



STAZIONE SPERIMENTALE PER I COMBUSTIBILI
San Donato Milanese

EMULSIONI ACQUA/GASOLIO

IMPIEGO
NEI MOTORI DIESEL *HEAVY-DUTY*

**Analisi critica dei dati raccolti in una indagine
bibliografica riguardante sperimentazioni
svolte su motori e autoveicoli diesel**

Francesco Avella

Giugno 2004

INDICE

Riassunto	p.	2
1. Premessa	p.	5
2. Caratterizzazione e meccanismo di combustione nei motori delle emulsioni acqua/gasolio	p.	6
3. Emissioni regolamentate e consumo	p.	10
3.1 Comportamento delle emulsioni in prove su motore	p.	10
3.2 Comportamento delle emulsioni in prove su autoveicolo	p.	23
4. Emissioni non regolamentate	p.	33
4.1 Misure di emissione delle specie non regolamentate	p.	33
4.2 Distribuzione dimensionale del particolato	p.	34
4.3 Specie inquinanti non regolamentate	p.	39
5. Considerazioni conclusive	p.	42
Terminologia	p.	44
Riferimenti bibliografici	p.	45

EMULSIONI ACQUA/GASOLIO

IMPIEGO NEI MOTORI HEAVY-DUTY

ANALISI DEI DATI DI EMISSIONE E OSSERVAZIONI RELATIVE

Riassunto

L'emulsione di acqua in gasolio costituisce un metodo innovativo per produrre combustibili diesel compatibili con le tecnologie motoristiche tradizionali e quelle più avanzate, in grado di offrire una reale possibilità di ridurre le emissioni di alcune specie inquinanti nei gas di scarico, senza penalizzare le prestazioni del propulsore. Essa si presta per alimentare motori di tipo *heavy-duty* (HD), montati sia su autoveicoli (autobus, veicoli commerciali) che in impianti fissi (gruppi elettrogeni, ecc.).

La facilità di preparazione e di distribuzione delle emulsioni e l'impiego immediato nei motori senza apportare alcuna loro modifica hanno reso interessante questo combustibile come alternativa al gasolio convenzionale.

Per stabilirne i requisiti minimi di qualità la CUNA in Italia e l'AFNOR in Francia hanno già definito norme a carattere nazionale.

Dal punto di vista chimico le emulsioni acqua/gasolio sono dispersioni di microgocce di acqua nel gasolio, stabilizzate attraverso l'aggiunta di particolari sostanze tensioattive.

Per valutare il comportamento nei motori diesel in relazione alle emissioni inquinanti sono stati raccolti in modo sistematico e analizzati criticamente i dati ottenuti in sperimentazioni, eseguite da Laboratori specializzati nel settore motoristico, sia su motore che su autoveicolo. Essi costituiscono l'oggetto del presente documento, con il quale viene fatto il punto sullo stato dell'arte degli effetti immediati sulle emissioni inquinanti dei motori alimentati con le emulsioni.

La documentazione consultata è riferita esclusivamente a tre prodotti noti con le denominazioni commerciali AQUAZOLE, GECAM e PURINOX ed è stata fornita dai produttori operativi in Italia.

Sono stati esaminati i dati di emissione e di consumo di combustibile di ventinove sperimentazioni svolte su undici modelli di motore HD turbocompressi al banco-freno, con differente livello omologativo (Euro 0, 1, 2, 3) e su un motore monocilindrico da laboratorio. Alcuni motori HD di modello meno attuale sono stati provati secondo procedure standardizzate di tipo tradizionale (ECE R49, ISO 8178), mentre per quelli di concezione tecnologica più avanzata sono state adottate procedure normalizzate più recenti (ESC, ETC) e, solo in un caso, una procedura non normalizzata (DUB).

In numero inferiore (otto lavori sperimentali) sono i dati relativi alle prove svolte su tre modelli europei di autobus urbano. Essi si riferiscono all'analisi dei gas di scarico campionati durante una simulazione di percorso degli autobus eseguita secondo cicli di guida non convenzionali, quali il ciclo MLTB e il ciclo ATM 61.

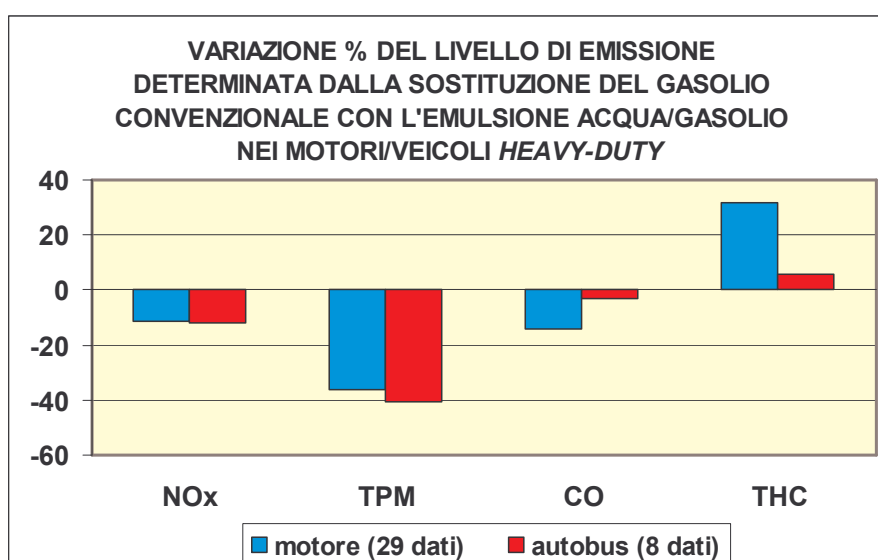
In quasi tutte le sperimentazioni è stato impiegato come combustibile di riferimento il gasolio utilizzato per la preparazione delle emulsioni. I combustibili di riferimento erano gasoli a specifica EN 590 con differenti livelli di zolfo.

La maggior parte dei test di confronto su motore al banco-freno sono stati svolti a parità di mandata di combustibile e non a parità di potenza erogata dal motore. In effetti, dato il differente contenuto energetico delle emulsioni rispetto al gasolio, la condizione rappresentativa del funzionamento su strada dell'autoveicolo su cui è equipaggiato il motore, a parità di percorso effettuato, sarebbe la seconda. Comunque, i risultati ottenuti nelle sperimentazioni sono stati considerati accettabili in quanto espressi in termini di valori specifici di emissione e di consumo, cioè riferiti all'unità di potenza erogata dal motore.

Questa constatazione trova riscontro nella concordanza dei risultati ottenuti nelle prove al banco-freno con quelli conseguiti nelle prove di simulazione di percorso su banco a rulli, ritenute più rappresentative delle condizioni reali di esercizio degli autobus in ambito urbano.

Sebbene le condizioni sperimentali delle prove svolte sia sui motori che sugli autoveicoli fossero differenti da caso a caso, è stato possibile trarre dall'esame dei dati raccolti e presentati in questo rapporto alcune importanti conclusioni di carattere generale sul comportamento delle emulsioni in relazione alle emissioni inquinanti, rispetto al gasolio convenzionale.

Dall'esame dei dati delle sperimentazioni svolte è stato osservato che la sostituzione del gasolio con l'emulsione tende a determinare una diminuzione sensibile delle emissioni dell'ossido di carbonio (CO), degli ossidi di azoto (NOx) e, soprattutto, del particolato (TPM), valutabile in media rispettivamente intorno all'11%, al 14% e al 37%, come è evidenziato nel diagramma sotto riportato.



Al contrario, si evince un incremento di poco più del 30% dell'emissione degli idrocarburi incombusti (THC) nelle prove svolte su motori al banco-freno e una variazione po-

co apprezzabile nelle prove su autoveicolo. In ogni caso le emissioni di ossido di carbonio e di idrocarburi incombusti rimangono sempre inferiori ai valori limite di omologazione di almeno il 60%, indipendentemente dal combustibile impiegato.

L'analisi dimensionale del particolato, eseguita in alcune sperimentazioni con strumenti specifici quali l'SMPS, l'ELPI, il PAS/DC, hanno fornito risultati sostanzialmente concordi tra loro. Nel campo di particelle con dimensioni $D_p > 80 - 100$ nm il livello di emissione determinato dall'emulsione è risultato in alcuni casi paragonabile, in altri inferiore a quello ottenuto alimentando il motore con gasolio. Il livello di emissione delle particelle ultra-fini ($D_p < 80$ nm) è risultato inferiore a quello del gasolio per tutte le emulsioni formulate con acqua deionizzata. Solo nel caso di una emulsione formulata con acqua potabile (da sottolineare, peraltro, che la normativa italiana prescrive l'impiego di acqua deionizzata) i minerali contenuti nell'acqua hanno comportato un livello di emissione di particelle ultrafini in leggero aumento rispetto al gasolio.

Non è stato possibile effettuare alcuna valutazione sull'emissione di alcune classi di microinquinanti non regolamentati (IPA, composti carbonilici) per l'insufficienza dei dati disponibili.

Le misure di consumo di combustibile, eseguite durante le prove su autoveicolo, hanno consentito di stabilire che, a parità di condizioni operative dell'autoveicolo (ciclo di guida, carico), il consumo dell'emulsione è risultato generalmente più elevato di quello del gasolio convenzionale.

Al contrario, il consumo riferito alla sola componente idrocarburica (gasolio + additivi) presente nell'emulsione è risultato più basso rispetto a quando lo stesso autoveicolo è alimentato con il solo gasolio. L'origine di questo effetto è riconducibile a un diverso processo di combustione. Sebbene le misure riportate nei documenti consultati non siano sempre concordanti tra loro, si deduce che questo minor consumo si riflette in una minore emissione di anidride carbonica.

1. PREMESSA

Il presente rapporto riporta una sintesi dello stato dell'arte sul comportamento delle emulsioni acqua/gasolio in relazione alle emissioni inquinanti nei gas di scarico e al consumo di combustibile. Viene presentata un'analisi critica dei risultati riferiti a prove comparative, svolte in laboratorio su propulsori diesel di tipo *heavy-duty* (HD) al banco-freno e su autoveicoli pesanti (autobus), per mettere in evidenza gli effetti determinati dall'impiego delle emulsioni acqua/gasolio in sostituzione del gasolio.

I dati sono stati raccolti, dopo un attento esame critico, dalle relazioni tecniche e dagli estratti di rapporti riservati forniti da tre produttori di emulsioni operativi sul territorio nazionale e da pubblicazioni scientifiche. Tutti i documenti consultati sono indicati nella bibliografia riportata a fine testo.

Le emissioni considerate sono quelle regolamentate, con particolare riferimento agli ossidi di azoto e al particolato. In alcuni casi sono stati valutati gli effetti determinati sull'emissione di alcune classi di sostanze inquinanti non regolamentate e sulla distribuzione dimensionale del particolato.

Quasi tutte le prove sono state svolte presso laboratori specializzati di rilevanza internazionale, con riconosciuta esperienza nel settore motoristico, quali Ricardo Consulting, Technik Thermische Maschinen (TTM), Agip Petroli CREA (ora ENI Tecnologie). Quest'ultimo si è avvalso anche della supervisione della Stazione Sperimentale per i Combustibili.

Le prove sono riferite a tre prodotti noti con le denominazioni commerciali **AQUAZOLE** (TOTAL), **GECAM** (CAM TECNOLOGIE) e **PURINOX** (LUBRIZOL).

Questi combustibili sono già da qualche anno distribuiti in extra-rete per alimentare flotte di autoveicoli per il trasporto pubblico e mezzi di servizio di numerose Aziende municipalizzate in Italia, Francia, Stati Uniti, Cina, Australia ed altri paesi europei.

In alcune sperimentazioni sono state impiegate emulsioni con contenuto d'acqua inferiore a 10% in massa sia perché la ricerca era mirata a soli scopi investigativi, sia perché le prove sono state svolte con combustibili preparati prima dell'entrata in vigore delle specifiche CUNA e AFNOR.

2. CARATTERIZZAZIONE E MECCANISMO DI COMBUSTIONE NEI MOTORI DELLE EMULSIONI ACQUA/GASOLIO

Le emulsioni acqua/gasolio costituiscono una moderna tecnologia per alimentare motori diesel, sia montati su veicoli che impiegati in installazioni fisse. Esse si prestano per un impiego immediato nei motori in sostituzione del gasolio tradizionale, utilizzando le attuali strutture di distribuzione, possono essere formulate con combustibili diesel a bassissimo tenore di zolfo (50 e 10 mg/kg) e sono compatibili con i moderni dispositivi di abbattimento delle emissioni.

L'interesse manifestato recentemente sulle emulsioni come combustibile alternativo al gasolio deriva dalla potenziale capacità dell'acqua, nota già dall'inizio del secolo scorso, di ridurre le emissioni nocive, come gli ossidi di azoto e il particolato, nei gas di scarico, quando viene iniettata nel motore assieme al combustibile (con un'iniezione separata di acqua liquida o di vapore o, meglio, come emulsione stabilizzata).

Le emulsioni acqua/gasolio sono sospensioni stabilizzate di acqua in gasolio. La stabilizzazione è ottenuta mediante l'impiego di particolari sostanze tensioattive che impediscono per un periodo sufficientemente lungo (alcuni mesi) la separazione delle due fasi liquide insolubili. La dimensione media delle microgocce di acqua presenti nell'emulsione è generalmente inferiore a $1\ \mu\text{m}$ [1]. Misure eseguite con un *Mastersizer* Malvern hanno indicato che la distribuzione delle microgocce è unimodale centrata circa a $0,3 - 0,5\ \mu\text{m}$ [1].

L'acqua impiegata per la preparazione delle emulsioni deve, in base alla norma italiana, essere deionizzata, allo scopo di evitare l'insorgere di depositi di sostanze minerali (carbonati) sulle valvole e sul catalizzatore ossidante nell'impiego prolungato nei motori. Le sostanze minerali sono anche causa di una maggiore emissione di particelle ultrafini nei gas di scarico del motore.

La formulazione dei tensioattivi varia da produttore a produttore: in generale il pacchetto di additivi utilizzato per produrre l'emulsione è costituito da sostanze a basso e ad alto peso molecolare e da un *cetane improver*. Dal punto di vista chimico, queste sostanze organiche sono composte esclusivamente da carbonio, idrogeno, ossigeno e azoto.

Il *cetane improver* è richiesto per recuperare la perdita di qualità di accensione del gasolio quando è emulsionato con l'acqua. Infatti, la vaporizzazione delle microgocce di acqua, caratterizzata da un elevato calore latente di vaporizzazione, determina un abbassamento della temperatura della miscela combustibile/aria durante la prima parte del processo di combustione nel motore, con l'effetto di un incremento del ritardo di accensione del gasolio.

La presenza di tensioattivi nell'emulsione esercita un'azione protettiva contro la corrosione sulle strutture metalliche che costituiscono l'impianto di stoccaggio e di alimentazione del motore, oltre a migliorare il potere lubrificante dell'emulsione stessa.

In alcuni casi alle emulsioni vengono aggiunte anche sostanze antibatteriche per prevenire la formazione di colonie batteriche durante lo stoccaggio e anticongelanti per assicurare l'operabilità dell'autoveicolo nel periodo invernale.

Al momento attuale le emulsioni prodotte in Italia per l'impiego nella trazione autoveicolare sono limitate alla sola distribuzione extra rete e devono essere conformi alle specificazioni della norma CUNA NC 637-01 [2]. Questa ne definisce i requisiti minimi di qualità, tra i quali il contenuto minimo e massimo di acqua. In Francia viene applicata la norma AFNOR [3].

I valori limite delle proprietà chimico-fisiche che caratterizzano la qualità minima prescritta dalle due norme, messi a confronto tra loro nella Tabella I, indicano che sostanzialmente le due specifiche sono simili tra loro.

