

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale  
Dipartimento di Energia



# Analisi sperimentale per la valutazione dell'intensità di detonazione al variare del numero di ottano del carburante

---

Tesi di laurea di:

Fabio Marotta

Matr. 712346

Relatore: Prof. G. Ferrari

Correlatore: Dr. T. Cerri

Anno accademico 2009/2010

*Ai miei cari genitori...*



# Ringraziamenti

---

Desidero ringraziare per l'aiuto tecnico necessario allo svolgimento della tesi, il Prof. G. Ferrari ed il Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano. Vorrei particolarmente sottolineare la disponibilità del Dr. Tarcisio Cerri. Grazie ai suoi preziosi insegnamenti ed al tempo dedicatomi è riuscito a farmi appassionare al lavoro di tesi illuminandomi il percorso da seguire per la sua stesura.

Ulteriori ringraziamenti porgo a S. Truzzi e L. Spaggiari per le intere giornate passate piacevolmente in sala prove. Grazie alla loro professionalità ed esperienza sono riusciti a farci essere un team produttivo e, grazie ai loro aneddoti, anche a divertirci.

L'intera attività sperimentale è stata possibile grazie alla collaborazione tra Eni S.p.A ed il Politecnico di Milano, Università a cui devo un lungo e proficuo percorso formativo che caratterizzerà il mio futuro, sia lavorativo che personale.

\* \* \*



*La dedica del lavoro di tesi non poteva che essere dedicato a loro, i miei genitori.*

*Avere un figlio “ingegnere” non deve essere facile.*

*Come chi ci conosce bene saprà, Antonio & Antonietta mi sono stati vicini durante l'intero periodo universitario. Sono stati in grado di sopportarmi senza tentennamenti in ogni momento, da quando divenivo irascibile a causa del duro periodo di studi, a quando partivo per “godermi un po' la vita” . Come dei perfetti genitori sono stati i miei punti di riferimento, ed a loro va tutta la mia stima e riconoscimento.*

*Come fare a non menzionare poi i miei compagni e colleghi, con i quali ho affrontato tutte le difficoltà che la vita universitaria ci porgeva. Proprio grazie a queste ci siamo conosciuti, apprezzati e, molto spesso, presi in giro.....*

*Ciccio, Ferro, Andrea, Rocco, Nico e Luca. Grazie alla sicurezza di trovarli d'avanti alla macchinetta del caffè, la mattina era un piacere raggiungere il Poli.*

*Anche se con questo lavoro di tesi non abbiano a che fare direttamente, un grazie porgo anche ai miei grandi amici Peppe, Ivan, Pilu, Buggio e Bizio. Attraverso le giornate mondane che ci siamo permessi, la vita mi è sempre risultata leggera anche quando non lo fosse.*

*Non potrei dimenticarmi della mia esperienza Erasmus a København, e con questa di Vale, Giulia, Anto e Marek. Divertendoci assieme abbiamo arricchito il nostro bagaglio culturale, ma ancor prima, trovato veri amici.*

*Ultima persona che vorrei calorosamente ringraziare è Ambra.*

*Si trova alla fine di questi ringraziamenti poiché rispetto a tutti gli altri è entrata nella mia vita da meno tempo, ma con altrettanta importanza. Grazie alla sicurezza ed all'aiuto reciproco che riusciamo sempre a darci, anche questo ultimo periodo di grande interesse per me non è stato causa di tensione emotiva.*



# Abstract

---

*Experimental analysis for knock intensity evaluation changing the fuel octane rating.*

The aim of this thesis is to find an appropriate knock index, which permit to classify the detonation phenomenon during various tests on different typology of fuels. Trials are carried out at different levels of load and engine velocity, through a fixed spark advance range for each engine condition. Thanks to an equipped Alfa Rome engine, nine kind of fuels are be tested, each one with own octane rating and different composition.

Once that the knock index has been obtained, it's been possible to compare the fuel detonation characteristic of all the available samples. The last result is shown on a graph where the knock activity is solely function of octane rating (as RON as MON).

For some kind of this fuels ( surrogates ) have been possible to deduce a trend between the knock index and the few chemical components own of these.

Thanks to normalization process applied on the knock index, it's objectively possible to assign a value of detonation in each condition an engine is working, and understand the knock peculiarity own of whatever fuel.





