scientifica internazionale, secondo quanto riportato nel Rapporto ISTISAN N. 04/15 "Trattamento dei dati inferiori al limite di rilevabilità nel calcolo dei risultati analitici", preparato dall'Istituto Superiore di Sanità.

La determinazione dell'emissione degli IPA è stata eseguita associando la frazione costituita dalle specie più leggere (IPA a 2 – 3 anelli) dispersa nella fase gassosa con quella delle specie a peso molecolare più elevato (IPA a 3 – 4 anelli) presente nella frazione solubile del particolato (SOF) raccolto sulle membrane Pallflex. Un'aliquota dei gas di scarico è stata convogliata in fiale contenenti resina adsorbente XAD2 per intrappolare le specie nella fase gassosa. La resina e le membrane sono state trattate con toluene in modalità A.S.E. (Soxhlet Warm) per 12 ore a ~7 cicli/ora per estrarre le specie poliaromatiche su fase solida utilizzando colonne SPE Silica, 1g 6ml (Restek 24038). La purificazione degli analiti è stata eseguita con lavaggi ripetuti con toluene e n.esano, lasciando evaporare l'eccesso di solventi in corrente di azoto e portare a un volume finale di 1 ml. Infine, i campioni sono stati analizzati mediante tecnica GC-MS, impiegando la tecnica SIM e aggiungendo 20 ng di Perilene D12 come standard interno.

### 3. RISULTATI E DISCUSSIONE

Nei paragrafi successivi saranno presentati e discussi i risultati ottenuti nel programma sperimentale. I valori riportati sono la media dei risultati di quattro prove eseguite nelle medesime condizioni sperimentali. Per ogni parametro di emissione rilevato è stata calcolata la variazione del suo valore medio relativo all'alimentazione con la miscela B30 rispetto all'alimentazione con il gasolio. Data l'entità esigua del numero di autoveicoli provati la sperimentazione ha consentito soltanto di valutare in termini di tendenza gli effetti provocati dall'aggiunta di elevate quantità di biodiesel nel gasolio.

#### 3.1 - Emissioni inquinanti regolamentate

Il livello di emissione dell'ossido di carbonio e degli idrocarburi incombusti è risultato significativamente più elevato nel ciclo UDC quando era in atto il transitorio termico del motore rispetto a quello rilevato nei due cicli EUDC ed Urban. Infatti, durante lo svolgimento di questi due cicli l'abbassamento del livello di emissione era determinato dalla conversione dei due inquinanti sul catalizzatore ossidante pienamente attivato. L'effetto è stato osservato con entrambi gli autoveicoli provati.

La sostituzione del gasolio con la miscela B30 ha determinato un incremento dell'emissione dell'ossido di carbonio (intorno al 20% per entrambi gli autoveicoli) e di idrocarburi incombusti (20% per il modello Master e 40% per il modello Trafic) particolarmente rilevante nel ciclo di guida urbano standard UDC, quando era in atto il transitorio termico del motore. Variazioni più modeste sono state osservate nelle altre due condizioni di guida (figura 3).

L'emissione degli ossidi di azoto è risultata più elevata nel ciclo di guida Urban, poiché questo ciclo, pur avendo una velocità media paragonabile rispetto a quella del ciclo standard UDC, è rappresentativo di condizioni di guida più gravose (maggiore numero di fasi di accelerazione). In tutte le condizioni di guida l'impiego del combustibile sperimentale non ha causato alcuna variazione apprezzabile dell'emissione degli ossidi di azoto (figura 4).

#### 3.2 - Caratterizzazione del particolato

Il particolato è il parametro di emissione maggiormente investigato in questa sperimentazione, data l'importanza che gli autoveicoli diesel assumono attualmente come sorgenti di emissione di questo inquinante.

Nonostante l'elevato numero di chilometri accumulati dagli esemplari provati, il livello di

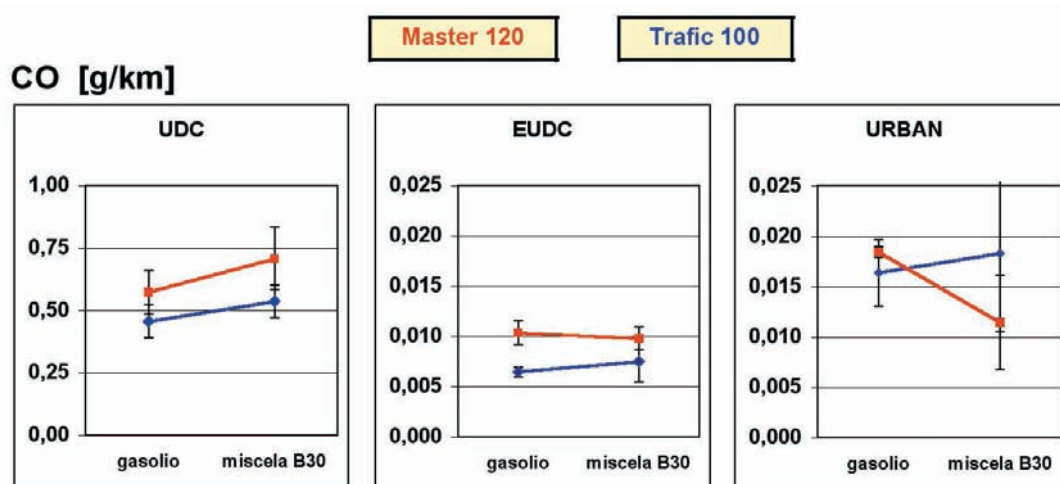


Fig. 3  
Variazione dell'emissione dell'ossido di carbonio e degli idrocarburi incombusti dopo la sostituzione del gasolio con la miscela B30