Tabella I

Valori limite delle specifiche CUNA (Italia) e AFNOR (Francia)

Caratteristica	u.m.	CUNA NC 637-01			AFNOR		
		metodo	limite		metodo	limite	
			minimo	massimo		minimo	massimo
Massa volumica	kg/m ³	EN ISO 3675	835	870	pr NFM07-096	835	870
Stabilità alla centrifugazione (sep. fase)	% v/v	M.U. 1548	-	9	pr NFM07-101	0,3	9
Viscosità @ 40 °C	mm ² /s	EN ISO 3104	2,0	7,0	pr NFM07-097	2,5	7,0
Contenuto di acqua	% m/m	NF M07-104	12	15	pr NFM07-104	9	15
Contenuto di zolfo	% m/m	EN ISO 14596	-	S·(1-y/100)	pr NFM07-100	-	S·(1-y/100)
Ceneri solfatate	% m/m	ISO 3987	-	0,01	-	-	-
Contaminanti	mg/kg	EN 12662	-	24	-	-	-
Corrosione su rame	indice	EN ISO 2160	classe 1		pr NFM07-098	classe 1	
Contenuto di alchilnitrati (come ENH)	mg/kg	UNI EN ISO 13759	750	-	-	-	-
Punto di infiammabilità	°C	UNI EN ISO 2592	> 55	-	pr NFM07-102	-	70
Lubricità	micron	ISO 12156-1	-	460	pr NFM07-103	-	460
CFPP (inverno/estate)	°C	UNI EN 116	-	-10/0	pr NFM07-099	-	-15/0

NOTE: S = contenuto % di zolfo nel gasolio; y = contenuto % di acqua nell'emulsione

La norma AFNOR non impone alcun limite sul contenuto di alchilnitrati e ammette l'impiego di acqua potabile per la preparazione dell'emulsione.

Oltre a stabilire i limiti delle caratteristiche chimico-fisiche dell'emulsione, la norma CUNA prescrive anche che:

- le emulsioni sono destinate alla sola distribuzione extra-rete, per alimentare veicoli *heavy-duty* (autobus, veicoli commerciali e industriali), mentre non sono impiegabili per alimentare autovetture diesel

- le emulsioni prodotte devono essere impiegate entro e non oltre 4 mesi dalla data di estrazione dall'impianto di produzione
- per la loro preparazione occorre impiegare gasolio conforme alla norma UNI EN 590-2000
- l'acqua impiegata per la preparazione deve essere deionizzata con conducibilità massima di 30 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- gli emulganti e gli additivi devono essere esenti da cloro, fluoro, metalli pesanti
- non è consentita la miscelazione tra emulsioni prodotte con differente tecnologia, né la miscelazione col gasolio residuo nelle cisterne dei depositi.

La combustione in un motore diesel avviene in due fasi distinte: la fase premiscelata, che si forma durante il periodo di induzione (ritardo di accensione) della miscela gasolio/aria, caratterizzata da un rapido rilascio di calore, seguita da una fase successiva (fase controllata), a decorso più lento, che avviene con fiamma a diffusione. Nella regione del getto dove c'è un elevato rapporto combustibile/aria avviene la formazione di *soot*, che in gran parte viene ossidato durante la combustione, mentre soltanto una parte più modesta viene espulsa come emissione nei gas di scarico. Nella regione della fiamma in cui le temperature raggiungono picchi elevati gli ossidi di azoto (NO_x) si formano più rapidamente.

La presenza di acqua nell'emulsione acqua/gasolio modifica il rapporto relativo combustibile/ossigeno/inerti durante la prima fase della combustione, con il risultato della formazione di una minore quantità di *soot*, come evidenziato con studi svolti su motore di prova. Inoltre, si ritiene che l'acqua partecipi temporaneamente al processo di combustione con apporto di ossigeno.

Tecniche di diagnostica laser, come la LII (*Laser Induced Incandescence*) e la LOS (*Line-of-Sight Extinction*) applicate su di un motore monocilindrico dotato di finestra ottica, indicano che, rispetto al gasolio, la presenza di un 10% di acqua nel combustibile diesel determina chiaramente un calo di rilascio di calore e un decremento sensibile della formazione di *soot*, non solo nella fase di combustione premiscelata, ma nell'intero decorso della combustione [4].

La presenza di acqua nel gasolio sotto forma di emulsione altera anche il processo di iniezione, migliorando l'atomizzazione e la penetrazione del getto nella camera di combustione. L'atomizzazione più spinta risulterebbe essere determinata da microesplosioni delle microgocce di acqua per rapida evaporazione [5], mentre una migliore premiscelazione è causata dalla maggiore quantità di moto delle microgocce di emulsione con l'effetto di una maggiore penetrazione nell'aria compressa all'interno del cilindro del motore.

Il meccanismo fisico associato a quello chimico si manifesta con un ritardo di accensione più elevato del combustibile emulsionato rispetto al gasolio. Questo determina a sua volta una maggiore miscelazione del combustibile con l'aria, con il risultato di una combustione che avviene sempre meno in fase diffusiva.

Misure eseguite su di un motore monocilindrico AVL Petter (cilindrata = 500 cc) hanno messo in evidenza un incremento del ritardo di accensione proporzionato col carico del motore, rispettivamente di 1,3 e 1,5 volte superiore quando vengono impiegate emul-

sioni con contenuto di acqua di 5% e di 10% m rispetto a quando si impiega un gasolio convenzionale, preso come combustibile di riferimento [6]. Secondo Greeves e coll. [7], il maggior incremento del ritardo di accensione va ricercato nella maggior penetrazione del getto nella camera di combustione, mentre l'effetto chimico è meno importante.

Per il suo elevato calore latente di vaporizzazione e per la sua elevata capacità termica, superiori a quelli degli idrocarburi, l'acqua presente nell'emulsione produce anche un effetto di mitigazione dei picchi di temperatura durante la combustione, così da abbassare la velocità di formazione degli ossidi di azoto. La riduzione della temperatura di fiamma, però, determinerebbe contemporaneamente un incremento delle emissioni di ossido di carbonio e di idrocarburi incombusti.

Con l'impiego dell'emulsione, la riduzione della formazione del particolato totale durante la combustione, che va da un minimo di 25% a un massimo di 80% rispetto al gasolio, invece, sarebbe determinata dalla maggior proporzione della fiamma premiscelata rispetto a quella diffusiva. Questa proporzione dipende, a sua volta, dal carico del motore e dal contenuto di acqua nell'emulsione.

Prove su di un motore Caterpillar 3406B (in versione marina) alimentato con emulsioni a differente contenuto di acqua (dal 5% al 20%), prendendo come riferimento un gasolio, hanno messo in evidenza che la riduzione dell'emissione degli ossidi di azoto e del particolato è direttamente proporzionale al contenuto di acqua nel combustibile. L'effetto sull'emissione del particolato, però, sembrerebbe moltiplicativo (cinetica di combustione) piuttosto che additivo, come avviene per l'emissione degli ossidi di azoto [7].

3. EMISSIONI REGOLAMENTATE E CONSUMO

3.1. Comportamento delle emulsioni in prove su motore

Sono stati raccolti ed esaminati i risultati sperimentali di ventinove sperimentazioni svolte, secondo procedure normalizzate (tranne un caso), su dodici motori diesel HD di differente tipologia tecnologica, impiegando sia gasolio minerale, come combustibile di riferimento, che emulsioni acqua/gasolio.

La tabella II riporta la ripartizione delle prove in funzione del tipo di ciclo di funzionamento e del tipo di combustibile emulsionato.

Tabella II
Distribuzione del numero di test tra le diverse tipologie di prova e di emulsioni

TIPO PROVA	AQUAZOLE	GECAM	PURINOX	totale
ECE R49	2	5	1	8
ESC LP ⁽¹⁾	2	4		6
ESC SP ⁽²⁾		5		5
ISO 8175		2	3	5
ETC			4	4
DUB			1	1
totale	4	16	9	29

⁽¹⁾ prove eseguite a parità di portata di iniezione (LP)

⁽²⁾ prove eseguite a parità di potenza erogata (SP)

I valori di emissione delle specie inquinanti riportati in ogni sperimentazione sono differenti tra loro, data la diversità dei motori utilizzati, delle procedure di prova adottate e del tipo di combustibili impiegati. Questi tre fattori, infatti, influiscono sensibilmente sulle emissioni e sul consumo di combustibile.

Undici dei motori provati sono propulsori HD turbocompressi in uso corrente su autobus urbani di media e grande dimensione, con cilindrata di 6, 8 e 10 litri. Soltanto in un caso è stato impiegato per la sperimentazione un motore di prova da laboratorio monocilindrico da 2 litri di cilindrata. Le classi omologative dei propulsori erano in parte Euro 1, Euro 2 ed Euro 3 e, soltanto in qualche caso, Euro 0. In pochi casi il modello di propulsore selezionato è stato provato in versioni omologative differenti.

Tutti i motori sono stati sottoposti a prove di emissione con procedure normalizzate, secondo cicli di funzionamento del propulsore: ECE R49, ESC, ETC e ISO 8178C. Solo in un caso è stato impiegato un ciclo di funzionamento non normalizzato (DUB).

Le prove ECE R49, ESC ed ETC sono state adottate in Europa per l'omologazione riferita alle emissioni dei motori HD. La prima prova si riferisce alla Direttiva 88/77/CEE, modificata dalla Direttiva 91/542/CEE (Euro 1 ed Euro 2) [8], la seconda e la terza sono prescritte nella Direttiva 1999/96/CE (Euro 3) [9].

Tutte le prove, tranne quelle ETC e DUB, prevedono la determinazione delle emissioni inquinanti e del consumo di combustibile nei gas di scarico del motore funzionante a regimi di rotazione stazionari su un banco dinamometrico.

La procedura di prova ECE R49 consiste nella determinazione degli inquinanti emessi dal motore in marcia secondo due serie di cinque condizioni stazionarie di funzionamento (modi), una a regime di coppia massima con carichi progressivamente crescenti, l'altra a regime di potenza massima con carichi progressivamente decrescenti. Le due serie di modi sono intervallate con la condizione di funzionamento a regime minimo (1°, 7° e 13° modo). A ciascun modo viene attribuito un fattore peso per il calcolo delle emissioni e del consumo di combustibile specifici, ossia riferiti all'unità di potenza erogata dal motore.

La procedura di prova ESC, simile alla procedura ECE R49, consiste anch'essa di 13 modi di funzionamento del propulsore posto su banco dinamometrico, ma le condizioni operative del motore (regime/carico) e i relativi fattori peso sono differenti. Il primo modo è a regime di rotazione minimo seguito da quattro modi a regime basso, da quattro modi a regime intermedio con carichi differenziati e, infine, da quattro modi a regime di rotazione elevato. Il carico assegnato a ciascun modo è una frazione percentuale della potenza massima erogata dal propulsore a quel regime di moto. La potenza massima viene erogata alla massima mandata della pompa di iniezione.

Il ciclo operativo della prova ISO 8178C è praticamente simile a quello delle prove ECE R49 ed ESC, differendo per il numero di punti di funzionamento a regime stazionario e per i fattori peso da attribuire a ciascun modo di funzionamento.

Gli schemi operativi del ciclo di prova ECE R49 e del ciclo ESC sono riportati in Fig. 1.

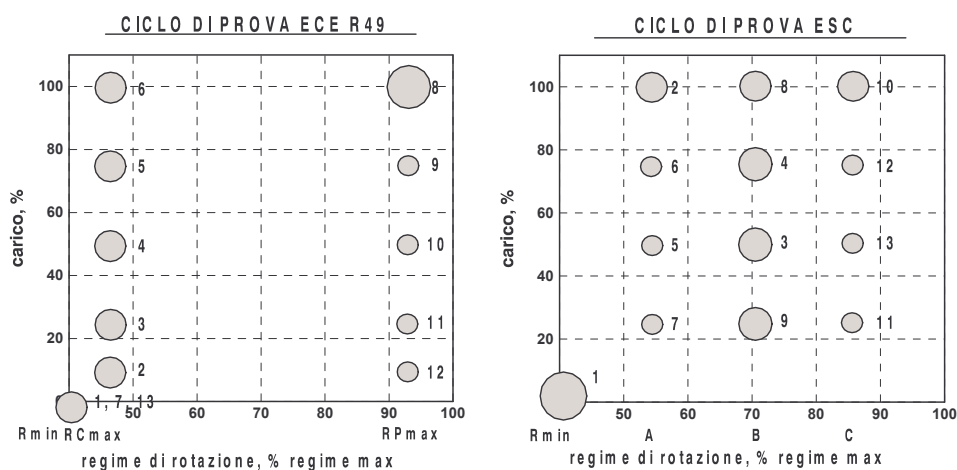


Fig. 1 – Cicli di prova ECE R49 e ESC per la determinazione delle emissioni di un motore diesel tipo HD (*heavy-duty*)

Le prove ETC e DUB prescrivono la misura delle emissioni con il propulsore funzionante secondo un ciclo di funzionamento a regimi di velocità di rotazione/carico variabili istante per istante. Il ciclo standard ETC è stato sviluppato da FIGE (Aachen, Germania) sulla base del comportamento reale del motore equipaggiato sull'autoveicolo quando questo circola su strada in ambiente urbano ed extra urbano. Esso, infatti, consta

di tre parti che rappresentano rispettivamente condizioni di guida in città, fuori città e autostrada. Il ciclo non convenzionale DUB è stato studiato in Germania per simulare condizioni più realistiche della circolazione di autobus in ambito urbano ed è, rispetto al ciclo standard ETC, più severo in termini di tempo speso a regimi di velocità più bassa.

Durante le prove, qualunque sia il ciclo di funzionamento a regimi stazionari adottato, vengono determinate le emissioni inquinanti regolamentate gassose (CO, THC, NOx) misurando con analizzatori automatici la concentrazione delle specie nei gas di scarico grezzi, previo condizionamento degli stessi, in ciascun modo di funzionamento. Il prelievo del particolato viene effettuato in un unico campionamento dei gas di scarico diluiti con aria mediante un campionatore CVS, in tempi proporzionali a fattori peso pre-stabiliti per ciascun modo dalla normativa di riferimento.

Al termine della prova le emissioni orarie di ogni specie regolamentata e del particolato e il consumo orario di combustibile sono mediati con i fattori peso attribuiti a ciascun modo di funzionamento del motore, rapportando il valore ottenuto alla potenza media erogata dal propulsore per esprimerli in termini di massa/kWh (emissioni e consumo specifici).

Nelle prove con cicli di funzionamento in transitorio, il livello medio delle emissioni orarie viene determinato come integrazione dei segnali di concentrazione degli analizzatori automatici nei gas di scarico diluiti col sistema di campionamento CVS, rapportando il risultato con la potenza media erogata nel corso del ciclo di funzionamento.

Nella maggior parte dei casi i combustibili emulsionati impiegati nelle prove erano costituiti da un gasolio a basso tenore di zolfo (< 50 mg/kg); soltanto in qualche caso è stato impiegato per la formulazione un gasolio con tenore di zolfo di 350 mg/kg. Come combustibile di riferimento è stato impiegato lo stesso gasolio utilizzato per la preparazione dell'emulsione. In nessuno dei documenti visionati sono stati riportati i valori delle caratteristiche chimico-fisiche dei combustibili di prova, a parte l'indicazione del contenuto di zolfo, del contenuto di acqua e di additivi emulsionanti nel gasolio.

Dato il minore contenuto energetico delle emulsioni rispetto al gasolio, le prestazioni (potenza, coppia erogate) del propulsore alimentato col combustibile innovativo risultano inferiori a parità di consumo di combustibile. Per svolgere prove comparative sul motore al banco-freno in modo corretto, ossia tenendo conto di questo effetto, è necessario che esse siano eseguite a parità di prestazioni, ossia a parità di potenza erogata in ciascuno dei modi del ciclo di prova (ECE R49, ESC, ecc.).