# Simboli ed Abbreviazioni

---

Knock	Detonazione
SA	Anticipo d'accensione, acronimo di Spark Advance
MTBE	Composto organico, acronimo di metil-ter-butil-etero
ETBE	Composto organico, acronimo di L'etil-t-butil-etero
RON	Prova per determinare il numero di ottano. Research Octane Number
MON	Prova per determinare il numero di ottano. Motor Octane Number
Rpm	Unità di misura della velocità angolare, giri al minuto
$\lambda$	Lambda, indice d'eccesso d'aria.
PMI	Punto morto inferiore
PMS	Punto morto superiore
FFT	Trasformata di Fourier
IFFT	Anti-trasformata di Fourier
f	Frequenza
MAPO	Indice di detonazione, "Maximum Amplitude Pressure Oscillation"
INT	Indice di detonazione che si basa sulla funzione di Integrazione
$S_s$	Indice di detonazione ricavata dall'analisi dello spettro
$S_a$	Sensitivity
$\vartheta$	Angolo di manovella
C	Carico del motore
V	Regime del motore
$\phi$	Rapporto d'equivalenza



# Prefazione

---

La presente tesi di Laurea magistrale è un lavoro sperimentale svolto presso il Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano in collaborazione con ENI S.p.A.

L'obiettivo è, grazie a prove eseguite su benzine e surrogati forniteci dal committente, valutare il loro livello di qualità per quanto riguarda l'aspetto energetico e prestazionale. Nel dettaglio si vuole valutare il potere antidetonante, il rilascio del calore e le curve di coppia a diverse condizioni di utilizzo, con la possibilità di settare i parametri di funzionamento del motore intervenendo elettronicamente sulla centralina originale in dotazione con esso.

Per ottenere tali risultati è stato necessario attrezzare una sala prove motori con freno elettrico all'interno degli spazi dell'università, utilizzando il motore Alfa Romeo 2.0 Twin Spark.

I risultati ottenuti ci permettono di relazionare tra loro le caratteristiche dei diversi combustibili e, grazie allo studio di appropriati indici di detonazione, identificarne l'incipiente fenomeno al variare del grado d'anticipo d'accensione rispetto al punto morto superiore.



# Sommario

---

Ringraziamenti .....	3
Abstract .....	7
Simboli ed Abbreviazioni .....	9
Prefazione.....	11
1 Introduzione.....	15
1.1 Le moderne esigenze motoristiche .....	15
1.2 Obiettivi.....	16
2 La detonazione.....	17
2.1 Ipotesi sull'origine del fenomeno .....	18
2.2 Caratteristiche e conseguenze della detonazione .....	18
2.3 Fattori che influenzano la detonazione .....	20
3 La sala prove.....	23
3.1 Caratteristiche tecniche del motore .....	23
3.2 Strumentazione utilizzata .....	26
3.3 Posizionamento dei sensori di misura.....	32
3.4 Potenzimetro e Freno motore .....	34
4 Impostazione Prove Sperimentali .....	37
5 Indici di Detonazione.....	41
5.1 Trattamento segnale in ingresso .....	41
5.2 Formulazione .....	50
5.3 Normalizzazione .....	54

6	Risultati ottenuti .....	65
6.1	Comparazione prestazioni con settaggio centralina standard .....	67
6.2	Confronto Benzine .....	73
6.3	Confronto Surrogati .....	89
6.4	Determinazione della responsabilità di detonazione .....	103
7	Osservazioni Conclusive .....	107
8	Sviluppi futuri.....	113
9	Bibliografia.....	115

# 1 Introduzione

---

## 1.1 Le moderne esigenze motoristiche

Durante il corso del tempo, le pretese del classico motore a combustione interna sono cambiate, adattandosi di volta in volta alle problematiche e necessità del momento storico. Oggi si può dire che gran parte delle attenzioni sono indirizzate al problema ambientale, con l'obiettivo di una continua riduzione degli inquinanti all'interno dei gas di scarico, pur cercando di non avere abbassamenti per quanto riguarda le potenze in giuoco.

Per queste già da tempo note motivazioni, l'industria motoristica e quella petrolifera lavorano affiancate cercando di raggiungere tali obiettivi.