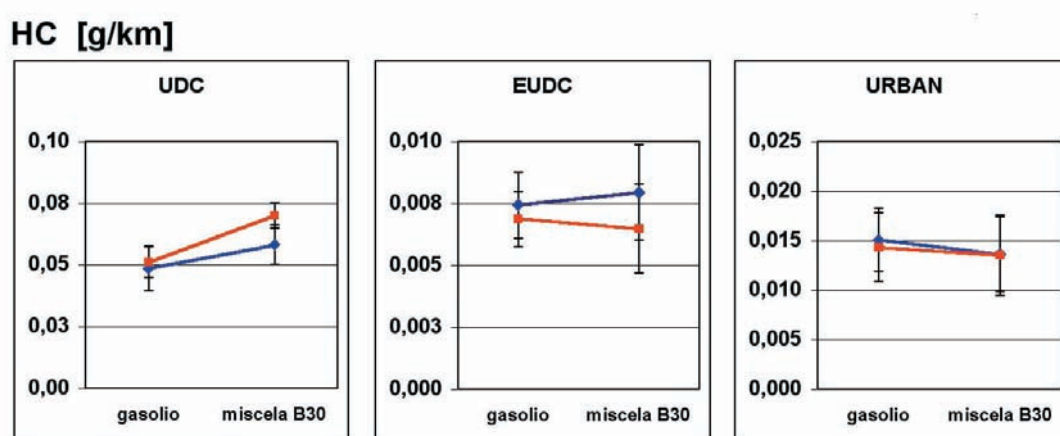
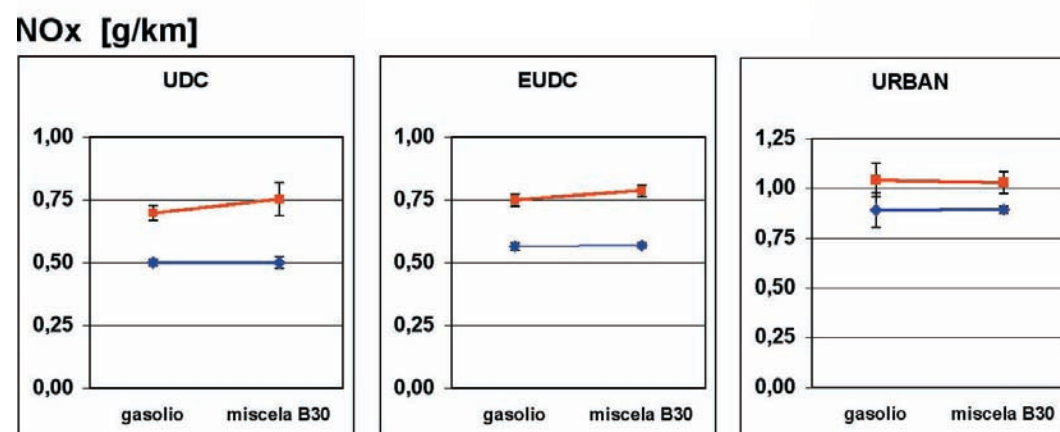


Fig. 4  
Variazione dell'emissione degli ossidi di azoto dopo la sostituzione del gasolio con la miscela B30