Nella pratica in quasi tutte le sperimentazioni le prove sono state svolte a parità di mandata di combustibile, ossia a parità di consumo orario e quindi in condizioni di potenza erogata differente in ciascun modo di funzionamento. In questa maniera i livelli di emissione misurati in ogni modo di funzionamento del motore alimentato con il gasolio erano superiori rispetto a quelli che si sarebbero rilevati a parità di potenza erogata quando era alimentato con l'emulsione.

Il confronto dei valori di emissione ottenuti con l'emulsione e col gasolio di riferimento a parità di mandata della pompa di iniezione non è rigoroso. Ciò nonostante i risultati ottenuti sono stati ritenuti accettabili in quanto riferiti a valori di emissione specifici, ossia rapportati alla potenza media erogata dal motore. Questa constatazione è supportata dai risultati praticamente equivalenti ottenuti in alcune prove ESC svolte con una delle emulsioni considerate in questo rapporto, tenendo conto dei due tipi di approccio. Esse

sono state indicate nelle tabelle e nel testo con le sigle SP e LP rispettivamente se svolte a parità di potenza o a parità di mandata (potenza ridotta). I risultati delle misure SP non si discostano significativamente, pur rilevandosi superiori, dai risultati LP.

Anche se in parte della documentazione consultata non sono stati riportati dati di precisione relativi alle misure di emissione e di consumo effettuate, è stato ritenuto che tutte le prove svolte nelle medesime condizioni operative dai laboratori che hanno eseguito le sperimentazioni siano state replicate almeno una volta per dare maggiore consistenza alla validità dei risultati sperimentali.

Nelle tabelle III a/b/c sono riassunti i valori del livello di emissione delle specie inquinanti regolamentate gassose, del particolato, della opacità dei gas di scarico e del consumo di combustibile determinati nelle sperimentazioni riportate nella documentazione bibliografica consultata.

Come è stato già affermato, non è significativo confrontare tra loro i valori di emissione e di consumo determinati da ogni gruppo di ricerca, in quanto i dati sperimentali sono influenzati dai tre fattori macroscopici citati prima: tipologia del propulsore (caratteristiche costruttive, assetto dei parametri di funzionamento, ecc.), procedura di prova (ossia severità delle condizioni di funzionamento del motore), combustibili impiegati (caratteristiche del gasolio di riferimento e formulazione delle emulsioni).

Risulta invece significativo valutare globalmente le variazioni percentuali del livello di emissione e di consumo determinate in ogni sperimentazione dalla sostituzione del gasolio con l'emulsione, essendo questi valori relativi.

Le variazioni delle emissioni determinate in ciascun programma sperimentale sono raccolte sistematicamente nelle tabelle IV a/b e presentate in forma grafica nei diagrammi della figura 2 per le emissioni degli ossidi di azoto (NO_x) e del particolato (TPM), e della figura 3 per le emissioni dell'ossido di carbonio (CO) e degli idrocarburi incombusti (HC).

La valutazione dell'insieme dei dati raccolti e l'esame dei diagrammi hanno evidenziato la difficoltà di separare i singoli effetti determinati sull'emissione delle quattro specie inquinanti dai tre parametri fondamentali: motore, tipo di prova e combustibile. Si può notare, comunque, la riduzione generalizzata dell'emissione di alcune specie inquinanti quando si utilizza l'emulsione.

Il congruo numero di dati prodotti nelle sperimentazioni consente di giungere a una valutazione globale sufficientemente attendibile sugli effetti immediati determinati dalle emulsioni sulle emissioni inquinanti regolamentate e, quindi, di esprimere un giudizio sul comportamento di questi combustibili nei motori.

I dati sperimentali sono stati aggregati e mediati tra loro per tipologia di prova, parametro ritenuto maggiormente influente sulle emissioni, per individuare il livello di variazione delle quattro specie inquinanti regolamentate quando il motore era alimentato con l'emulsione acqua/gasolio in sostituzione del combustibile di riferimento.

I valori medi delle differenze del livello di emissione, calcolati in funzione del ciclo di prova, sono presentati sinteticamente nella tabella V. Nella stessa tabella sono stati riportati anche i valori medi globali delle differenze percentuali delle emissioni, calcolati

Tabella IIIa

PROVE SU MOTORE													
LIVELLO DI EMISSIONE E CONSUMO													
N. doc.	MOTORE	CARATT. COSTR.	STADIO OMOL.	TIPO PROVA	N° REPL	COMBUST.	Acqua % m	CO	THC	NOx	TPM	opacit	cons.
								g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	m ⁻¹	g/kWh
[1]	Renault VI 620-45	6 cil - 9.8 L TC	Euro 1	ECE R49 (LP)	n.r.	Gasolio (500S)	-	0,137	0,6	9,15	-	1,42	204,9
						Aquazole	13	0,116	0,56	7,8	-	0,45	201,3
			Euro 2	ECE R49 (LP)	n.r.	Gasolio (500S)	-	0,084	0,53	6,58	-	0,39	217,7
						Aquazole	13	0,076	0,51	5,43	-	0,18	215,2
			Euro 3	ESC (LP)	n.r.	Gasolio (30S)	-	0,55	0,39	6,78	0,084	0,71	-
						Aquazole	13	0,49	0,34	5,85	0,05	0,24	-
[10]	Renault MIDR 65045.141	6 cil - 10 L TC-IC	Euro 2	ESC (LP) ELR	2	Gasolio	-	0,4	0,33	6,81	0,06	0,66	-
						Aquazole	13	0,41	0,33	5,84	0,056	0,3	-
[11B]	Cummins B235	6 cil - 5.9 L TC-IC	Euro 2	ECE R49 (LP)	n.r.	ULSD (38S)	-	0,45	0,27	6,24	0,082	-	-
						PuriNox 10E	10	0,55	0,43	5,79	0,08	-	-
[11B]	Cummins B235	6 cil - 5.9 L TC-IC	Euro 2	ETC	n.r.	ULSD (38S)	-	0,75	0,32	5,87	0,111	-	-
						PuriNox 10E	10	0,76	0,54	5,36	0,101	-	-
[11C]	Liebherr D914 T	4 cil - 6.1 L TC	prEuro 1	ISO 8178C (LP)	n.r.	ULSD (32S)	-	0,4	0,2	14	0,11	-	-
						PuriNox 13E	13	0,25	0,25	12,9	0,05	-	-
[11D]	Perkins 1004.4T	4 cil - 4.0 L TC	Euro 1	ISO 8178C (LP)	n.r.	ULSD (32S)	-	0,68	0,35	7,23	0,24	-	-
						PuriNox 10E	10	0,66	0,62	6,47	0,17	-	-
						PuriNox 20E	20	0,67	0,64	5,73	0,14	-	-
[11D]	Perkins 1004.4T	4 cil - 4.0 L TC	Euro 1	ETC	n.r.	ULSD (32S)	-	0,75	0,38	8,31	0,21	-	-
						PuriNox 10E	10	0,8	0,75	7,14	0,18	-	-
						PuriNox 20E	20	0,94	0,77	6,09	0,16	-	-
[12]	DAF RS 200M	6 cil - 8.6 L DI - TD-IC	Euro 2	DUB	3	ULSD (50S)	-	1,58	0,44	7,61	0,215	-	-
				PuriNox	12	1,12	0,57	6,53	0,143	-	-		
			ETC	3	ULSD (50S)	-	1,62	0,47	7,08	0,206	-	-	
					PuriNox	12	1,25	0,63	6,01	0,132	-	-	

n.r. = non riportato nel documento consultato

xxxS = contenuto di zolfo (mg/kg)

Tabella IIIb

PROVE SU MOTORE													
LIVELLO DI EMISSIONE E CONSUMO													
N. doc.	MOTORE	CARATT. COSTR.	STADIO OMOL.	TIPO PROVA	N° REPL	COMBUST.	Acqua % m	CO	THC	NOx	TPM	opacit	cons.
								g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	m ⁻¹	g/kWh
[13A]	Ricardo Proteus	Monocil. 2.1 L DI – TC	prEuro 1	ECE R49 (LP)	5	Gasolio EN590 (350S)	-	12	0,42	11,9	0,46	-	241,3
						GECAM	12	6,4	0,53	11,9	0,35	-	229,3
			Euro 1	ECE R49 (LP)	5	Gasolio EN590 (350S)	-	2,31	0,32	7,82	0,18	-	230,4
						GECAM	12	1,46	0,38	7,65	0,1	-	223,5
			Euro 2	ECE R49 (LP)	5	Gasolio EN590 (350S)	-	0,98	0,22	6,9	0,13	-	228,1
						GECAM	12	1	0,27	6,4	0,11	-	222,1
[13B]	VM Sun 6105T	6 cil – 6 L TC	prEuro 1	ISO 8178 C1 (LP)	3	Gasolio EN590 (350S)	-	2	0,27	7,7	0,46	-	-
						GECAM	12	2	0,29	6,6	0,29	-	-
[13C]	Liebherr D914 T	4 cil – 6.1 L TC	prEuro 1	ISO 8178 C1 (LP)	2	Gasolio (50S)	12	0,37	0,21	13	0,093	95%	-
						GECAM (50S)	12	0,26	0,3	11,1	0,051	75%	-
[13D]	Iveco F2B UTAC	6 cil – 7.9 L TC 259 kW	Euro 3	ESC/ELR (SP)	n.r.	Gasolio	-	0,59	0,14	4,79	0,61	0,189	209
						GECAM	12	0,41	0,16	4,48	0,038	0,023	229
[13H]	Iveco F2B ARBON	6 cil – 7.9 L TC 228 kW	Euro 3	ESC (LP)	2	Gasolio (7S)	-	0,81	0,24	4,69	0,063	-	-
						GECAM (7S)	12	0,68	0,25	4,42	0,027	-	-
			Euro 3	ESC (SP)	2	Gasolio (7S)	-	0,81	0,24	4,69	0,063	-	-
						GECAM (7S)	12	0,67	0,20	4,35	0,031	-	-

n.r. = non riportato nel documento consultato

xxxS = contenuto di zolfo (mg/kg)

Tabella IIIc

PROVE SU MOTORE													
LIVELLO DI EMISSIONE E CONSUMO													
N. doc.	MOTORE	CARATT. COSTR.	STADIO OMOL.	TIPO PROVA	N° REPL	COMBUST.	Acqua % m	CO	THC	NOx	TPM	opacit	cons.
								g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	m ⁻¹	g/kWh
[13E]	Deutz BF4M1013 FC	4 cil- 4,76 L TC	Euro 2	ECE R49 (LP)	3	Gasolio	-	0,64	0,27	5,9	0,095	-	-
						GECAM	12	0,59	0,35	5,2	0,02	-	-
				ECE R49 (SP)	3	Gasolio	-	0,64	0,27	5,9	0,095	-	-
						GECAM	12	0,68	0,40	5,2	0,04	-	-
[13G]	Deutz BF4M1013 FC	4 cil- 4,76 L TC	Euro 3	ESC (LP)	3	Gasolio (50S)	-	0,74	0,26	5,0	0,022	-	230,0
						GECAM	12	0,93	0,27	4,6	0,009	-	231,0
[13F]	MAN D2866LF28	6 cil- 11,7 L TC	Euro 3	ESC (SP)	3	Gasolio	-	-	-	4,98	0,054	-	211,0
						GECAM	12	-	-	4,45	0,034	-	226,0
	MAN D0834LFL03	4 cil - 4,9 L TC	Euro 3	ESC (LP)	3	Gasolio	-	-	-	4,98	0,070	-	218,7
						GECAM	12	-	-	4,89	0,052	-	234,0
	MAN D0836LUH15	6 cil - 7 L TC	Euro 3	ESC (LP)	3	Gasolio	-	0,70	0,04	4,50	0,092	-	210,7
						GECAM	12	0,60	0,05	4,26	0,050	-	237,6
				ESC (SP)	3	Gasolio	-	0,70	0,04	4,50	0,092	-	-
						GECAM	12	0,56	0,05	4,19	0,050	-	-
[13IL]	SCANIA DC 903	6 cil - 9 L TC	Euro 3	ESC (SP)	2	Gasolio (50S)	-	0,64	0,33	4,85	0,087	-	-
						GECAM (50S)	12	0,15	0,12	4,37	0,041	-	-

xxxS = contenuto di zolfo (mg/kg)

Tabella IVa

PROVE SU MOTORE													
VARIAZIONE % DEL LIVELLO DI EMISSIONE E DI CONSUMO													
N. doc.	MOTORE	CARATT. COSTR.	STADIO OMOL	TIPO PROVA	COMBUSTIBILE		Acqua % m	CO	THC	NOx	TPM	opacit	cons.
					RIFER.	EMULS.							
[1]	Renault VI 620-45	6 cil – 9.8 L TC	Euro 1	ECE R49	G (500S)	Aquazole	13	-15,3	-6,7	-14,8	-	-68,3	-1,8
			Euro 2	ECE R49	G (500S)	Aquazole	13	-9,5	-3,8	-17,4	-	-53,8	-1,1
			Euro 3	ESC	ULSD (30S)	Aquazole	13	-10,9	-12,8	-13,7	-40,5	-66,2	-
[10]	Renault MIDR 65045.141	6 cil – 10 L TC-IC	Euro 2	ESC/ELR	G	Aquazole	13	n.s.	n.s.	-14,2	-6,7	-54,5	-
[11B]	Cummins B235	6 cil – 5.9 L TC-IC	Euro 2	ECE R49	ULSD (38S)	PuriNox 10E	10	n.s.	57	-7,2	-2	-	-
				ETC	ULSD (38S)	PuriNox 10E	10	n.s.	68	-8,7	-9	-	-
[11C]	Liebherr D914 T	4 cil – 6.1 L TC	prEuro 1	ISO 8178C	ULSD (32S)	PuriNox 13E	13	-37,5	25	-8,3	-55	-	-
[11D]	Perkins 1004.4T	4 cil – 4.0 L TC	Euro 1	ISO 8178C	ULSD (32S)	PuriNox 10E	10	-4	72	-10,4	-28	-	-
				ETC	ULSD (32S)	PuriNox 10E	10	+7,3	100	-14	-15	-	-
				ISO 8178C	ULSD (32S)	PuriNox 20E	20	-1	85	-20,7	-39	-	-
				ETC	ULSD (32S)	PuriNox 20E	20	25	106	-26,7	-23,7	-	-
[12]	DAF RS 200M	6 cil – 8.65 L DI – TD-IC	Euro 2	DUB	ULSD (50S)	PuriNox	12	-29	29,5	-14,2	-33,5	-	-
				ETC	ULSD (50S)	PuriNox	12	-23	34	-15,1	-35,9	-	-
[13A]	Ricardo Proteus	Monocil. 2.1 L DI – TC	prEuro 1	ECE R49	G (350S)	GECAM	12	-47	26	n.s.	-24	-	-5,0
			Euro 1	ECE R49	G (350S)	GECAM	12	-37	29	-2	-44	-	-3,0
			Euro 2	ECE R49	G (350S)	GECAM	12	2	23	-7	-15	-	-2,6
[13B]	VM Sun 6105T	6 cil – 6 L TC	prEuro 1	ISO 8178C1	G (350S)	GECAM	12	n.s.	7	-15	-35	-	-
[13C]	Liebherr D914 T	4 cil – 6.1 L TC	prEuro 1	ISO 8178C1	ULSD	GECAM	12	-31	47	-7	-45	-	-

n.s. = non significativa

xxxS = contenuto di zolfo (mg/kg)