Una delle caratteristiche dei carburanti di maggiore interesse in questo lavoro di tesi è la loro proprietà antidetonante. Quest'ultima, sfavorendo l'insorgere della detonazione, permette di aumentare il rapporto di compressione (e quindi il rendimento termodinamico) e l'anticipo di accensione, con relativo aumento delle prestazioni motoristiche ed efficienza energetica. Per ovviare al pericolo della detonazione, si aggiungono alle benzine additivi antidetonanti. Il potere antidetonante della benzina è indicato dal suo numero di ottano. Anche in presenza di antidetonanti, il rapporto di compressione volumetrico nei motori a benzina difficilmente supera 15:1 ed è in genere attorno a 10:1.

In passato l'antidetonante più usato era il piombo tetraetile (presente nella benzina super), ora proibito perché dannoso alla salute. Gli antidetonanti usati attualmente nelle cosiddette benzine verdi sono principalmente idrocarburi aromatici, tra cui il benzene, l'ETBE e l'MTBE (metil-ter-butil-etero).



## 1.2 Obiettivi

Gli obiettivi delle prove sperimentali sono quelli di valutare le caratteristiche del motore funzionante con i diversi combustibili, in modo da poterle poi confrontare tra loro. Ulteriore passo è correlare tali proprietà riscontrate ai composti chimici contenuti dai campioni stessi. Questo ultimo punto sarebbe alquanto difficoltoso applicato alle normali benzine, proprio per il gran numero di composti dalle quali sono formati. Risulta invece più agevole effettuare questo tipo di valutazioni sui surrogati, carburanti a solo scopo scientifico caratterizzati dalla presenza di un basso numero di composti, tra cui Toluene, Isoottano, N-eptano e Diisobutilene. Si vuole inoltre correlare i risultati ottenuti al numero di ottano, sia RON che MON, così da testarne la veridicità alle condizioni di funzionamento impostate durante le prove.

Come detto precedentemente, l'effetto principale che preme analizzare è l'insorgere del fenomeno della detonazione ( il così detto "knock" ). Per distinguere tale deleterio effetto si sono creati appositi indici di detonazione che, osservando i dati di pressione della camera di scoppio, riescono ad individuare ed isolare le frequenze nel knock, e cosa più importante, permettono di dargli un valore oggettivo.

## 2 La detonazione

---

La normale combustione ha come caratteristiche, oltre che di iniziare nel punto e nell'istante in cui scocca la scintilla, quello di propagarsi gradualmente da quel punto fino all'estremo della camera senza che si abbiano brusche variazioni di velocità.

Quando una di queste condizioni non è verificata, si realizza una forma di *combustione anomala*, che può arrivare a provocare danni ai componenti meccanici del motore o, più semplicemente ad accrescerne la rumorosità, ridurne la potenza sviluppata o il rendimento globale.

La detonazione costituisce una delle forme di combustione anomala più importante, poiché limita le prestazioni ed il rendimento dei motori (impedendo di superare certi valori di rapporto di compressione ed anticipi d'accensione) e nello stesso tempo impone vincoli restrittivi alla formulazione dei carburanti. Essa si manifesta all'esterno con l'emissione di un caratteristico rumore metallico, simile ad un martellamento (si parla comunemente di battito in testa del motore), perdita di potenza, vibrazioni, riscaldamento accentuato, arrivando in condizioni severe al danneggiamento degli organi meccanici del motore.

## 2.1 Ipotesi sull'origine del fenomeno

Due diverse teorie sono state avanzate per spiegare l'origine del fenomeno. La prima si basa sull'ipotesi dell'autoaccensione di una o più parti della miscela che brucia per ultima, prima che venga raggiunta dal fronte di fiamma. La seconda presuppone che il fronte di fiamma avanzante acceleri fino a raggiungere la velocità del suono, trasformandosi in un'onda d'urto che accelera la restante miscela, propagandosi in essa con una velocità nettamente superiore a quella di normale avanzamento della fiamma (velocità sonora  $> 1000$  m/s).

Allo stato attuale, la prima teoria sembra aver avuto un maggior numero di conferme sperimentali. Queste prove dimostrano come uno o più volumetti di miscela si possano autoaccendere prima di essere raggiunti dal fronte di fiamma principale. Si libera allora localmente una forte quantità di energia (dipendente dalla massa di miscela interessata), che produce un brusco picco di pressione. Questo si propaga all'intorno con velocità sonora, stimolando l'autoaccensione di quella parte di carica per cui le reazioni erano quasi terminate. Le onde di pressione si riflettono ripetutamente alle pareti della camera, producendo vibrazioni nelle parti metalliche, che si trasmettono all'esterno sotto forma del caratteristico battito.