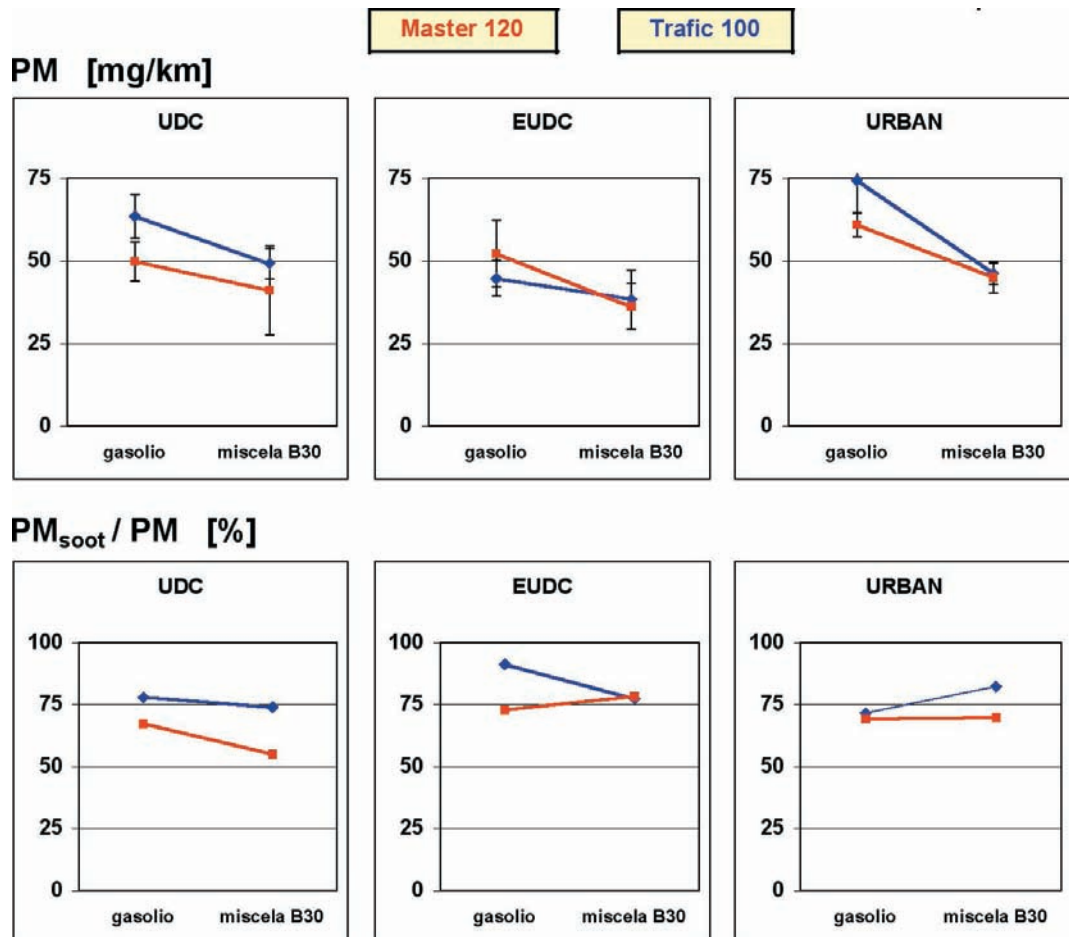
particolato emesso da entrambi, valutato come media pesata dei valori delle due fasi (UDC ed EUDC) dell'intero ciclo standard di riferimento europeo NEDC, è risultato prossimo al valore limite di omologazione imposto dalla Direttiva 98/69/CE.

La natura del combustibile e le condizioni di guida influenzano significativamente l'emissione del particolato e della sua frazione carboniosa. Quando i due autoveicoli erano alimentati con la miscela B30 l'emissione del particolato totale è diminuita sensibilmente, mediamente del 20%, nei cicli standard UDC ed EUDC e poco più del 30% nel ciclo di guida Urban rispetto all'alimentazione a gasolio. Il maggior numero di fasi di accelerazione che caratterizza questo ciclo di guida rispetto a quelli standard di omologazione spiegherebbe la diversa diminuzione osservata.

Al contrario, l'emissione della frazione carboniosa del particolato (*soot*) è diminuita di un

valore intorno al 25% per effetto dell'aggiunta di biodiesel nel gasolio, indipendentemente dalle condizioni di guida e dal modello di autoveicolo provato. La frazione *soot* costituiva in media circa l'80% del particolato totale emesso dal Renault Master e circa il 70% di quello emesso dal Renault Trafic in ogni condizione sperimentale. Sulla base dei dati raccolti, quindi, si è potuto stabilire l'assenza di variazioni significative del rapporto  $PM_{soot}/PM$ . Questa osservazione ha indicato, quindi, che la costituzione chimica macroscopica del particolato totale emesso dai due autoveicoli è rimasta pressoché immutata quando il gasolio è stato sostituito con la miscela B30 (figura 5).

Fig. 5  
Variazione  
dell'emissione del  
particolato e del  
rapporto  
 $PM_{soot}/PM$  dopo  
la sostituzione del  
gasolio con la  
miscela B30



L'analisi dimensionale del particolato eseguita con l'ELPI ha riguardato il numero di particelle emesse in dodici classi dimensionali comprese complessivamente nell'intervallo di diametri aerodinamici 7 nm - 9,36  $\mu$ m. La somma dei valori del numero di particelle emesse in ciascuna classe può essere considerata equivalente all'emissione della frazione < 10  $\mu$ m del particolato totale, nota comunemente come  $PM_{10}$ .

Il numero totale medio di particelle emesse per km percorso da entrambi gli autoveicoli è diminuito significativamente, dal 10% al 15% circa in dipendenza delle condizioni di guida, dopo la sostituzione del gasolio con la miscela B30 (figura 6).