Tabella IVb

PROVE SU MOTORE													
VARIAZIONE % DEL LIVELLO DI EMISSIONE E DI CONSUMO													
N. doc.	MOTORE	CARATT. COSTR.	STADIO OMOL	TIPO PROVA	COMBUSTIBILE		Acqua % m	CO	THC	NOx	TPM	opacit	cons.
					RIFER.	EMULS.							
[13D]	Iveco F2B UTAC	6 cil – 7.9 L TC 259 kW	Euro 3	ESC/ELR (SP)	G	GECAM	12	-30	14	-7	-38	-88%	9,6
[13H]	Iveco F2B ARBON	6 cil – 7.9L TC 228 kW	Euro 3	ESC (LP)	G (7S)	GECAM	12	-15	4	-7	-58	-	-
				ESC (SP)				-16	-15	-9	-51	-	-
[13E] [13G]	Deutz BF4M1013 FC	4 cil – 4.76 L TC	Euro 2	ECE R49 (LP)	G	GECAM	12	-6	30	-13	-80	-	-
				ECE R49 (SP)				7	40	-11	-58	-	-
			Euro 3	ESC (LP)				25	4	-9	-59	-	0,4
[13F]	MAN D2866LF28	6 cil – 11.7 L TC	Euro 3	ESC (SP)	G	GECAM	12	-	-	-11	-37	-	7,1
	MAN D0834LFL03	4 cil – 4.9 L TC	Euro 3	ESC (LP)	G	GECAM	12	-	-	-2	-26	-	7,0
	MAN D0836LUH15	6 cil – 7 L TC	Euro 3	ESC (LP)	G	GECAM	12	-14	25	-5	-46	-	12,8
				ESC (SP)				-20	25	-6	-46	-	-
[13L]	SCANIA DC 903	6 cil – 9 L TC	Euro 3	ESC (SP)	G (50S)	GECAM	12	-	-	-10	-53	-	-

xxxS = contenuto di zolfo (mg/kg)

PROVE SU MOTORE

Variazione con riferimento alla tipologia di prova

■ ECE R49
 ■ ESC
 ■ ETC
 ■ ISO 8175
 ■ DUB

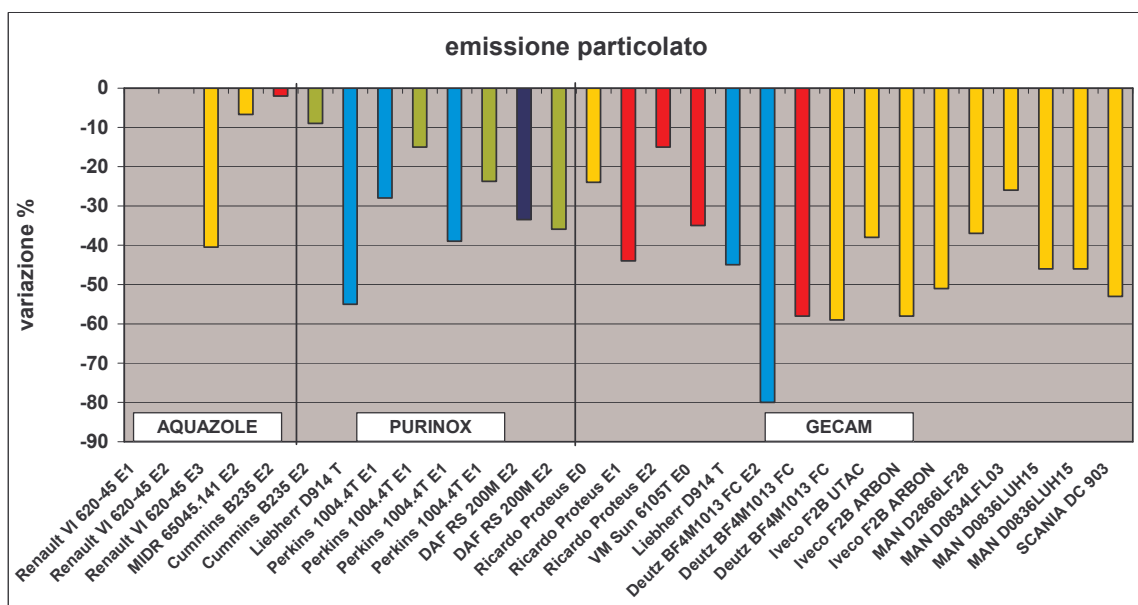
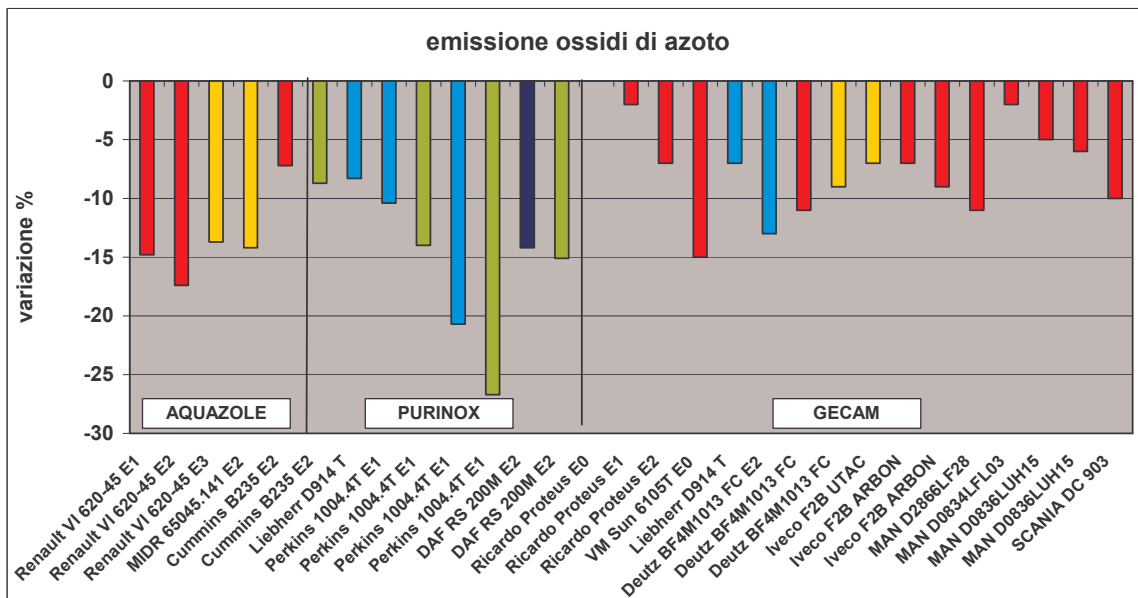


Fig. 2 – Variazione del livello di emissione degli ossidi di azoto e del particolato nei gas di scarico di motori diesel HD alimentati con emulsioni, riferita al gasolio convenzionale

PROVE SU MOTORE

Variazione con riferimento alla tipologia di prova

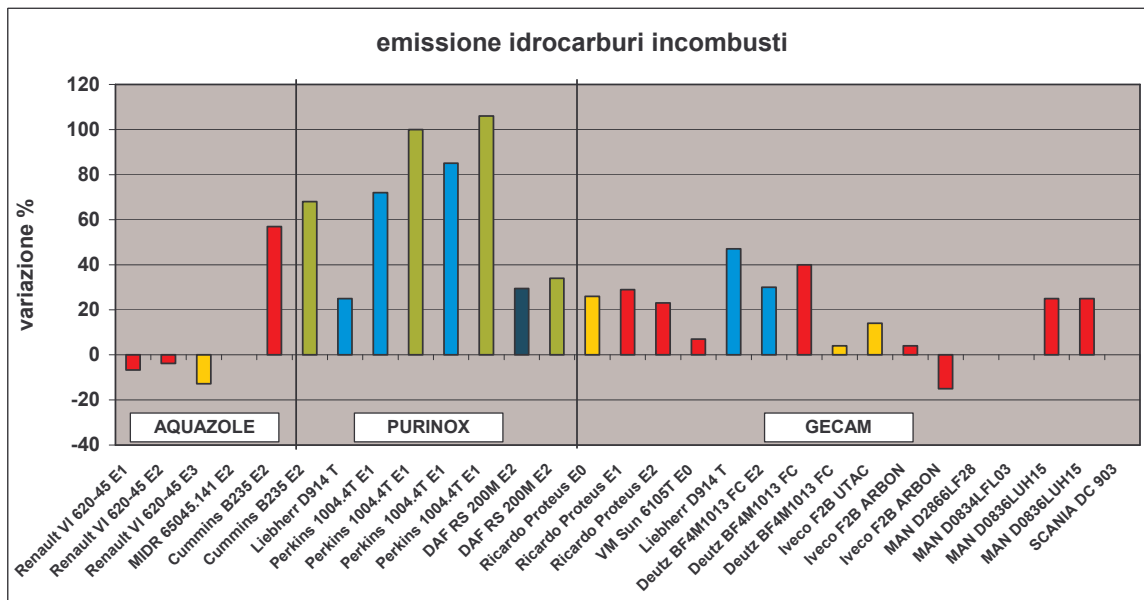
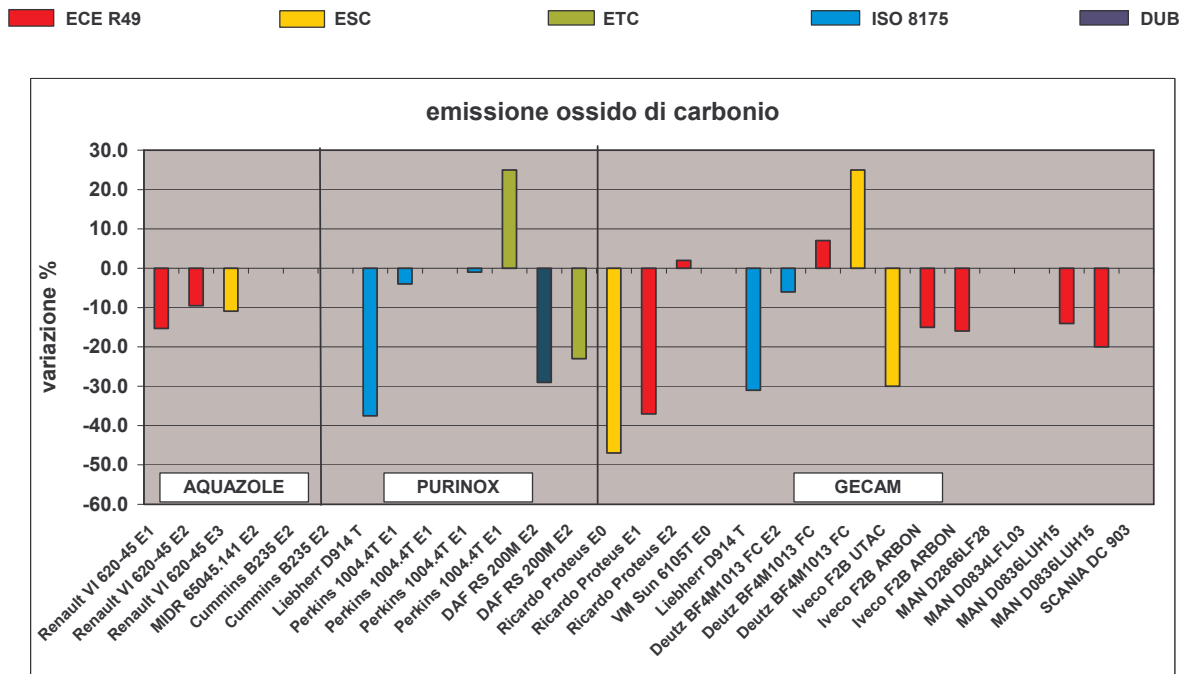


Fig. 3 – Variazione del livello di emissione dell’ossido di carbonio e degli idrocarburi incombusti nei gas di scarico di motori diesel HD alimentati con emulsioni, riferita al gasolio convenzionale

Tabella V

Variazione media percentuale del livello di emissione di motori diesel HD determinata dalla sostituzione del gasolio convenzionale con le emulsioni acqua/gasolio

<i>CICLO</i>	N. test	NOx	N. test	TPM	N. test	CO	N. test	THC
<i>ECE R49</i>	8	-9,1	6	-37,2	7	-15,1	8	24,3
<i>ESC (LP)</i>	6	-8,5	6	-39,4	4	-3,7	4	5,1
<i>ESC (SP)</i>	5	-8,6	5	-45,0	4	-22,0	3	8,0
<i>ISO 8178</i>	5	-12,3	5	-40,4	5	-14,7	5	47,2
<i>ETC</i>	4	-16,1	4	-20,9	3	1,0	4	77,0
<i>DUB</i>	1	-14,2	1	-33,5	1	-29,0	1	29,5
<i>media</i>	29	-11,5	27	-36,1	24	-13,9	25	31,8

tenendo conto dei dati di tutti i tipi di prova, e il numero dei test eseguiti per ciascuna tipologia di prova, come indice di attendibilità dei risultati conseguiti.

Dall'esame dei dati riportati nelle tabelle IV a/b e V si deduce che l'impiego delle emulsioni nei motori ha determinato:

- una riduzione dell'emissione degli ossidi di azoto (NOx) variabile in un intervallo di valori tra 0% e - 27%, con un valore medio calcolato su tutti i dati raccolti pari a circa **-11,5%**
- una riduzione dell'emissione del particolato totale (TPM) compresa in un intervallo di valori tra - 2% e - 80%, con un valore medio su tutti i dati raccolti di **-36,1%**
- una tendenza verso una diminuzione dell'emissione dell'ossido di carbonio (CO), con un valore medio globale di **-13,9%**
- una tendenza verso un incremento dell'emissione degli idrocarburi incombusti (HC), talvolta con valori elevati (media di **+31,8%**).

Inoltre, è stato interessante rilevare come l'impiego delle emulsioni rispetto al gasolio abbia determinato livelli di emissione degli ossidi di azoto e del particolato notevolmente inferiori ai valori limite di omologazione imposti dalle Direttive comunitarie. L'effetto è ben manifestato nel caso dei propulsori Euro 3, per i quali la Direttiva 99/96/CE impone limiti nettamente più bassi rispetto a quelli dei precedenti stadi di omologazione Euro 0, Euro 1 ed Euro 2.

Anche i livelli di emissione di ossido di carbonio e di idrocarburi incombusti sono rimasti sempre inferiori ai valori limite di omologazione di almeno il 60%, indipendentemente dal combustibile utilizzato.

Questo aspetto è messo in evidenza nella tabella VI, dove sono confrontati i valori medi delle emissioni regolamentate registrati nelle prove ECE R49 svolte su propulsori Euro 2 (Dir. 91/542/CEE) e nelle prove ESC (Dir. 99/96/CE) su motori Euro 3 alimentati con i gasoli di riferimento e con le emulsioni. I valori riportati devono essere intesi come emissioni medie del campione di propulsori di una determinata categoria omologativa.

Una valutazione degli effetti provocati sull'opacità dei gas di scarico dall'impiego delle emulsioni nei propulsori è poco attendibile per il numero limitato delle misure disponibili. I pochi dati raccolti riflettono la stessa tendenza osservata per l'emissione del particolato, ossia una riduzione sensibile quando il motore era alimentato con l'emulsione al posto del gasolio di riferimento.

Tabella VI

Livello medio di emissione delle specie inquinanti regolamentate di motori diesel HD Euro 2 ed Euro 3 e sua variazione percentuale rispetto ai corrispondenti limiti di omologazione, valutata con l'impiego delle emulsioni e del gasolio convenzionale

Emissione	CO	HC	NOx	TPM		CO	HC	NOx	TPM
Prova	ECE R49					ESC			
<i>u.m.</i>	<i>g/kWh</i>					<i>g/kWh</i>			
LIMITI Euro 2	4,0	1,1	7,0	0,15	LIMITI Euro 3	2,1	0,7	5,0	0,10
ECE (G)	0,54	0,32	6,41	0,10	ESC (G)	0,63	0,23	4,79	0,062
$\Delta\%$	-86,5	-70,7	-8,5	-31,8	$\Delta\%$	-69,9	-64,6	-4,2	-38,4
ECE (EM)	0,55	0,39	5,71	0,07	ESC (LP)	0,62	0,21	4,75	0,038
$\Delta\%$	-86,2	-64,5	-18,5	-53,3	$\Delta\%$	-70,4	-67,6	-5,0	-62,3
					ESC (SP)	0,41	0,12	4,34	0,039
					$\Delta\%$	-80,3	-81,3	-13,2	-61,0

3.2. Comportamento delle emulsioni in prove su autoveicolo

Sono stati raccolti ed esaminati i dati di emissione e di consumo rilevati in otto sperimentazioni svolte in condizioni di simulazione di percorso su quattro autobus urbani di modello differente.