La spiegazione del fenomeno ora fornita, trova conferma in diversi rilievi sperimentali, ottenuti riprendendo tramite cinematografia ad alta velocità lo sviluppo di un processo di combustione con detonazione.

## 2.2 Caratteristiche e conseguenze della detonazione

Quando il motore è soggetto a detonazione, i diagrammi della pressione in camera di combustione in funzione dell'angolo di manovella, mostrano tipiche oscillazioni, con picchi di ampiezza gradualmente crescenti nel tempo. La loro frequenza è la stessa del rumore metallico udibile dall'esterno e dipende dalla velocità con cui si propagano le onde di pressione e dal cammino percorso tra due riflessioni consecutive (proporzionale all'alesaggio del motore). Quando la detonazione è debole, ossia una piccola percentuale della massa totale di miscela autoaccende, il fenomeno non appare in tutti i cicli che si susseguono. Un numero più o meno elevato di essi presenta un processo di combustione normale, mentre i cicli detonanti mostrano cicli di pressione di ampiezza modesta (pochi punti percentuali della pressione massima).

Nel caso di detonazione intensa, le oscillazioni di pressione appaiono prima nel processo di combustione (ossia una massa maggiore di miscela autoaccende ) e la loro ampiezza è via via più grande (fino al 20/30 % della pressione massima).

I danni prodotti dalla detonazione dipendono dalla sua intensità e durata. La forma che appare talvolta nei motori per autovetture in accelerata, difficilmente risulta essere pericolosa, perché facilmente udibile e di breve durata. Più insidiosa risulta essere quella ad alta velocità perché, mascherata dal rumore generale del motore, può perdurare a lungo nel tempo. Le onde di pressione, rimuovendo allora lo strato del gas aderente alle pareti della camera di combustione, incrementano sensibilmente il flusso di calore verso l'esterno. Gli accresciuti carichi termici, uniti alle sollecitazioni meccaniche variabili nel tempo, possono quindi portare alla rottura di qualche componente (pistone, fasce elastiche, guarnizione della testa) per un fenomeno di fatica a caldo.

Spesso compare anche un'intensificata usura della parte superiore delle canne del cilindro dovuta al fatto che le oscillazioni di pressione portano alla rottura del film di lubrificante ed al contatto diretto tra il metallo della fascia e canna, cui si unisce un'usura corrosiva esercitata probabilmente da sostanze acide (come gli ossidi d'azoto) contenuti nei prodotti della combustione. Se si formano, poi, punti caldi in grado di dare origine a forme di preaccensione, gli effetti combinati di detonazione e preaccensione si esaltano reciprocamente con conseguenze che possono diventare in poco tempo disastrose per i componenti meccanici più delicati del motore.

Attualmente, la detonazione ha perso parte della sua pericolosità originaria, grazie alla sempre più frequente adozione di un sistema elettronico di controllo del fenomeno. In esso un apposito sensore di tipo acustico od accelerometrico (tarato sulla banda di frequenza tipica della detonazione) rileva l'apparire del battito. L'istante in cui il rumore metallico viene avvertito, permette di risalire al cilindro che detona (quello che in quel momento è in fase di combustione). L'unità di controllo provvede quindi a diminuire l'anticipo d'accensione di quel cilindro e/o aumentare la ricchezza della miscela di alimentazione. Poiché il rischio di detonazione è limitato ad un ristretto numero di punti del campo di funzionamento, in questo modo si consente al motore di utilizzare, con tutta sicurezza e senza un apprezzabile scadimento delle prestazioni e dei consumi, benzine con numero di ottano inferiore di qualche punto alla sua normale richiesta ottanica, oppure di operare con rapporto di compressione o grado di sovralimentazione più elevato.

## 2.3 Fattori che influenzano la detonazione

Per quanto riguarda l'influenza dei vari fattori su questa forma di combustione anomala, si può dire che da un lato essa è favorita da tutti quelli che riducono il ritardo d'accensione della porzione finale di carica. Ossia :

- Una diminuzione del numero di ottano del combustibile, cui corrisponde elevata reattività chimica della miscela;
- Un aumento del rapporto di compressione, che innalza pressione e temperatura della carica;
- L'introduzione di una massa maggiore di miscela per ogni ciclo (diminuendo la parzializzazione del condotto d'aspirazione od incrementando il grado di sovralimentazione), perché si comprime e riscalda maggiormente la fase finale della carica;
- Un aumento della temperatura della miscela di alimentazione, che favorisce l'avvio delle reazioni di preossidazione;
- Un più elevato anticipo d'accensione, che fa crescere più rapidamente la pressione in camera di combustione e ne innalza il massimo;
- Una composizione della miscela prossima al valore  $\phi=1.1$ , cui corrispondono più elevate pressioni e temperature di combustione e le massime velocità delle reazioni di prefiamma nella carica riscaldata e compressa dal fronte che avanza;
- Un cattivo raffreddamento della porzione finale della miscela fresca da parte delle pareti della camera di combustione.