Inoltre, l'analisi modale dell'emissione del  $PM_{10}$  ha indicato come questa specie sia stata emessa in modo preponderante in corrispondenza delle fasi di accelerazione e nelle fasi a velocità costante dei cicli di guida. L'andamento si è mantenuto praticamente invariato sostituendo il gasolio con la miscela B30 per entrambi gli autoveicoli. Il livello di emissione più elevato è stato registrato in condizioni di guida urbana (cicli UDC e Urban) per il modello Master 120 dCi alimentato con i due combustibili, mentre il modello Trafic 100 dCi è risultato un emettitore maggiore di particelle in condizioni di guida a velocità elevata (ciclo EUDC). L'aggiunta di biodiesel nel gasolio non ha determinato alcuna variazione

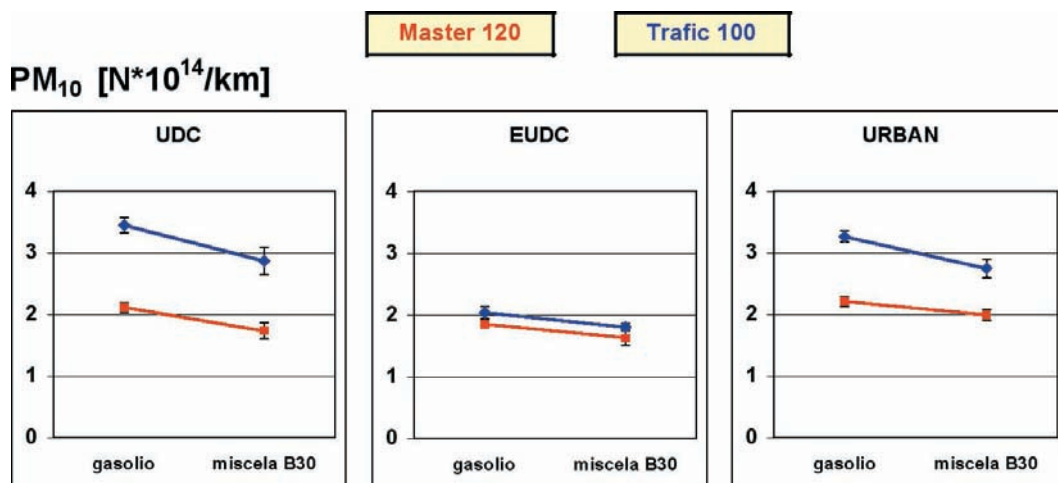


Fig. 6  
Livello medio di emissione del  $PM_{10}$  (numero di particelle per km percorso) dopo la sostituzione del gasolio con la miscela B30

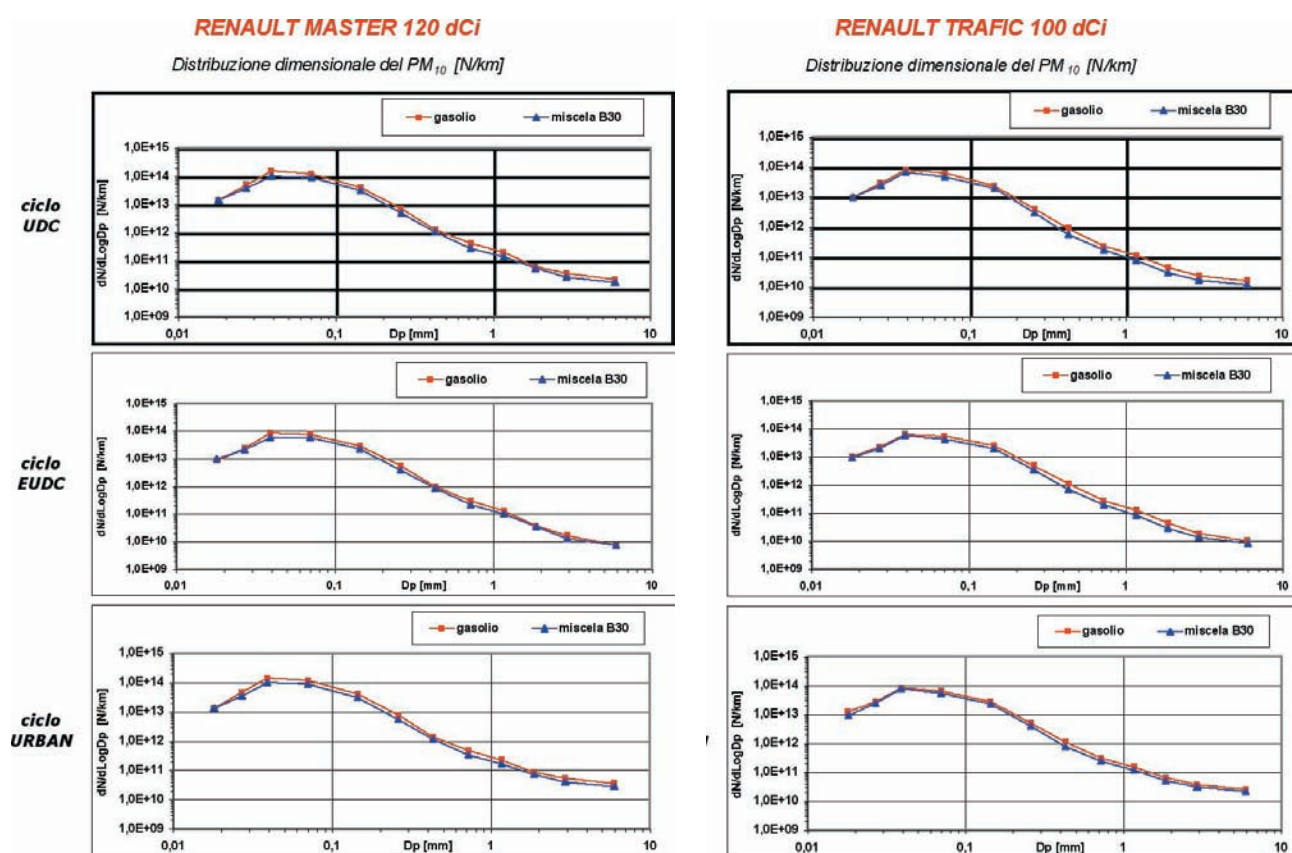


Fig. 7  
Confronto della distribuzione media del particolato fine ( $PM_{10}$ ) emesso dai due autoveicoli alimentati col gasolio e con la miscela B30