Come per le indagini svolte su motore al banco-freno, ogni sperimentazione è stata eseguita alimentando il veicolo con un'emulsione acqua/gasolio e ripetendo le prove nelle medesime condizioni operative con un gasolio convenzionale o a basso tenore di zolfo, preso come combustibile di riferimento.

La tabella VII riporta la ripartizione delle prove in funzione del tipo di ciclo di funzionamento del veicolo e del tipo di emulsione acqua/gasolio.

Tabella VII
Distribuzione del numero di test tra le diverse tipologie di prova e di emulsioni

TIPO PROVA	<i>AQUAZOLE</i>	<i>GECAM</i>	<i>PURINOX</i>	<i>totale</i>
MLTB	2	-	4	6
ATM 61	-	2	-	2
<i>totale</i>	2	2	4	8

I dati di emissione in ogni sperimentazione svolta sono differenti per la diversità dei veicoli provati, delle procedure di prova adottate, e per il tipo di combustibili impiegati. Essi non possono essere direttamente confrontati tra loro poiché ottenuti in condizioni sperimentali diverse.

Il modello di autoveicolo pesante provato più frequentemente è stato il bus urbano Volvo Olympian equipaggiato con un motore 6 cilindri turbocompresso da 5,9 l di cilindrata. Gli altri veicoli pesanti sono stati un bus Dennis Dart con motore Cummins da 5,9 l di cilindrata e l'Iveco Cityclass con motore Cursor turbocompresso. I motori equipaggiati su questi autoveicoli erano in parte omologati con riferimento alla classe omologativa Euro 2, in parte alla Euro 3 e solo in un caso (bus Demis Dart) pre-Euro 1.

Tutti gli autoveicoli sono stati sottoposti a prove di emissione secondo procedure che, sotto l'aspetto della tipologia delle apparecchiature impiegate e delle modalità di campionamento e di analisi degli inquinanti, risultano simili a quelle impiegate per l'omologazione degli autoveicoli leggeri.

Una prova svolta in simulazione di percorso consiste nel guidare l'autoveicolo in marcia simulata su un banco dinamometrico a rulli, opportunamente tarato per tenere conto delle resistenze passive incontrate su strada, secondo un ciclo di guida prestabilito. Durante l'esecuzione del ciclo vengono campionati i gas di scarico e viene misurato il consumo di combustibile. Al termine della prova i gas campionati vengono analizzati per misurare la concentrazione delle specie inquinanti. Da questi valori vengono calcolate le emissioni medie in massa riferite all'unità di lunghezza di percorso svolto con il ciclo di guida impiegato (massa/km).

In mancanza di un ciclo di guida standard per gli autoveicoli pesanti, sono stati adottati cicli di guida “reali”, sviluppati per simulare sul banco dinamometrico condizioni di funzionamento effettivo del bus in un’area urbana tipica, come quella della città di Milano (linea urbana 61) e della città di Londra (ciclo Millbrook). A differenza delle prove su motore al banco-freno, le prove svolte sul banco a rulli richiedono una procedura di esecuzione più complessa, ma sono più rappresentative delle condizioni reali del funzionamento dell’autoveicolo su strada.

Nelle figure 4 e 5 sono riportati i cicli di guida non standard ATM 61 e Millbrook adottati in tutte le sperimentazioni riportate nella documentazione consultata.

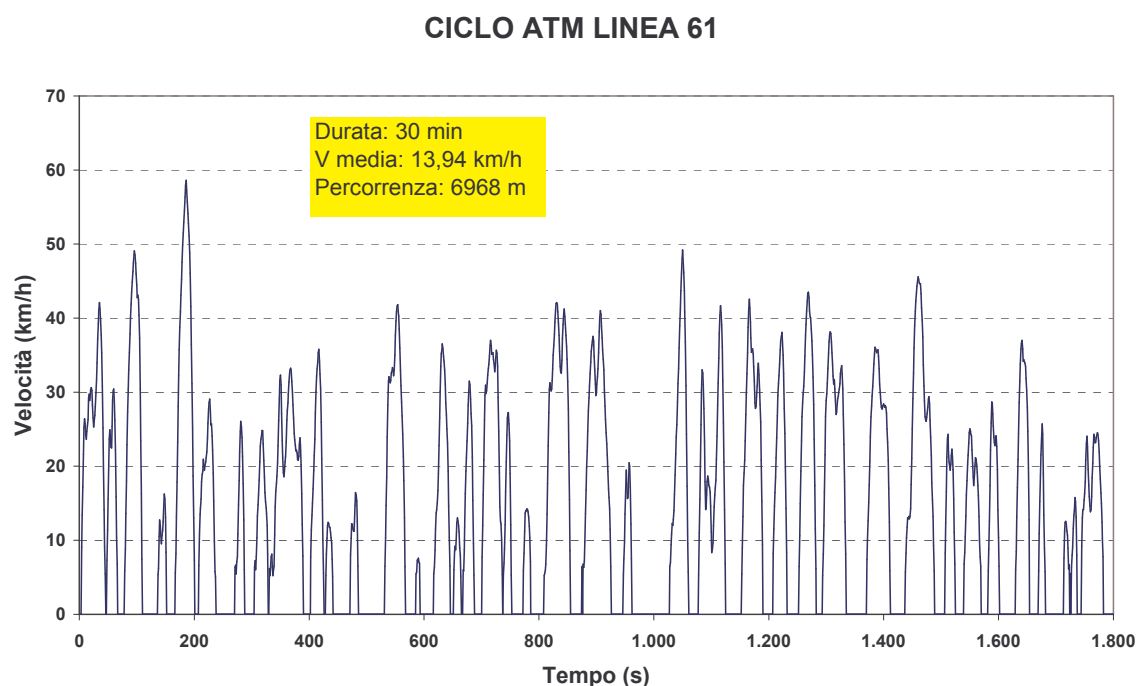


Fig. 4 – Ciclo di guida ATM 61

La severità del ciclo di guida è descritta in termini di frequenza delle fasi di accelerazione e delle fasi di regime minimo (sosta), oltre che dai valori della velocità media e della velocità massima raggiunta dall’autoveicolo in prova. Queste condizioni, infatti, si riflettono sulle prestazioni richieste dal motore (carico e regime di rotazione) istante per istante.

Cicli di guida differenti, pertanto, determinano livelli di emissione differenti e per tale motivo misure di emissione effettuate con cicli di guida differenti non possono essere confrontate tra loro.

Come nei programmi sperimentali eseguiti su motore al banco-freno, anche per le prove comparative sull’autoveicolo sono stati scelti come riferimento i combustibili a basso tenore di zolfo (< 50 mg/kg) che costituivano la base impiegata per la preparazione delle emulsioni. Solo in un caso è stato impiegato un gasolio con un livello di zolfo superiore a 500 mg/kg.

MILLBROOK LONDON TRANSPORT BUS CYCLE (MLTB)

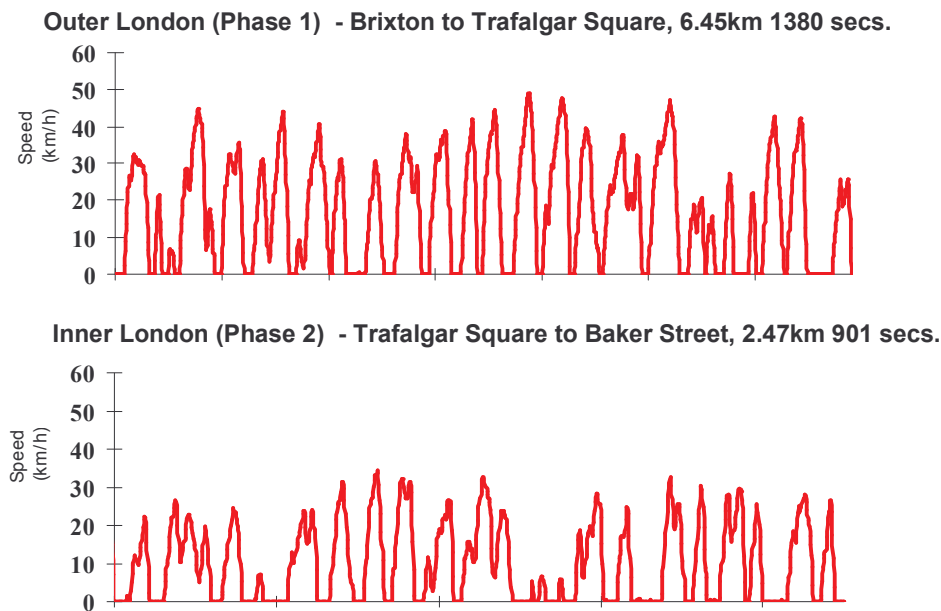


Fig. 5 – Ciclo di guida Millbrook (Londra)

Il contenuto di acqua delle emulsioni era differente da una sperimentazione all'altra, ma compreso tra un minimo di 9% e un massimo del 20% vol.

I dati del livello di emissione delle specie inquinanti regolamentate gassose e del particolato e le misure di consumo di combustibile, rilevati nelle sperimentazioni riportate nella documentazione bibliografica consultata, sono presentati nella tabella VIII. Nella sperimentazione descritta in [1] sono state effettuate anche misure di opacità dei gas di scarico in accelerazione libera.

Come già osservato per le prove su motore, non è significativo il confronto diretto dei valori di emissione e di consumo di combustibile determinati da ogni gruppo di ricerca, perché le prove sono state effettuate in condizioni sperimentali differenti. La differenza dei dati di emissione e di consumo, impiegando lo stesso tipo di combustibile, è determinata dalla tipologia del propulsore (caratteristiche costruttive, assetto dei parametri di funzionamento, ecc.) del veicolo in prova e dal ciclo di guida impiegato (ossia dalla severità delle condizioni di esercizio del veicolo in marcia simulata sul banco dinamometrico a rulli).

Tabella VIII

PROVE SU AUTOVEICOLO													
LIVELLO EMISSIONI E CONSUMO													
N. doc.	AUTO-VEICOLO	CARATT. COSTR. MOTORE	STADIO OMOL.	TIPO PROVA	COMBU-STIBILE	Acqua % m	CO	THC	NOx	TPM	opacit	cons.	
							g/km	g/km	g/km	g/km	m ⁻¹	l/100km	
[1]	Dennis Dart (Cummins B5)	6 cil – 5.9 L OxyCat	prEuro 1	Millbrook MLTB	G (500S)	-	0,43	1,34	13,8	0,770	1,47	33,2	
						Aquazole	13	0,26	1,21	11,2	0,330	0,74	37,2
[1]	Volvo Olympian	6 cil – 9.6 L TC	Euro 2	Millbrook MLTB	G (30S)	-	1,48	0,69	11,8	0,179	-	53,2	
						Aquazole	13	1,64	0,72	11,4	0,149	-	59,6
[11°]	Volvo Olympian	6 cil – 9.6 L TC	Euro 2	Millbrook MLTB	ULSD (32S)	-	1,52	0,65	14,0	0,182	-	54,1	
						PuriNox	10	1,59	0,67	12,7	0,146	-	58,4
						PuriNox	20	1,59	0,58	11,5	0,103	-	61,3
[12]	Volvo Olympian	6 cil – 9.6 L TC OxyCat	Euro 2	Millbrook MLTB	ULSD (32S)	-	0,05	0,05	13,9	0,142	-	54,1	
						PuriNox	10	0,08	0,07	12,0	0,093	-	58,4
						PuriNox	20	0,05	0,06	11,1	0,055	-	61,3
[14]	IVECO Cityclass 491 F2B Cursor 8	6 cil – 7.8 L TC	Euro 3	ATM 61	G (ULSD)	-	4,95	0,815	17,9	0,315	-	55,9	
						GECAM	12	2,89	0,794	17,0	0,139	-	60,2
						GECAM	9	3,57	0,831	16,8	0,193	-	58,2

xxxS = contenuto di zolfo (mg/kg)

Viceversa, la valutazione globale degli effetti determinati in tutte le sperimentazioni, eseguita confrontando le misure ottenute prima e dopo aver sostituito il gasolio convenzionale con l'emulsione, espressa in termini di variazione percentuale del livello di emissione e di consumo, risulta significativa in quanto le variazioni di questi parametri sono valori relativi.

Nella tabella IX è presentato il quadro riassuntivo delle variazioni dei valori di emissione determinate dalla sostituzione del gasolio con le emulsioni in ciascun programma sperimentale. Gli stessi valori sono presentati in forma grafica nei diagrammi nella figura 6 per le emissioni degli ossidi di azoto e del particolato totale e nella figura 7 per le emissioni dell'ossido di carbonio e degli idrocarburi incombusti.

Sebbene i dati raccolti siano numericamente inferiori a quelli ottenuti nelle prove su motore al banco-freno esaminate, una valutazione di carattere generale ha indicato la tendenza verso la riduzione dell'emissione delle specie regolamentate più importanti, cioè gli ossidi di azoto e il particolato. Questi risultati, relativi alle prove su autobus, confermano quanto già è stato osservato con le prove svolte sui motori al banco-freno.

Per meglio mettere in evidenza gli effetti determinati dall'uso delle emulsioni sull'emissione delle quattro specie inquinanti regolamentate, i risultati sperimentali delle prove sugli autobus sono stati raccolti in funzione del ciclo di guida, ritenuto il parametro più importante, e sono stati elaborati per avere un valore medio. Il quadro riassuntivo dei dati elaborati è presentato nella tabella X, in cui è stato riportato anche il numero dei test eseguiti, come indice di attendibilità dei valori medi calcolati, e i valori medi globali della variazione delle emissioni valutati su tutti i dati disponibili, ossia riferiti a tutti i cicli di guida impiegati.

L'esame dei dati riportati nella tabella VIII mette in rilievo che la sostituzione del gasolio convenzionale con l'emulsione ha determinato:

- una diminuzione dell'emissione degli ossidi di azoto variabile in un intervallo di valori da -3,4% a -20% circa, con un valore medio calcolato sull'insieme dei dati raccolti di circa **-12%**
- una riduzione dell'emissione del particolato totale compresa in un intervallo di valori tra -17% e -61%, e un valore medio globale, calcolato su tutti i tre cicli di prova, di circa **-41%**.

Per quanto riguarda la variazione dell'emissione dell'ossido di carbonio e degli idrocarburi incombusti, non è possibile stimare l'effetto dell'emulsione, in quanto i pochi risultati disponibili hanno indicato talvolta un incremento e talvolta una diminuzione di queste specie inquinanti nei gas di scarico. Non è risultato chiaro se il differente comportamento delle emulsioni tra una sperimentazione e l'altra sia stato determinato dal ciclo di guida, dal veicolo provato, oppure dal tipo di emulsione impiegata.

Anche se non è stato possibile individuare una tendenza univoca dell'emissione di queste due specie inquinanti quando l'autoveicolo era alimentato con l'emulsione in sostituzione del gasolio, i valori medi globali delle variazioni, calcolati con tutti i dati disponibili, hanno indicato una riduzione dell'emissione dell'ossido di carbonio e un incremento poco significativo dell'emissione degli idrocarburi incombusti.