D'altra parte la detonazione sarà pure favorita da quei fattori che ritardano la propagazione del fronte di fiamma, in modo che l'accensione della carica non venga completata prima che alcune sue parti abbiano il tempo di autoaccendere. Ossia :

- Una diminuzione del moto turbolento della carica fresca;
- Un aumento del percorso del fronte di fiamma per raggiungere i punti più remoti della camera di combustione;
- Un rapporto di miscela tendente al magro, che riduca la velocità di avanzamento del fronte di reazione;



## 3 La sala prove

---

### 3.1 Caratteristiche tecniche del motore

Il motore impiegato durante questo lavoro di tesi è l'Alfa Romeo 2000 Twin Spark a quattro cilindri in linea e distribuzione a 16 valvole. E' montato sulle vetture 147 e 166, attualmente omologate Euro IV. La versione del propulsore usata per le prove è quella montata sulla 147 ed è dotata di un sistema di scarico omologato euro IV.

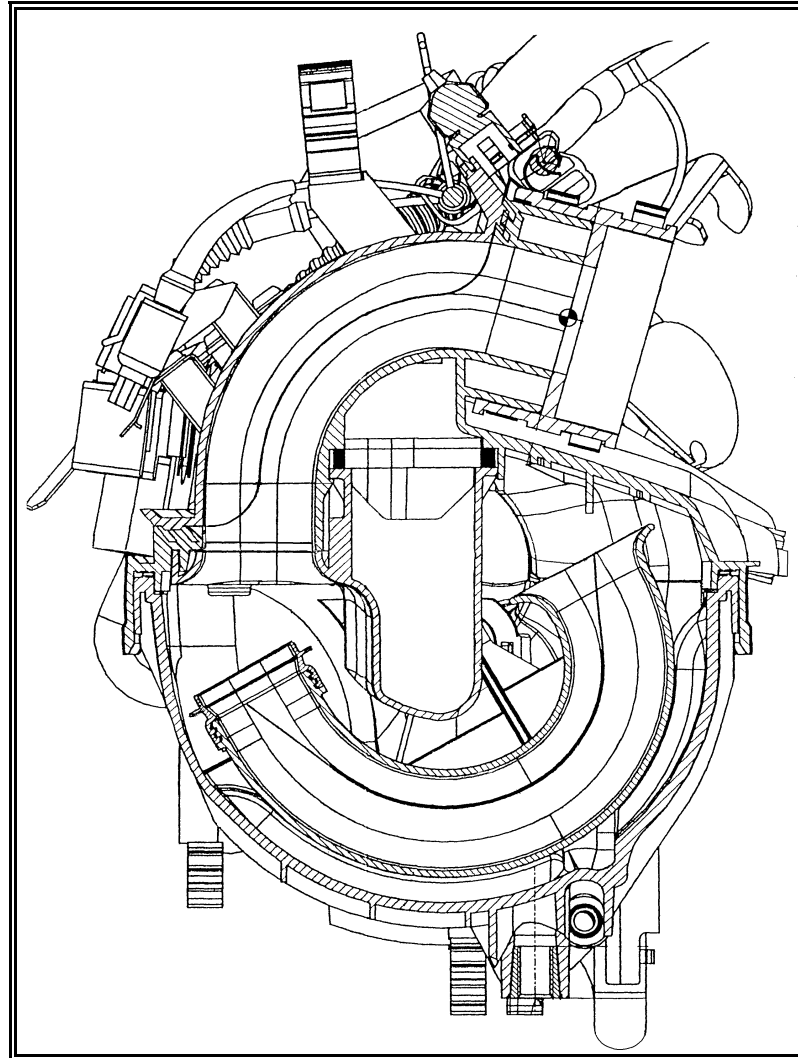
Questo motore dispone anche di un variatore di fase idraulico di tipo ON-OFF che permette di anticipare l'apertura delle valvole d'aspirazione di 25° quando è ritenuto opportuno.