sensibile del profilo di distribuzione dimensionale del particolato emesso dai due autoveicoli. Questo è stato determinato come media delle distribuzioni registrate in ogni ciclo di guida. L'andamento si è presentato unimodale con entrambe le alimentazioni con un picco di emissione in corrispondenza del diametro aerodinamico medio ( $D_m$ ) posizionato intorno a 40 nm (figura 7). Questo risultato è in accordo con quelli di altre sperimentazioni [7] e indica che la maggior parte delle particelle emesse da due autoveicoli era in modo "nucleazione".

Con entrambi i combustibili la quasi totalità del numero di particelle emesse (99,9%) ha presentato un diametro aerodinamico medio inferiore a 1  $\mu m$  ( $PM_1$ ), indipendentemente dalle condizioni di guida, mentre il 90% era costituito da particelle con diametro aerodinamico inferiore a 0,1  $\mu m$ .

L'emissione delle particelle con diametro aerodinamico compreso nell'intervallo di valori 24 nm – 9,36  $\mu m$ , corrispondente a quasi tutto lo spettro dimensionale rilevabile con l'ELPI,

è diminuita sensibilmente (dal 10 al 40% circa) quando gli autoveicoli erano alimentati con la miscela B30. Viceversa, nessuna variazione apprezzabile è stata osservata per l'emissione delle particelle ultrafini ( $7 \text{ nm} < D_p < 24 \text{ nm}$ ).

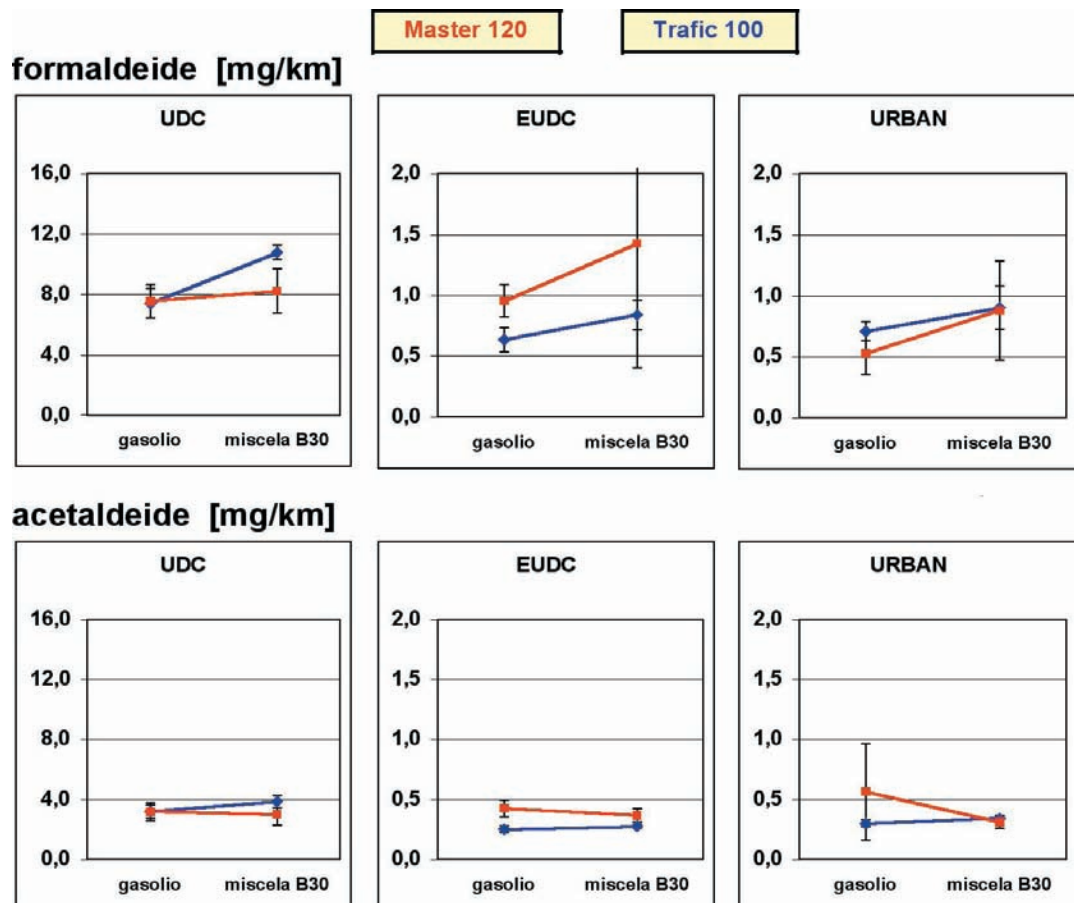
### 3.3 – Emissione dei composti carbonilici

I composti carbonilici rappresentano una classe di sostanze presenti nei gas di scarico degli autoveicoli prodotte dalla parziale ossidazione degli idrocarburi. Esse sono caratterizzate da elevata tossicità e azione cancerogena, specialmente le specie più semplici, quali la formaldeide e l'acetaldeide.