Tabella IX

PROVE SU AUTOVEICOLO													
VARIAZIONE % LIVELLO EMISSIONI E CONSUMO													
N. doc.	AUTO-VEICOLO	CARATT. COSTR. MOTORE	STADIO OMOL	TIPO PROVA	COMBUSTIBILE		Acqua % m	CO	THC	NOx	TPM	opacit	cons.
					RIFER.	EMULS.							
[1]	Dennis Dart Cat	6 cil – 5.9 L OxyCat	prEuro 1	Millbrook MLTB	G (500S)	Aquazole	13	-39,5	-9,7	-18,8	-57,1	-72,8	12,0
[1]	Volvo Olympian	6 cil – 9.6 L TC	Euro 2	Millbrook MLTB	G (30S)	Aquazole	13	17,1	4,3	-3,4	-16,8	-	12,0
[11A]	Volvo Olympian	6 cil – 5.9 L TC	Euro 2	Millbrook MLTB	ULSD (32S)	PuriNox	10	4,6	3,1	-9,0	-19,8	-	7,9
						PuriNox	20	4,6	-10,8	-18,1	-43,4	-	13,3
[12]	Volvo Olympian	6 cil – 9.6 L TC OxyCat	Euro 2	Millbrook MLTB	ULSD (32S)	PuriNox	10	60,0	40,0	-13,9	-34,5	-	7,9
						PuriNox	20	0,0	20,0	-20,3	-61,3	-	13,3
[14]	IVECO Cityclass 491 F2B Cursor 8	6 cil – 7.8 L TC	Euro 3	ATM 61	G (ULSD)	GECAM	12	-41,6	-2,6	-5,0	-55,9	-	7,7
						GECAM	9	-27,9	-2,0	-6,1	-38,7	-	4,1

xxxS = contenuto di zolfo (mg/kg)

PROVE SU AUTOVEICOLO

Variazione con riferimento alla tipologia di prova

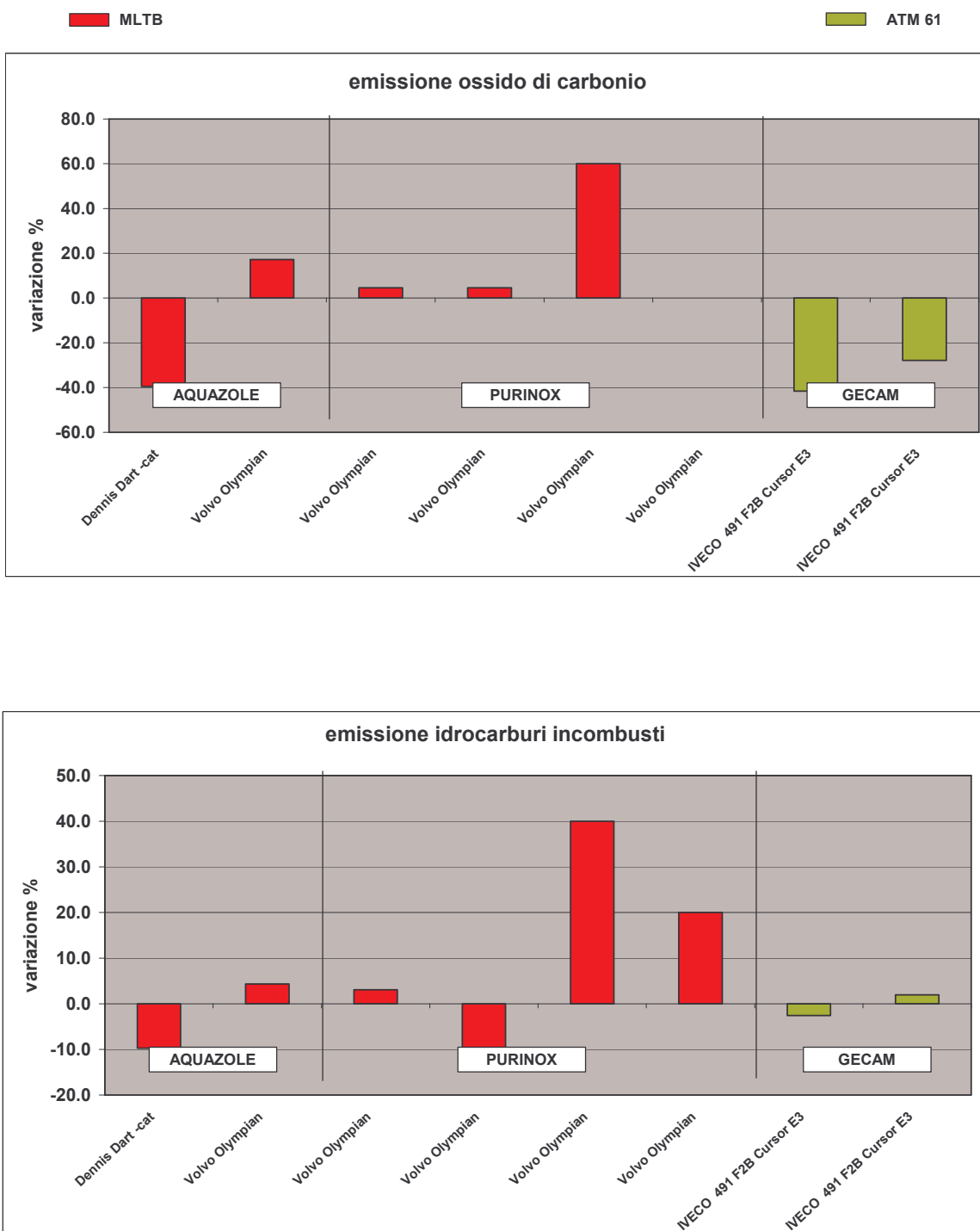


Fig. 7 – Variazione del livello di emissione dell'ossido di carbonio e degli idrocarburi incombusti nei gas di scarico di autoveicoli diesel alimentati con emulsioni, riferita al gasolio convenzionale

Tabella X

Livello medio di emissione di autoveicoli diesel HD e sua variazione percentuale determinata dalla sostituzione del gasolio convenzionale con le emulsioni acqua/gasolio

<i>CICLO</i>	N. test	NOx	N. test	TPM	N. test	CO	N. test	THC
<i>MLTB</i>	6	-13,9	6	-38,8	6	7,8	6	7,8
<i>ATM61</i>	2	-5,6	2	-47,3	2	-34,7	2	-0,3
<i>media</i>	8	-11,8	8	-40,9	8	-2,8	8	5,8

L'aspetto più saliente di questa analisi dei dati sperimentali è che la variazione determinata dalle emulsioni sul livello di emissione degli ossidi di azoto e del particolato nelle prove svolte sugli autoveicoli è in linea con quella rilevata nelle prove svolte sui motori al banco-freno (tabella V). Viceversa, meno evidente è la corrispondenza della tendenza per le emissioni dell'ossido di carbonio e degli idrocarburi incombusti, data la maggiore variabilità dei risultati ottenuti tra le varie sperimentazioni svolte sugli autobus.

In tutti i test esaminati il consumo di emulsione è stato sempre superiore a quello relativo al gasolio di riferimento. Questo risultato è dovuto al fatto che le emulsioni contengono acqua.

Viceversa, i valori di consumo riferiti alla sola frazione combustibile (gasolio + additivi) dell'emulsione sono risultati più bassi (tabella XI).

L'entità delle variazioni di consumo di combustibile osservate dipende da caso a caso e non sembra correlata con il tipo di ciclo di guida adottato nella sperimentazione bensì con il contenuto di acqua nell'emulsione. In generale, quanto più elevato è il contenuto di acqua, tanto maggiore risulta essere l'incremento di consumo di combustibile emulsionato e tanto minore quello della base idrocarburica dell'emulsione, come si evince dal diagramma di figura 8.

La stima basata sulle misure raccolte ha indicato che, quando si sostituiva il gasolio convenzionale con l'emulsione, il consumo di combustibile aumentava mediamente dal 4% al 13% circa in dipendenza del contenuto di acqua. In corrispondenza il consumo riferito al solo gasolio che costituiva l'emulsione si riduceva dal 5% al 9,4% circa.

Questo effetto si riflette in una minore emissione di anidride carbonica (CO₂), gas a effetto serra, come è stato evidenziato dalle misure riportate nei documenti consultati e presentate nella tabella XI.

Tabella XI

Variazione media percentuale del consumo di combustibile (ΔC) di veicoli diesel HD determinata dalla sostituzione del gasolio convenzionale (gas) con le emulsioni acqua/gasolio (em)

<i>CICLO</i>	Rif.	acqua %	ΔC_{em} %	ΔC_{gas} %	ΔCO_2 % (*)
<i>MLTB</i>	1	13	12	-2,6	-1,8
<i>MLTB</i>	11A/12	10	7,9	-2,9	-1,2
<i>MLTB</i>	11A/12	20	13,3	-9,4	-2,8
<i>ATM61</i>	14	12	7,7	-5,2	-3,7
<i>ATM61</i>	14	9	4,1	-5,3	-3,2

(*) differenze ottenute da valori misurati di CO_2

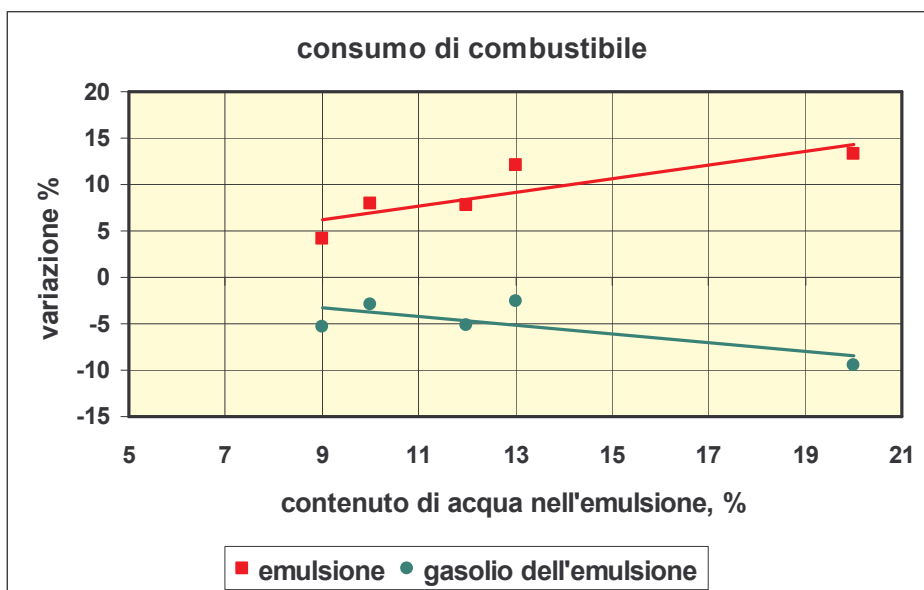


Fig. 8 – Effetto del contenuto di acqua nell'emulsione sul consumo di combustibile in prove svolte su autoveicolo

4. EMISSIONI NON REGOLAMENTATE

4.1 Misure di emissione delle specie inquinanti non regolamentate

In alcuni lavori sperimentali sono state eseguite misure per valutare l'effetto determinato dalla sostituzione del gasolio con l'emulsione sulla distribuzione dimensionale del particolato e sull'emissione di due classi di sostanze inquinanti di rilevanza per l'ambiente e per la salute, quali gli Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA) e i composti carbonilici.

Il quadro riassuntivo delle misure di emissione degli inquinanti non regolamentati e della distribuzione granulometrica del particolato è presentato in tabella XII in corrispondenza dei riferimenti bibliografici consultati.

Tabella XII

Quadro riassuntivo delle indagini sperimentali in cui sono state eseguite misure di emissione delle specie inquinanti non regolamentate

RIFERIMENTO BIBLIOGRAFICO	[10]	[16]	[13A]	[13C]	[17]	[11C/ 15]	[14]
Prove su →	motore						autoveicolo
Combustibile	Aquazole		Gecam			Purinox	Gecam
<i>Distribuzione dimensionale del particolato</i>	x	x	x	x	x	x	-
<i>IPA</i>	x	-	x	-	-	-	x
<i>Composti carbonilici</i>	x	-	x	-	-	-	-

In tutti i documenti consultati sono indicate le metodologie di campionamento dei gas di scarico e il tipo di apparecchiature impiegate per le misure di distribuzione dimensionale del particolato.

Per la determinazione delle altre specie inquinanti non regolamentate (IPA, composti carbonilici) sono state esplicitate le modalità di campionamento e di analisi nelle prove svolte soltanto nei documenti [10] e [14]. In mancanza di queste informazioni nel documento [13A], si è supposto che il laboratorio abbia adottato procedure normalmente impiegate nella pratica di laboratorio per determinare l'emissione di queste:

- **IPA:** estrazione con solvente della frazione organica solubile (SOF) dal particolato raccolto sui filtri e analisi dell'estratto con la gascromatografia/spettrometria di massa (GC/MS) oppure con la cromatografia liquida ad elevata pressione (HPLC)
- **composti carbonilici:** campionamento dei gas di scarico diluiti con aria tramite il sistema CVS in fiale contenenti 2,4-dinitrofenilidrazina (2,4-DNPH) supportata da silice (reattivo specifico) e analisi mediante HPLC degli idrazoni estratti con un solvente specifico (acetone).

4.2 Distribuzione dimensionale del particolato

Nelle tabelle XIII a/b/c è stato riportato il quadro riassuntivo dei risultati conseguiti dai gruppi di ricerca che hanno rilevato la distribuzione dimensionale del particolato emesso nelle prove svolte su motori HD al banco-freno. Nessuna misura è stata effettuata nelle prove su autoveicolo.

Tutte le misure sono state eseguite in concomitanza con le prove svolte per la valutazione del comportamento delle emulsioni sulle emissioni inquinanti regolamentate.

Tre indagini sperimentali [11C/15, 16, 13C/17] sono state svolte da un unico gruppo di ricerca (TTM = *Technik Thermische Maschinen*, Svizzera) su uno stesso motore (Liebherr D914 T) rispettivamente con ciascuna delle emulsioni oggetto di questo *report*, impiegando strumenti di misura differenti (SMPS, ELPI, PAS/DC) per un maggiore approfondimento della caratterizzazione dimensionale del particolato.

I principali risultati emersi nelle sperimentazioni sono i seguenti:

- la distribuzione dimensionale del particolato emesso con l'impiego dell'emulsione era caratterizzata da un andamento uni-modale simile a quello rilevato con il gasolio di riferimento, con un picco di emissione intorno a 80 – 100 nm
- la forma bi-modale della distribuzione dimensionale si è presentata con l'emulsione preparata con acqua potabile per la presenza di tracce di sostanze minerali disciolte. Alcuni incrementi riscontrati nell'emissione delle nano-particelle ($D_p < 40$ nm) si ritengono dovuti unicamente ad effetti di carattere metodologico (utilizzo del termo-sorber oggi non più impiegato dal TTM)
- nella quasi totalità dei casi, le misure con l'SMPS hanno indicato che il numero di particelle emesse con l'uso dell'emulsione è risultato inferiore a quello misurato con il gasolio di riferimento nel campo di diametri di mobilità elettrica superiori a 80 nm e paragonabile nel campo di dimensioni inferiori
- le misure di distribuzione in massa (ELPI) delle frazioni granulometriche del particolato generato con l'impiego dell'emulsione hanno indicato una riduzione sensibile ($> 50\%$) dell'emissione della frazione compresa nell'intervallo di diametri aerodinamici $D_p = 200 - 8000$ nm; la riduzione dell'emissione è risultata meno marcata per le frazioni di dimensioni $D_p < 200$ nm
- la frazione carboniosa del particolato determinata con il PAS e la superficie attiva delle particelle misurata con la DC sono risultate minori quando era impiegata l'emulsione al posto del gasolio di riferimento.