L'aspirazione dell'aria viene fatta attraverso un collettore a geometria variabile attuato per depressione che permette di usare 2 configurazioni diverse:

- La configurazione di coppia presenta una lunghezza dei condotti tra la testa motore e il volume principale abbastanza lunga per permettere di sfruttare al meglio gli effetti d'onda all'ammissione nei giri intermedi.

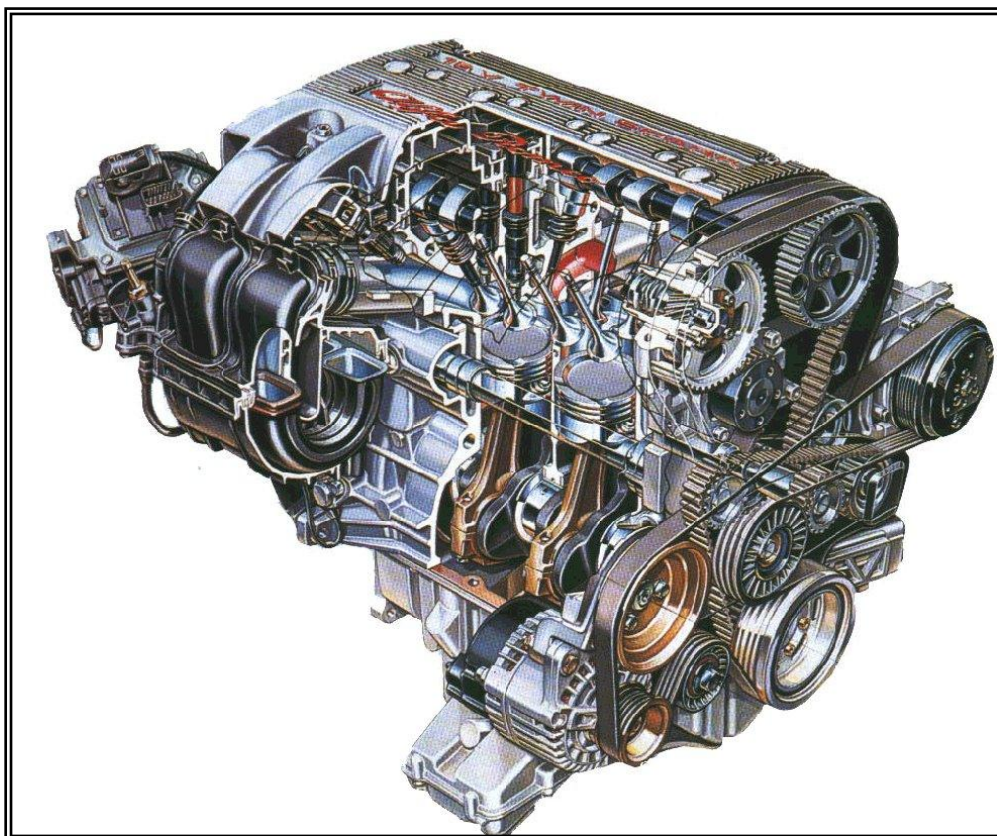


- La configurazione di potenza introduce un volume intermedio che permette di beneficiare di effetti d'onda tra la valvola d'aspirazione e questo volume in un condotto più corto, permettendo di rendere questi favorevoli a regimi più alti, dove si cerca in genere la potenza massima. La configurazione di potenza è anche usata nei bassi giri perché gli effetti d'onda risultano più favorevoli.



**Fig. 3.1 : Rappresentazione schematica del cassoncino di aspirazione a geometria variabile.**

Nella tabella sottostante vengono riportate le principali caratteristiche tecniche del motore 2.0 TS 16 valvole:



ig. 3.2 : Rappresentazione del motore Alfa 2.0 TS 16 valvole.