Nella presente sperimentazione sono state determinate quattordici specie differenti. Di queste soltanto la formaldeide e l'acetaldeide hanno presentato un livello medio di emissione apprezzabile, mentre quello di tutte le altre è risultato prossimo al limite di rilevabilità strumentale (HPLC), corrispondente a un valore di emissione pari a  $0,02 \text{ mg/km}$ . Valori così bassi sono stati determinati nei gas di scarico dei due autoveicoli anche durante il transitorio termico del motore, quando l'attivazione del catalizzatore ossidante dei due autoveicoli non era pienamente sviluppata. Questo effetto è stato rilevato sia con l'alimentazione a gasolio che con la miscela B30. La sostituzione del gasolio con la miscela B30 ha determinato un incremento sensibile (circa 45% nel ciclo UDC e intorno a 30% negli altri due cicli) dell'emissione della formaldeide nei gas di scarico dei due autoveicoli (figura 8). Al contrario, gli stessi autoveicoli hanno manifestato un comportamento contrapposto, non spiegato, riguardo all'emissione dell'acetaldeide, quando erano alimentati con la miscela B30, indipendentemente dalle condizioni di guida.

La tendenza verso un incremento dell'emissione della formaldeide, osservato in questa sperimentazione quando gli autoveicoli erano alimentati con il combustibile contenente biodiesel (miscela B30), è risultato in linea con le conclusioni di altre sperimentazioni [11, 12]. L'entità delle variazioni riscontrate tra una sperimentazione e l'altra è determinata,

Fig. 8  
Confronto del livello medio di emissione della formaldeide e dell'acetaldeide nei gas di scarico dei due autoveicoli alimentati col gasolio e con la miscela B30



ovviamente, dalle diverse condizioni sperimentali (motore, condizioni di prova) e dalle caratteristiche chimiche (origine) del biodiesel impiegato.

### 3.4 – Emissione degli IPA

Gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) sono distribuiti in parte nella fase gassosa e in parte nella frazione solubile (SOF) del particolato. La ripartizione tra le due fasi è regolata dalla volatilità relativa delle specie: quelle meno volatili (a quattro e più anelli) tendono a concentrarsi in fase condensata nel SOF.

E' stata determinata l'emissione di undici specie differenti. Le specie più interessanti sono quelle a quattro anelli e più perché incidono significativamente sulla salute umana, essendo caratterizzate da azione cancerogena e mutagena. Di queste il benzo(a)pirene è classificato *carcinogenic to humans* dallo IARC (classe 1); il benzo(a)antracene e il dibenzo(a,h)antracene sono classificati "*probably carcinogenic to humans*" (classe 2A) [10]. In tutte le condizioni di prova il livello di emissione delle specie considerate nei gas di scarico dei due autoveicoli alimentati sia con il gasolio che con la miscela B30, è risultato molto basso, inferiore a 1 µg/km. In alcune condizioni sperimentali, quando il motore era a regime termico, l'emissione delle specie a peso molecolare più elevato, come il benzo(a)antracene e il benzo(a)pirene, ha presentato valori inferiori anche al limite di rilevabilità strumentale (GC/MS).

Data la forte variabilità dei valori di emissione misurati degli IPA non è stato possibile quantificare l'effetto provocato dalla presenza di biodiesel in elevate concentrazioni nel gasolio. E' stato possibile, però, dedurre in modo qualitativo che la sostituzione del gasolio con la miscela B30 non ha determinato alcuna variazione apprezzabile dell'emissione delle quattro specie più volatili (fenantrene, antracene, fluorantene e pirene). Viceversa, è stata osservata la tendenza verso la diminuzione dell'emissione di alcune specie IPA a quattro anelli condensati (figura 9). L'effetto è risultato più marcato durante il transitorio termico del motore (ciclo di guida UDC), quando l'efficienza di conversione del catalizzatore ossidante non era pienamente sviluppata.

### 3.5 – Emissione di anidride carbonica e consumo energetico

La presenza di biodiesel nel gasolio (miscela B30) non ha causato alcuna apprezzabile variazione per l'emissione dell'anidride carbonica, in tutte le condizioni di guida.

Viceversa, è stato riscontrato un incremento di consumo di combustibile, valutabile in media intorno al 2,5% per il modello Master e al 4% circa per il modello Trafic. L'effetto era determinato dalla presenza nella miscela B30 di una quantità relativamente elevata di biodiesel, un combustibile caratterizzato da un contenuto energetico inferiore (PCI ~ 37250 kJ/kg) a quello del gasolio minerale (valore medio indicativo del PCI ~ 42900 kJ/kg).