Tabella XIIIa

PROVE SU MOTORE		
N. doc.	CONDIZIONI DI PROVA	ANALISI DIMENSIONALE DEL PARTICOLATO
[10]	<p>Renault MIDR 65045.141 6 cil – 10 L – TC-IC Euro 2</p> <hr/> <p>prova: ESC/ELR</p> <hr/> <p>Gasolio Aquazole (13%)</p>	<p>Misure effettuate con SMPS, CNC nei punti di funzionamento A25, A100, B25, B50, C25 del ciclo di prova. Le seguenti osservazioni sono valide in ciascuna condizione di funzionamento del motore:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Distribuzione bimodale con entrambi i combustibili: picchi di emissione osservati nei <i>range</i> di $D_p = 10 - 50$-nm e $D_p = 70 - 500$ nm in dipendenza delle condizioni di funzionamento del motore. ▪ Il livello di emissione di particelle misurato con Aquazole è risultato paragonabile a quello rilevato con gasolio intorno a 100 nm, ma più elevato intorno a 30 nm in alcune condizioni di funzionamento. Il livello di emissione delle particelle in modo accumulazione con $D_p > 200$ nm è risultato inferiore con l'emulsione in tutte le condizioni di prova. Quelle più fini (modo nucleazione) con $D_p \approx 10$ nm, più numerose con l'emulsione, erano generate probabilmente dalla condensazione di idrocarburi e acqua.
[16]	<p>Liebherr D914 T 4 cil – 6.1 L – TC prEuro 1</p> <hr/> <p>prova: ISO 8178 C</p> <hr/> <p>Gasolio (350S) Aquazole standard (13%) Aquazole newform Aquazole newform con acqua demineralizzata</p>	<p>Misure effettuate con SMPS, CNC, PAS/DC (NanoMet) nei punti di funzionamento 1, 2, 5, 6, 8, 10 del ciclo di prova. Le seguenti osservazioni sono valide in ciascuna condizione di funzionamento del motore.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Distribuzione unimodale con il gasolio: picco di emissione centrato intorno a $D_p = 80 - 100$ nm in dipendenza delle condizioni di funzionamento del motore. ▪ Distribuzione bimodale con l'emulsione preparata con acqua potabile: picchi di emissione osservati nei <i>range</i> di diametri di mobilità elettrica 10 – 50 nm (centrato su $D_p = 30$ nm) e 70 – 500 nm (centrato a $D_p = 100$ nm). ▪ Distribuzione unimodale con l'emulsione prodotta con acqua demineralizzata: picco di emissione presente intorno a $D_p = 80 - 100$ nm in dipendenza delle condizioni di prova. ▪ Il livello di emissione di particelle in modo nucleazione ($D_p < 80$ nm) era più elevato con l'emulsione preparata con acqua potabile rispetto al gasolio, ma paragonabile con l'emulsione ottenuta con acqua demineralizzata. ▪ Il livello di emissione di particelle in modo accumulazione ($D_p \geq 100$ nm) era inferiore con entrambi i tipi di emulsione. ▪ La scomparsa del picco di emissione di particelle in modo nucleazione ($D_p < 80$ nm) con Aquazole prodotto con acqua demineralizzata ha indicato che l'emissione di particelle ultrafini era determinata dalla presenza di tracce di minerali contenuti in essa. ▪ Misure con PAS/DC hanno indicato una riduzione della frazione carboniosa delle particelle e della loro superficie attiva con l'impiego dei due tipi di emulsione rispetto al gasolio

Tabella XIIIb

PROVE SU MOTORE										
N. doc.	CONDIZIONI DI PROVA	ANALISI DIMENSIONALE DEL PARTICOLATO								
[11C] [15]	<p>Liebherr D914 T 4 cil – 6.1 L – TC prEuro 1</p> <hr/> <p>prova: ISO 8178C</p> <hr/> <p>ULSD (32S) Purinox 13E (13%)</p>	<p>Misure effettuate con ELPI, SMPS, PAS/DC (NanoMet) in cinque punti di funzionamento del ciclo di prova differenti in dipendenza del tipo di strumento impiegato.</p> <ul style="list-style-type: none"> Misure con ELPI: il livello di emissione delle particelle (in numero) è risultato inferiore con l'uso di PuriNox in tutto il campo di valori di diametro aerodinamico esplorato con una riduzione media = ~ 49%. Misure con SMPS: il livello di emissione delle particelle è risultato paragonabile per i due combustibili nel <i>range</i> $D_p = 20 - 200$ nm. Nell'intervallo $D_p = 20 - 30$ nm, al modo 6 del ciclo di prova (regime rotazione medio, carico 50%), l'incremento dell'emissione del numero di particelle osservato era dovuto probabilmente a condensazione spontanea di microgocce di sostanze allo stato di vapore (sensibilità col rapporto di diluizione dei gas di scarico). Misure con PAS/DC: le misure hanno indicato una riduzione della frazione carboniosa del particolato associata a una diminuzione della superficie attiva delle particelle. 								
[13A]	<p>Ricardo Proteus monocilindrico 2.1 L – DI – TC Euro 0/1/2</p> <hr/> <p>prova: ECE R49</p> <hr/> <p>Gasolio EN590 (350S) GECAM (10%)</p>	<p>Misure gravimetriche effettuate con MOUDI a regime di coppia massima e 100% di carico.</p> <ul style="list-style-type: none"> L'impiego dell'emulsione ha determinato una riduzione dell'emissione di particolato > 50% nell'intervallo di diametri aerodinamici $0,2 < D_p < 1,0$ μm e una riduzione < 50% per quelle con $D_p < 0,2$ μm e $D_p > 2,0$ μm. Riduzione dell'emissione delle frazioni dimensionali del particolato osservate con l'impiego dell'emulsione in sostituzione del gasolio: <table border="0" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">ECE R49</th> <th style="text-align: center;">regime coppia max</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">$PM_1 = -37,8\%$</td> <td style="text-align: center;">$PM_1 = -45,5\%$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$PM_{2,5} = -38,5\%$</td> <td style="text-align: center;">$PM_{2,5} = -46,8\%$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$PM_{10} = -36,3\%$</td> <td style="text-align: center;">$PM_{10} = -44,7\%$</td> </tr> </tbody> </table>	ECE R49	regime coppia max	$PM_1 = -37,8\%$	$PM_1 = -45,5\%$	$PM_{2,5} = -38,5\%$	$PM_{2,5} = -46,8\%$	$PM_{10} = -36,3\%$	$PM_{10} = -44,7\%$
ECE R49	regime coppia max									
$PM_1 = -37,8\%$	$PM_1 = -45,5\%$									
$PM_{2,5} = -38,5\%$	$PM_{2,5} = -46,8\%$									
$PM_{10} = -36,3\%$	$PM_{10} = -44,7\%$									

Tabella XIIIc

PROVE SU MOTORE		
N. doc.	CONDIZIONI DI PROVA	ANALISI DIMENSIONALE DEL PARTICOLATO
[13C] [17]	<p>Liebherr D914 T 4 cil – 6.1 L – TC prEuro 1 con e senza CRT</p> <hr/> <p>prova: ISO 8178 C4/1</p> <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> <p>ULSD GECAM (12%)</p>	<p>Misure effettuate con ELPI, SMPS, PAS/DC (NanoMet) in quattro punti di funzionamento (modi 1, 2, 5, 6). Le seguenti osservazioni sono valide in ciascun modo di funzionamento del motore.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Misure con ELPI: riduzione dal 40 al 60% (secondo il carico: modi 1 e 5) del numero totale di particelle emesse a regime di potenza massima e dal 13% al 40% (secondo il carico) a regime di coppia massima (modi 2 e 6). ▪ Misure con ELPI: riduzione media dell'emissione in massa (media dei valori determinati nei modi 2, 5, 6, 1 e 2) di ~ 55% per $D_p > 200$ nm; per $40 < D_p < 200$ nm la riduzione è diminuita progressivamente fino ad annullarsi man mano che le dimensioni medie delle particelle risultavano più piccole. ▪ Misure con SMPS: incremento dell'emissione di particelle ultra fini ($D_p < 40$ nm) e un decremento del numero di particelle emesse in modo accumulazione, ossia con $D_p > 90$ nm. ▪ Misure con SMPS: l'incremento osservato dell'emissione di particelle ultra fini ($D_p < 40$ nm) era determinato probabilmente dalla condensazione di idrocarburi e di vapore d'acqua indotta dal Thermosorber collegato con l'SMPS, data l'assenza di sostanze minerali e di additivi a base metallica nel combustibile emulsionato. ▪ Misure con SMPS: l'emissione in numero integrata in tutto lo spettro granulometrico non ha subito alcuna variazione nell'intervallo di diametri $D_p = 20 - 200$ nm, indicando che l'incremento delle particelle più fini è compensato dal decremento osservato delle particelle di diametro maggiore.
[13H]	<p>Iveco F2B 6 cil – 7,9 L – TC 228 kW</p> <hr/> <p>prova: ESC</p> <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> <p>Gasolio EN590 (7S)</p> <p>GECAM (7S; 12%)</p>	<p>Misure effettuate con SMPS, PAS/DC (NanoMet) in due punti di funzionamento (modi 2, 10). Le seguenti osservazioni sono valide in ciascun modo di funzionamento del motore.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Misure con SMPS: l'emissione in numero ha subito una notevole riduzione in un intervallo relativamente ampio di diametri di mobilità elettrica ($D_p = 16 - 900$ nm), comprendendo sia particelle molto fini (nano-particelle), che particelle in modo accumulazione. ▪ Il numero totale di particelle integrato nell'intero spettro di diametri esplorato è risultato inferiore mediamente di più dell'80%. ▪ Misure con PAS/DC: è stata evidenziata una riduzione della frazione carboniosa delle particelle emesse e una diminuzione della loro superficie totale compresa tra 77% e 93%.

DESCRIZIONE DEI PRINCIPALI STRUMENTI IMPIEGATI PER LA
CARATTERIZZAZIONE DIMENSIONALE DEL PARTICOLATO

STRUMENTO	TIPO DI MISURA	CLASSI DIMENSIONALI	TEMPO DI RISPOSTA	DESCRIZIONE
<p style="text-align: center;">ELPI</p> <p style="text-align: center;"><i>Electrical Low Pressure Impactor</i></p>	numero (concentrazione) massa	12 classi di diametri aerodinamici compresi tra 30 nm e 10 μ m	≥ 1 s	<p>E' un impattore elettrostatico costituito da 12 stadi, ciascuno corrispondente a una determinata classe dimensionale delle particelle. La misura è basata sul rilievo della corrente elettrica generata dal flusso di particelle sospese nell'aerosol, previamente caricate con una scarica a corona, che attraversa ogni stadio dello strumento.</p> <p>Essendo un impattore, le particelle di una determinata classe dimensionale, per effetto del bilanciamento tra la forza di inerzia e quella di trascinamento della corrente gassosa, si depositano sul piatto del corrispondente stadio, permettendo anche misure gravimetriche. La misura delle dimensioni delle particelle è definita in termini di diametro aerodinamico.</p>
<p style="text-align: center;">SMPS</p> <p style="text-align: center;"><i>Scanning Mobility Particle Sizer</i></p>	numero (concentrazione)	105 classi di diametri di mobilità elettrica compresi tra 16 e 660 nm	1 – 3 min	<p>Il principio di misura è basato sulla mobilità elettrica delle particelle disperse nell'aerosol. Le particelle carboniose, previamente caricate in una camera di neutralizzazione con raggi beta generati da una sostanza radioattiva, attraversano un campo elettrico di intensità variabile (<i>scanning</i>) generato nel DMA (<i>Differential Mobility Analyser</i>). Il numero di particelle che colpiscono l'elettrodo dipende dal bilanciamento tra la forza di trascinamento (proporzionale alla massa) dell'aerosol che fluisce nel DMA e la forza elettrica determinata dal campo.</p> <p>La misura delle dimensioni delle particelle è definita in termini di diametro di mobilità elettrica.</p>
<p style="text-align: center;">PAS/DC (NanoMet)</p> <p style="text-align: center;"><i>Photoelectric Aerosol Sensor/ Diffusion Charging Sensor</i></p>	numero	valore integrato nell'intervallo di diametri di mobilità elettrica compresi tra 1nm e 1 μ m	$\geq 0,5$ s	<p>Entrambi i sensori, accoppiati con un minidiluitore costituiscono lo strumento NanoMet.</p> <p>Il principio di misura del PAS è basato sull'efficienza di carica elettrica indotta da una sorgente monocromatica di luce UV sulla superficie delle particelle, che dipende dalla natura chimica delle particelle stesse. Il segnale del PAS, determinato da un elettrometro che misura la corrente elettrica generata dal flusso di aerosol attraverso la cella dello strumento, infatti, è correlato con il carbonio aromatico e con il carbonio elementare delle sostanze che costituiscono le particelle.</p> <p>Il DC è un elettrometro che misura la carica elettrica indotta da una scarica a corona sulle particelle disperse nell'aerosol. La carica è proporzionale alla superficie delle particelle e, quindi, al diametro di mobilità elettrica delle particelle stesse.</p>

4.3 Specie inquinanti non regolamentate

Nelle tabelle XIVA/b e XV è stato riportato il quadro riassuntivo delle misure di emissione rispettivamente di alcune specie di Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA) e delle principali aldeidi. Le misure sono state eseguite in alcune sperimentazioni nel corso delle prove svolte per la determinazione delle emissioni inquinanti regolamentate.

I valori riportati, pur essendo la media delle misure ottenute in prove ripetute nelle medesime condizioni sperimentali (e quindi, dal punto di vista statistico, più attendibili di singoli risultati), risultano insufficienti per dare una valutazione attendibile circa l'effetto determinato dall'uso delle emulsioni sull'emissione di queste specie inquinanti. Questa considerazione deriva dal fatto che il livello di emissione delle specie considerate, specialmente gli IPA IARC (cioè quelli riconosciuti dallo IARC – classi 2A e 2B - come potenzialmente pericolosi per la salute umana) è estremamente basso e le misure sono soggette a un'elevata incertezza (variabilità) determinata dalla complessità delle procedure di campionamento e di trattamento dei campioni prima dell'analisi e dell'analisi stessa.

Tabella XIVA

Livello medio di emissione degli IPA e sua variazione percentuale determinata dalla sostituzione del gasolio convenzionale con le emulsioni acqua/gasolio nei motori diesel

Rif.	[10]								
motore	MDIR 65045.141								
Tipo di prova	ESC (A100)			ESC (B25)			ESC (C100)		
IPA	µg/kWh								
	G	Em	Δ %	G	Em	Δ %	G	Em	Δ %
Fluorene	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fenantrene	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Antracene (A)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fluorantene (F)	3,40	2,50	-26,5	3,40	2,20	-35,3	3,80	1,10	-71,1
Pirene (P)	5,00	3,80	-24,0	5,50	3,70	-32,7	6,70	1,20	-82,1
Crisene	3,00	1,00	-66,7	5,00	2,30	-54,0	2,80	1,50	-46,4
B(a)A	1,70	1,00	-41,2	2,50	1,90	-24,0	1,80	0,80	-55,6
B(a)P	< 0,1	< 0,1	-	0,10	0,30	200,0	< 0,1	< 0,1	-
DB(ah)A	< 0,1	< 0,1	-	< 0,1	0,30	-	< 0,1	< 0,1	-
B(b)F	< 0,1	< 0,1	-	0,20	0,30	50,0	< 0,1	< 0,1	-
B(k)F	< 0,1	< 0,1	-	0,10	0,20	100,0	< 0,1	< 0,1	-
TOTALE	13,1	8,3	-36,6	16,8	11,2	-33,3	15,1	4,60	-69,5
TATALE IARC	1,70	1,00	-41,2	2,90	3,00	3,4	1,80	0,80	-55,6

NOTA: le specie IARC definite probabili cancerogeni (classe 2A) sono: benzo(a)antracene, benzo(a)pirene, dibenzo(a,h)antracene; quelle definite possibili cancerogeni (classe 2B) sono: benzo(b)fluorantene e benzo(k)fluorantene

Tabella XIVb

Livello medio di emissione degli IPA e sua variazione percentuale determinata dalla sostituzione del gasolio convenzionale con le emulsioni acqua/gasolio nei motori/autoveicoli diesel

Rif.	[14A]						[17]				
Motore / autoveicolo	Ricardo Proteus						IVECO 491 F2B Cursor 8				
Tipo di prova	ECE R49			Regime coppia max carico 100%			ATM 61				
IPA	µg/kWh						µg/km				
	G	Em	Δ %	G	Em	Δ %	G	Em (9%)	Δ %	Em (9%)	Δ %
Fluorene	5,40	5,33	-1,4	4,75	3,80	-20,0	0,00	0,20	-	0,10	-
Fenantrene	31,2	35,1	12,4	22,6	23,7	4,9	42,1	5,80	-86,2	5,60	-106,5
Antracene (A)	1,04	1,00	-3,9	0,76	0,46	-39,5	3,40	0,30	-91,2	0,30	-100,3
Fluorantene (F)	10,2	9,67	-5,2	7,52	4,22	-43,9	33,3	14,8	-55,6	10,4	-118,7
Pirene (P)	6,15	6,87	11,7	4,44	2,99	-32,7	48,5	23,3	-52,0	20,2	-138,9
Crisene	1,95	3,01	54,3	1,66	0,76	-54,2	7,20	10,20	41,7	4,90	-88,2
B(a)A	1,05	1,80	71,4	0,93	0,55	-40,9	4,30	1,50	-65,1	2,10	-51,2
B(a)P	0,45	0,57	26,7	0,51	0,15	-70,4	0,70	0,70	0,0	0,70	0,0
DB(ah)A	0,03	0,02	-33,3	0,05	0,00	-100,0	0,30	0,60	100,0	0,60	100,0
B(b)F	0,28	0,38	35,7	0,30	0,11	-62,8	1,80	2,00	11,1	1,80	0,0
B(k)F	0,28	0,38	35,7	0,30	0,11	-62,8	0,50	0,70	40,0	0,60	20,0
TOTALE	58,1	64,1	10,4	43,8	36,8	-15,9	141	58,8	-58,2	46,1	-67,3
TATALE IARC	2,09	3,15	50,7	2,08	0,92	-55,8	6,30	4,20	-33,3	4,60	-27,0

NOTA: le specie IARC definite probabili cancerogeni (classe 2A) sono: benzo(a)antracene, benzo(a)pirene, dibenzo(a,h)antracene; quelle definite possibili cancerogeni (classe 2B) sono: benzo(b)fluorantene e benzo(k)fluorantene

Tabella XV

Livello medio di emissione delle aldeidi e sua variazione percentuale determinata dalla sostituzione del gasolio convenzionale con le emulsioni acqua/gasolio nei motori diesel

Rif.	[8]									[14A]		
motore	MDIR 65045.141									Ricardo Proteus		
Tipo di prova	ESC (A100)			ESC (B25)			ESC (C100)			ECE R49		
ALDEIDE	mg/kWh									mg/kWh		
	G	Em	Δ %	G	Em	Δ %	G	Em	Δ %	G	Em	Δ %
formaldeide	8,9	9,0	1,1	17,0	22,0	29,4	7,9	8,8	11,4	5,80	3,50	-39,7
acetaldeide	2,1	2,3	9,5	8,0	9,0	12,5	2,7	2,9	7,4	2,10	1,50	-28,6
acroleina	0,8	0,6	-25,0	2,0	2,4	20,0	0,5	0,4	-20,0	0,30	0,10	-66,7
benzaldeide	1,2	0,7	-41,7	4,7	0,1	-97,9	0,7	0,5	-28,6	0,30	0,20	-33,3
TOTALE	13,0	12,6	-3,1	31,7	33,5	5,7	11,8	12,6	6,8	8,5	5,3	-37,6

Va tenuto conto anche che le variabili “tipo di motore” e “tipo di prova” influenzano, a loro volta, in modo molto sensibile il livello di emissione delle specie considerate. Ciò può giustificare il fatto che i dati raccolti sono in parte contrastanti tra loro.

Sebbene il quadro delle poche misure riportate nelle tabelle non consente di formulare una conclusione generale riguardo gli effetti determinati dall'emulsione sulle emissioni degli inquinanti non regolamentati, permette, comunque, di individuare, in termini molto generali, una tendenza verso la diminuzione dell'emissione degli IPA più leggeri (tre anelli) e, in modo minore, di quelli più pesanti (quattro anelli) quando l'emulsione acqua/gasolio sostituiva il gasolio convenzionale.

Molto incerta, invece, è la stima dell'effetto determinato sull'emissione delle specie carboniliche.

Una valutazione più attendibile degli effetti determinati dalle emulsioni nei riguardi dell'emissione delle specie inquinanti tossiche dovrebbe essere suffragata con un maggiore numero di dati sperimentali, che darebbe una maggiore consistenza statistica ai risultati osservati. Uno studio *ad hoc* consentirebbe, inoltre, di spiegare il meccanismo chimico-fisico che starebbe alla base del potenziale effetto positivo sull'emissione degli IPA, rilevato con l'analisi delle poche misure disponibili.

5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Sono stati valutati criticamente i risultati sperimentali di prove svolte presso centri di ricerca europei su undici motori diesel *heavy-duty* e su tre modelli di autobus urbani per verificare gli effetti immediati determinati sulle emissioni inquinanti nei gas di scarico dalla sostituzione del gasolio convenzionale con tre tipologie di emulsioni acqua/gasolio (GECAM, PuriNOx e Aquazole).

In totale sono stati esaminati i risultati ottenuti in ventinove sperimentazioni svolte su motori al banco-freno secondo cicli di funzionamento normalizzati e di otto sperimentazioni eseguite su autobus in simulazione di percorso su banco a rulli, secondo cicli di guida non convenzionali.

Nel corso dell'elaborazione delle informazioni raccolte sono state effettuate alcune considerazioni e osservazioni critiche sulle modalità adottate nella conduzione delle prove su motore. L'insieme dei dati esaminati, però, è stato considerato nel complesso esauritivo per consentire una valutazione sufficientemente attendibile del comportamento a breve termine delle emulsioni acqua/gasolio impiegate per alimentare i motori HD, a riguardo delle emissioni inquinanti regolamentate e del consumo di combustibile.

Il gruppo dei dati, estratti dalla documentazione esaminata e aggregati in maniera sistematica secondo la tipologia di prova impiegata, costituisce nel complesso un congruo numero di evidenze sperimentali che ha consentito di trarre alcune conclusioni di carattere generale.

Infatti, i dati raccolti possono essere considerati come ottenuti su un campione statisticamente significativo di undici motori che, tranne un'eccezione (motore Proteus), sono rappresentativi di propulsori di autobus urbani e da un campione di tre autobus di modello diffuso sul territorio europeo, provati con differenti procedure normalizzate e, quindi, riconosciute dalla comunità scientifica internazionale.

La valutazione complessiva dei dati è stata effettuata separando quelli relativi alle prove su motore dai dati ottenuti nelle prove di simulazione di percorso. Entrambi i gruppi di dati hanno messo in evidenza effetti positivi determinati dall'impiego delle emulsioni acqua/gasolio come combustibili diesel.

Sebbene i livelli di emissione delle specie regolamentate siano risultati differenti da caso a caso, perché dipendenti dalle modalità operative adottate per le prove e dai modelli di propulsore e di autoveicoli selezionati, in tutte le sperimentazioni esaminate è stata individuata la tendenza univoca verso una diminuzione del livello di emissione delle specie inquinanti regolamentate, ad eccezione degli idrocarburi incombusti, quando si sostituiva il gasolio di riferimento con l'emulsione acqua/gasolio per alimentare i motori.

Una stima globale della riduzione media delle emissioni inquinanti è risultata intorno all'11% per l'ossido di carbonio, al 14% per gli ossidi di azoto e al 37% per il particolato totale. Di contro, è stato evidenziato in quasi tutte le sperimentazioni un incremento dell'emissione degli idrocarburi incombusti.

La sintesi dell'elaborazione dei risultati esaminati è riportata nella figura 9.

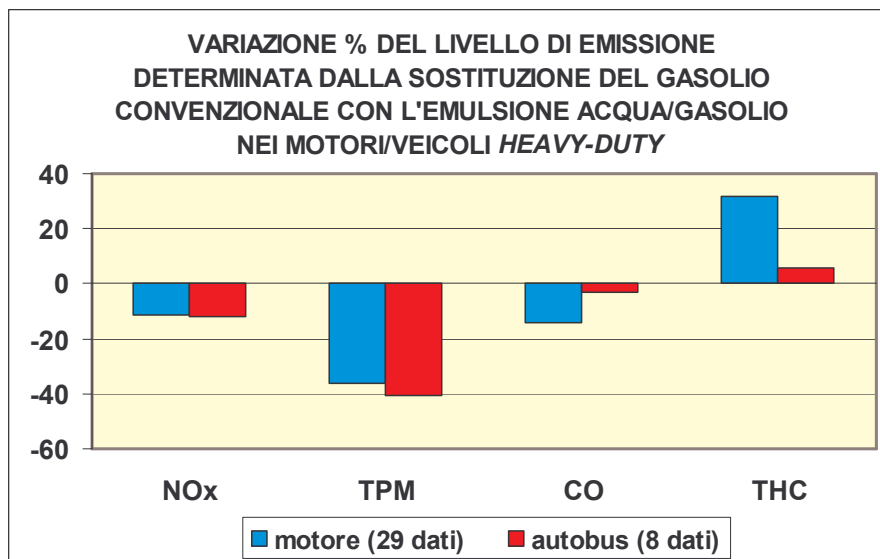


Fig. 9 – Valutazione globale degli effetti determinati sulle emissioni inquinanti regolamentate dall'emulsione acqua/gasolio rispetto al gasolio convenzionale basata sui valori medi di ventinove sperimentazioni su motore HD e di otto sperimentazioni svolte su autobus urbano

L'ampia varietà di condizioni operative esplorata e, soprattutto, la concordanza dei risultati relativi alle emissioni inquinanti regolamentate, ottenuti nelle prove su motore al banco-freno e quelli conseguiti nelle condizioni di simulazione di percorso con autobus urbani, rafforzano la validità delle stime riportate in questo documento.

L'analisi dimensionale del particolato è stata eseguita soltanto in poche sperimentazioni, impiegando apparecchiature di misura differenti. Le misure disponibili hanno indicato che il numero di particelle emesse con l'uso dell'emulsione è risultato inferiore a quello misurato quando l'alimentazione del motore era costituita dal gasolio di riferimento nel campo di diametri di mobilità elettrica superiori a 80 nm e paragonabile nel campo di dimensioni inferiori.

Infine, per quanto attiene gli IPA e i composti carbonilici (emissioni non regolamentate), i pochi risultati non sono sufficienti per stabilire con certezza gli effetti determinati sull'emissione di questi inquinanti dalla sostituzione del gasolio con l'emulsione.

TERMINOLOGIA

CNC	Condensation Nucleus Counter
CRT	Continuous Regenerating Trap
D2	Diesel #2 U.S.
DI	Iniezione diretta
DUB	Deutch Urban Bus Cycle
ECE R49	Prova standard europea per motori HD (13 modi)
ELPI	Electrical Low Pressure Impactor
ELR	European Load Response
ESC	European Standard Cycle
ETC	European Transient Cycle
G	Gasolio
IC	Intercooled
IID	Iniezione indiretta
IPA	Idrocarburi Policiclici Aromatici
MLTB	Millbrook London Transport Bus
MOUDI	Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor
PAS/DC	Photoelectric Aerosol Sensor / Diffusion Charger (NanoMet)
TPM	Total Particulate Matter = particolato
S	Contenuto di zolfo nel gasolio
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer
TC	Turbocompresso
THC	Idrocarburi incombusti totali
TTM	Technik Thermische Maschinen
ULSD	Ultra Low Sulphur Diesel

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

RIF. N	
1	F. Barnaud, P. Schmelzle, P. Schulz – <i>ACQUAZOLE: An Original Emulsified Water-Diesel Fuel for Heavy-Duty Applications</i> – SAE Techn. Paper N. 2000-01-1861 (2000)
2	Norma CUNA NC 637-01 – <i>Emulsione di acqua in gasolio per autotrazione – Requisiti e Metodi di prova</i> - (giugno 2004)
3	Norma AFNOR NF M 15-021 – <i>Caractéristiques des émulsions d'eau dans le gazole</i> – (ed. 2001)
4	D.A. Langer, N.K. Petek, E.A. Schiferl – <i>Maximizing the Effectiveness of Water Blended Fuel In Reducing Emissions By Varying Injection Timing Or Using After-treatment Device</i> – SAE Techn. Paper N. 2001-01-1531 (2001)
5	Law et al. – <i>Combustion Characteristics of Water-in-Oil Emulsion Droplets</i> – Comb. Flame, 37 (1980), p. 125-143
6	G.E. Andrews, K.D. Bartle, S.W. Pang, A.M. Nureln, P.T. Williams - <i>The Reduction in Diesel Particulate Emissions Using Emulsified Fuels</i> – SAE Technical Paper N. 880348 (1988)
7	G. Greeves, I.M. Khan, G. Onion – <i>Effect of Water Introduction in Diesel Engine Combustion and Emissions</i> - Sixteenth Symposium (International) on Combustion – The Combustion Institute (1976)
8	Direttiva 91/542/CE del Consiglio, del 1° ottobre 1991, che modifica la direttiva 88/77/CEE concernente il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri ai provvedimenti da prendere contro l'emissione di gas inquinanti prodotti dai motori ad accensione spontanea destinati alla propulsione dei veicoli. - L 295 del 25 ottobre 1991
9	Direttiva 1999/96/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 13 dicembre 1999 sul ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative ai provvedimenti da prendere contro l'emissione di inquinanti gassosi e di particolato prodotti dai motori ad accensione spontanea destinati alla propulsione di veicoli e l'emissione di inquinanti gassosi prodotti dai motori ad accensione comandata alimentati con gas naturale o con gas di petrolio liquefatto destinati alla propulsione di veicoli e che modifica la direttiva 88/77/CEE del Consiglio. - L 44 del 16 febbraio 2000
10	Report 54302 IFP – <i>Impact de l'Acquazole sur les émissions de polluants et la granulométrie des particules d'un moteur de poids lourd Euro 2</i> - luglio 2000
11A	Rapporto PURINOX – Programma Millbrook (UK)
11B	Rapporto PURINOX – Programma Ricardo (UK)
11C	Rapporto PURINOX – Programma TTM (UK)
11D	Rapporto PURINOX – Programma Perkins Technology Consultancy (UK)

12	Evaluation of PuriNox over steady-state and transient test cycles using a Euro 2 Diesel engine - TNO Report N. 02.OR.VM.022.1/MvH (maggio 2002) D. Duncan, A. Psaila – <i>Environmental benefits from the use of emulsion fuels in heavy-duty diesel engines</i> – International Symposium “Energy and Environment” ISB 88-86281-70-6, pag. 127 – 136 (2002)
13A	Rapporto Cam Tec – GECAM il gasolio bianco - Programma Ricardo (UK)
13B	Rapporto Cam Tec – GECAM il gasolio bianco - Programma VM Motori (I)
13C	Rapporto Cam Tec – GECAM il gasolio bianco - Programma VFT/TTM (UK)
13D	Rapporto Cam Tec – GECAM il gasolio bianco - Programma UTAC (Iveco)
13E	Rapporto Cam Tec – GECAM il gasolio bianco - Programma Deutz (D)
13F	Rapporto Cam Tec – GECAM il gasolio bianco - Programma MAN (S)
13G	Rapporto Cam Tec – GECAM il gasolio bianco - Programma Deutz
13H	Rapporto Cam Tec – GECAM il gasolio bianco - Programma ARBON (Iveco)
13L	Rapporto Cam Tec – GECAM il gasolio bianco - Programma Scania
14	Rapporto di prova riservato Agip Petroli CREA/CAMTEC (giugno 2002)
15	D. Duncan, D. Langer, J. Marshall - <i>The Impact of Emulsion Fuels on Particulate Formation</i> - SAE Technical Paper N. 2001-01-3385 (2001)
16	<i>Influence of Aquazole, a Water in Diesel Fuel Emulsion on Nanoparticles Emission Characteristics</i> – Riunion DHYMA F. TORT, 20 novembre 2000
17	<i>Investigation with GECAM emulsion Fuel & CRT on Liebherr D914 T engine with detailed analysis of particulate emissions</i> - TTM Report (gennaio 2002)