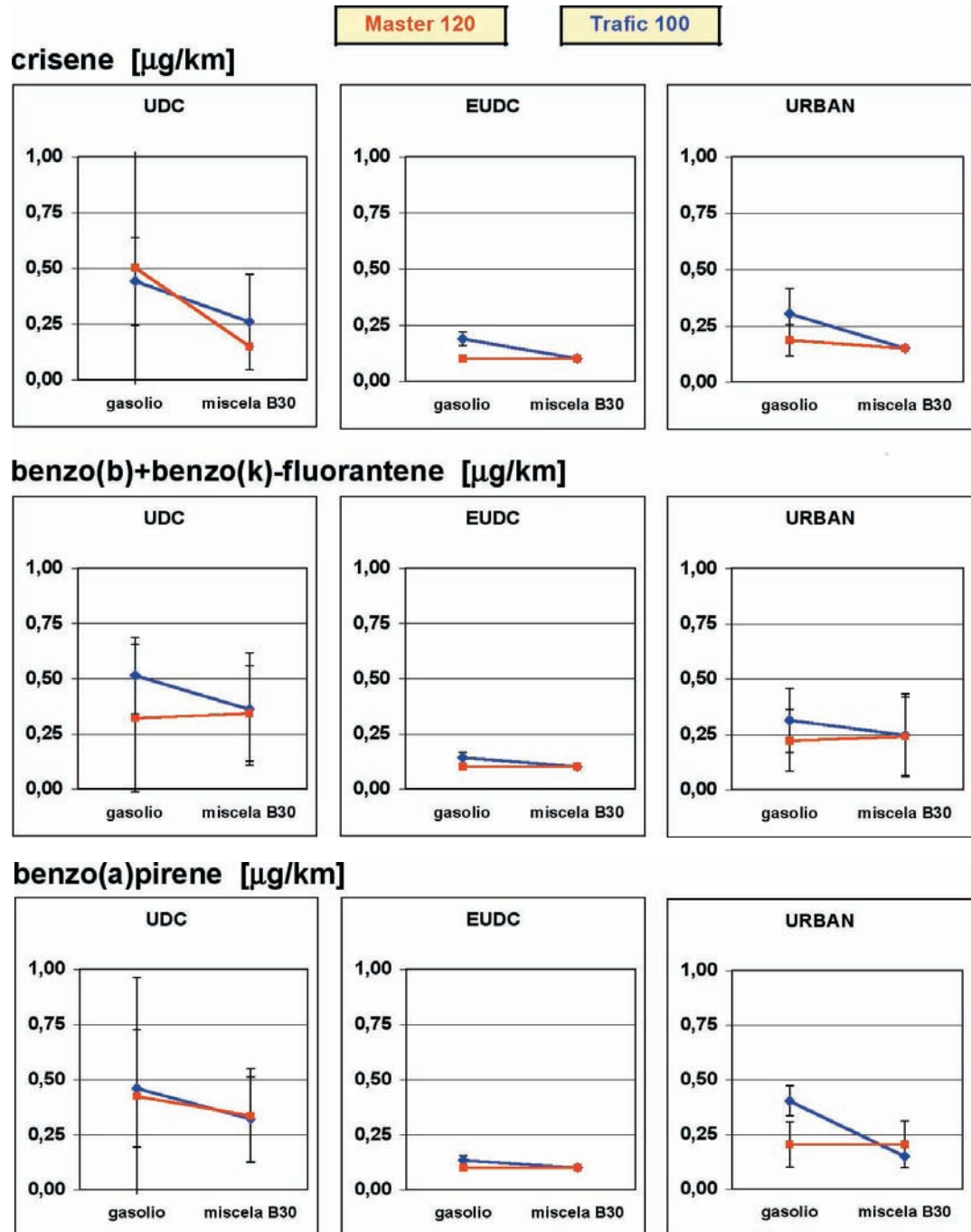
## 4. CONCLUSIONI

Il programma sperimentale è stato svolto su due autoveicoli diesel con tecnologia motoristica Euro 3, equipaggiati con motori di differente cilindrata e potenza e alimentati inizialmente con un gasolio commerciale a norma EN 590 e poi con una miscela costituita da 30% volume di biodiesel (conforme alla norma EN 14214) nello stesso gasolio (miscela B30). Le tecnologie antinquinamento adottate sui due autoveicoli erano tali da mantenere le emissioni inquinanti (regolamentate e non) a livelli molto bassi.

La sostituzione del gasolio con la miscela B30 ha determinato un incremento sensibile delle emissioni di ossido di carbonio e di idrocarburi incombusti, ma nessuna variazione apprezzabile di quella degli ossidi di azoto. Viceversa, l'emissione del particolato totale e della sua frazione carboniosa (*soot*) ha subito una riduzione sensibile, ma il rapporto percentuale tra i due parametri è rimasto praticamente immutato (tra 70 e 80%).

Analogamente, è stata riscontrata una diminuzione significativa dell'emissione del numero di particelle in tutto l'intervallo di dimensioni misurabili con l'ELPI (7 nm – 9,6 µm), mentre

Fig. 9  
Confronto del livello medio di emissione del crisene, benzo(b)+benzo(k)-fluorantene e del benzo(a)pirene nei gas di scarico dei due autoveicoli alimentati col gasolio e con la miscela B30



L'andamento unimodale delle curve di distribuzione dimensionale è rimasto invariato: più del 90% delle particelle emesse avevano un diametro aerodinamico medio  $< 0,1 \mu\text{m}$ .

A riguardo dell'emissione degli inquinanti non regolamentati la sperimentazione non ha consentito di trarre un'indicazione ben definita, dato il livello molto basso e la forte variabilità delle misure. Dopo la sostituzione del gasolio con la miscela B30 è stata riscontrata la tendenza verso l'incremento dell'emissione della formaldeide degli IPA a 3 anelli, e una diminuzione di quelli con peso molecolare più elevato (4 – 5 anelli).

L'impiego della miscela B30 in sostituzione del gasolio non ha determinato alcuna variazione dell'emissione di anidride carbonica. Viceversa, è stato riscontrato un incremento del consumo di combustibile, come era prevedibile, determinato dal più basso potere energetico del biodiesel.

I risultati ottenuti hanno indicato che, per valutare gli effetti determinati dall'aggiunta di elevate quantità di biodiesel nel gasolio sull'emissione degli inquinanti non regolamentati,

andrebbe svolto un programma sperimentale di più ampia portata, esteso a più autoveicoli di modello diverso e con caratteristiche motoristiche maggiormente differenziate.

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Carraretto C., Macor A., Mirandola A., Stoppato A., Tonon S. – *Biodiesel as alternative fuel: experimental analysis and energetic evaluations* – Energy, **29** (2004), 2195–211
- [2] Mittelbach M., Remschmidt C. – *Biodiesel - The Comprehensive Handbook* – Graz, Martin Mittelbach Publisher, 2005
- [3] Lapuerta M., Armas O., Rodríguez-Fernández J. – *Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions* - Progress in Energy and Combustion Science **34** (2008), 198–223
- [4] Direttiva 2009/30/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio che modifica la direttiva 98/70/CE per quanto riguarda le specifiche relative a benzina, combustibile diesel e gasolio nonché l'introduzione di un meccanismo inteso a controllare e a ridurre le emissioni di gas a effetto serra, modifica la direttiva 1999/32/CE del Consiglio per quanto concerne le specifiche relative al combustibile utilizzato dalle navi adibite alla navigazione interna e abroga la direttiva 93/12/CE
- [5] Norma europea EN 14214 – *Combustibili per autotrazione, Esteri metilici di acidi grassi (FAME) per motori diesel – Requisiti e metodi di prova* - (2008)
- [6] Turrio-Baldassarri L., Battistelli C., Conti L., Crebelli R., De Berardis B., Iamiceli A. L., Gambino M., Iannaccone S. – *Emission comparison of urban bus engine fueled with diesel oil and 'biodiesel' blend*. - Science of the Total Environment, **327** (2004), 147–162
- [7] Souligny M., Graham L., Rideout G., Hosatte P. – *Heavy-Duty Diesel Engine Performance and Comparative Emission Measurements for Different Biodiesel Blends Used in the Montreal BIOBUS Project* – SAE Technical Paper N. 2004-01-1861 (2004)
- [8] Yang H.H., Chien S.M., Lo M.Y., Lan J.C.W., Lu W.C., Ku Y.Y. – *Effects of biodiesel on emissions of regulated air pollutants and polycyclic aromatic hydrocarbons under engine durability testing* - Atmospheric Environment, **41** (2007), 7232–7240
- [9] Mayer A., Czerwinski J., Wyser M., Mattrel P., Heitzer A. – *Impact of RME/Diesel Blends on Particle Formation, Particle Filtration and PAH Emissions* – SAE Technical Paper N. 2005-01-1728 (2005)
- [10] IARC – Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risks to Humans.(2009) - <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/crthallalph.php>
- [11] Guarieiro L.L.N., de Paula Pereira P.A., Torres E.A., da Rocha G.O., de Andrade J.B. – *Carbonyl compounds emitted by a diesel engine fuelled with diesel and biodiesel-diesel blends: Sampling optimization and emissions profile* – Atmospheric Environment, **42** (2008), 8211–8218
- [12] Correa S.M., Arbilla G. – *Carbonyl emissions in diesel and biodiesel exhaust* – Atmospheric Environment, **42** (2008), 769–775
- [13] Norma europea EN 590 – *Combustibili per autotrazione - Gasolio per motori diesel - Requisiti e metodi di prova* – (2009)
- [14] Norma CUNA NC 637-02 – *Combustibili per autotrazione – Miscela di esteri metilici di acidi grassi (FAME) al 20-30 % v/v in gasolio – requisiti e metodi di prova* – (2003)
- [15] André M. – *The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions* – Science of the Total Environment, **334-335**, (2004), 73-84

#### RICONOSCIMENTI E RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento particolare al Segretario Provinciale della Confederazione Nazionale dell'Artigianato e della Piccola e Media Impresa - Associazione Provinciale di Venezia Dott. **Renato Fabbro** per il finanziamento della ricerca e al Prof. Alberto Mirandola del Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Padova, per il supporto dato durante il lavoro.