<b>Alesaggio</b>	83 mm
<b>Corsa</b>	91 mm
<b>Cilindrata</b>	1969.46 cm <sup>3</sup>
<b>Rapporto di compressione</b>	10:1
<b>Coppia massima</b>	180 Nm a 3900 rpm
<b>Potenza massima</b>	110 kW ( 150 cv ) a 6300 rpm
<b>Attuazione del variatore di fase</b>	Da 1600 rpm a 4000 rpm
<b>Configurazione di coppia</b>	Da 3000 rpm a 5200 rpm

## 3.2 Strumentazione utilizzata

Gli strumenti utilizzati per la catena di bassa pressione sono stati i seguenti:

- Spark plug adapter AVL ZF42
- Sensore piezoelettrico AVL GU13Z-31
- Sensore piezoelettrico AVL GU21C
- Amplificatore AVL 3066A03
- Sensore di pressione assoluta PMP4070
- Cavi di collegamento

Come si può vedere dall'elenco soprastante tutta la strumentazione riguardante la catena di bassa pressione è stata fornita dall'AVL. Questo ha consentito di avere una maggiore facilità nel montaggio degli strumenti e di non avere nessun tipo di problema legato alla loro compatibilità. Inoltre tutte le spiegazioni relative ai vari collegamenti sono sempre state descritte in modo estremamente chiaro e rigoroso, talvolta con il supporto di schemi e grafici esplicativi.

## Spark Plug Adaptor ZF42

Questo tipo di strumento di misura è una candela al cui interno è presente un trasduttore di pressione. Il disegno della parte esterna di questo strumento è molto simile a quello delle candele standard usate oggi in campo automobilistico, questo rende più agevole sia la fase di montaggio che quella di smontaggio dello strumento.



**Fig. 3.3 : Immagine della candela strumentata utilizzata sul motore Alfa nella sala prove.**

**Spark Plug adaptor ZF4**

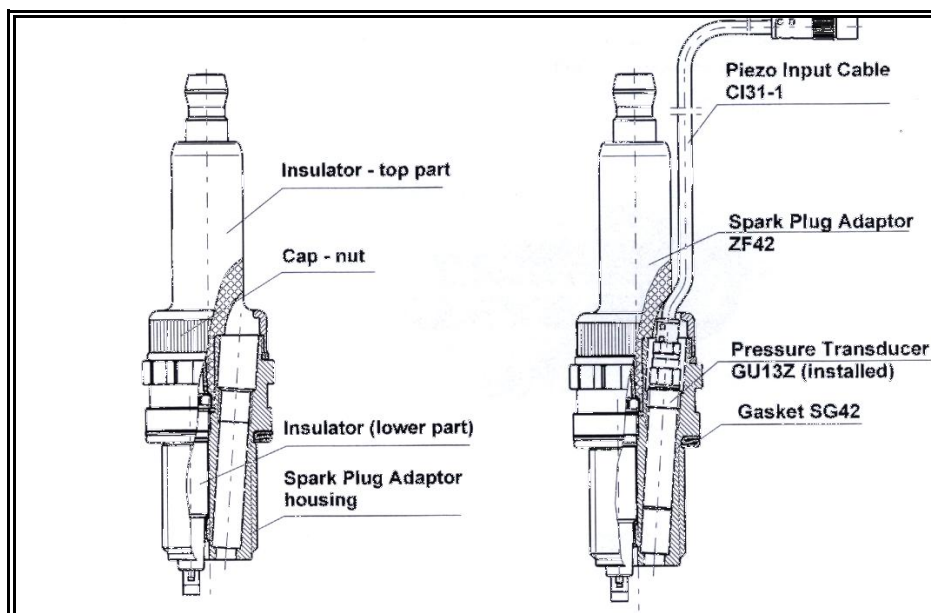


Fig. 3.4 : Spark Plug adaptor, a sinistra senza e a destra con il trasduttore di pressione

### Sensore Piezoelettrico GU13Z-31

Questo strumento ha come peculiarità quella di avere dimensioni molto ridotte, permettendo così il suo utilizzo anche con adattatori per candele differenti da quello utilizzato. E' uno strumento che garantisce una buona resistenza alla temperatura e una migliore accuratezza anche quando il motore funziona a pieno carico.

Il piezoelettrico è stato utilizzato per misurare la pressione dinamica all'interno della camera di combustione. Le principali caratteristiche tecniche di questo strumento sono:

Range di misurazione	<i>0-200 bar</i>
Sensibilità	<i>15pC/bar</i>
Linearità	$\leq \pm 0,3\%$
Temperatura massima di funzionamento	<i>Max 400°C</i>
Massa	<i>1,2 g</i>

## Sensore piezoelettrico AVL GU21C

Il sensore GU21C insieme all'adattatore AE02 raffreddato ad acqua è stato utilizzato per misurazioni di bassa pressione nei condotti d'aspirazione e di scarico nel motore a 4T: in questo caso il sistema deve essere refrigerato da un fluido per permettere al sensore di mantenere la linearità anche ad elevate temperature. Le caratteristiche principali dello strumento sono:

Range di misurazione	<i>0-250 bar</i>
Sensibilità	<i>35pC/bar</i>
Linearità	$\leq \pm 0,3\%$
Temperatura massima di funzionamento	<i>Max 400°C</i>
Diametro	<i>6,2 mm</i>



**Fig. 3.5 : Sensore di pressione dinamica**

## Sensore di pressione assoluta PMP4070

Per poter misurare la pressione assoluta nei condotti di aspirazione è stato utilizzato il sensore di pressione assoluta PMP4070 dell'AVL. Per un corretto funzionamento occorre che il sensore sia attaccato in posizione verticale, su un supporto esente da vibrazioni e lontano da fonti di calore, con il foro di misurazione rivolto verso il basso e collegato con un tubo di gomma del diametro di 0.75\*2.4mm al trasduttore GU21C; inoltre deve essere ad una distanza non superiore a 1.5m dal sensore piezoelettrico. Il cavo di collegamento va attaccato all'uscita del moltiplicatore di impulsi mediante un adattatore a 3 uscite: una per quello che porta il segnale dell'encoder, una per l'alimentatore e una per il cavo che porta il segnale allo chassis BNC2090.

Le caratteristiche del sensore di pressione assoluta PMP4070 sono:

Range di misurazione	0-5 bar
Sensibilità	1 V/bar
Linearità	$\lt \pm 0.08\%$



Fig. 3.6 : Sensore di pressione assoluta

## Amplificatore 306603

Questo tipo di amplificatore ha due canali in input e due in output, per poter ricevere due segnali e poterne elaborare altrettanti; i due canali sono indipendenti in modo da evitare ogni tipo di interferenza. E' uno strumento che viene utilizzato per misurare le cariche elettrostatiche che gli vengono comunicate dai trasduttori di misura piezoelettrici. Inoltre l'alta resistenza agli input permette a questo tipo di amplificatore di eseguire misurazioni quasi statiche, e di evitare in ogni momento possibili disturbi causati da varie interferenze che possono modificare il segnale acquisito. Il sistema integrato di compensazione, presente nello strumento assicura misurazioni senza errori, anche in condizioni non ottimali.

Il dispositivo di compensazione dei disturbi agisce applicando una corrente di compensazione ( $I_{comp}$ ) all'input dell'amplificatore di carica, equivalente alla corrente persa pari alla somma delle resistenze di isolamento ( $I_{insul.}$ ) dovute ai cavi di collegamento e ai trasduttori. Il principio di funzionamento è basato su un circuito di controllo, che genera una differenza di potenziale di controllo ( $U_{contr.}$ ) che a sua volta fornisce al convertitore di carica una corrente di compensazione ( $I_{comp.}$ ) attraverso un resistenza ohmica; in questo modo l'output del convertitore di carica viene mantenuto nella posizione di zero.

Ogni volta che non c'è nessun tipo di segnale in input all'amplificatore di carica, il circuito di controllo assicura comunque la compensazione dei disturbi tentando di mantenere sempre l'output del convertitore di carica permanentemente nella posizione di zero. Nel momento in cui viene passato all'amplificatore un segnale in input, immediatamente un segnale di trigger viene trasmesso al circuito di controllo, per segnare il momento in cui l'output è posizionato in zero. E' importante ricordare come, quando i segnali vengono trasmessi con intervalli aventi un periodo  $T > 1.2s$ , il circuito di controllo si trovi sempre in uno stato di permanente compensazione tentando di mantenere l'output a zero.

Questa caratteristica viene sfruttata per prevenire il rischio che il circuito di controllo diventi instabile, soprattutto quando gli intervalli tra i vari impulsi di trigger sono troppo lunghi. I segnali di trigger vengono generati internamente dal segnale di input per mezzo di un comparatore.



### 3.3 Posizionamento dei sensori di misura

#### Collettore di aspirazione

Per poter misurare gli effetti delle pulsazioni di pressione all'interno della colonna gassosa in aspirazione si è deciso di posizionare il sensore di pressione vicino alla valvola di aspirazione in modo da avere un'ottima rilevazione del fenomeno fisico.



Fig. 3.7 : Immagine che mostra il posizionamento dal sensore di pressione dell'aspirazione.

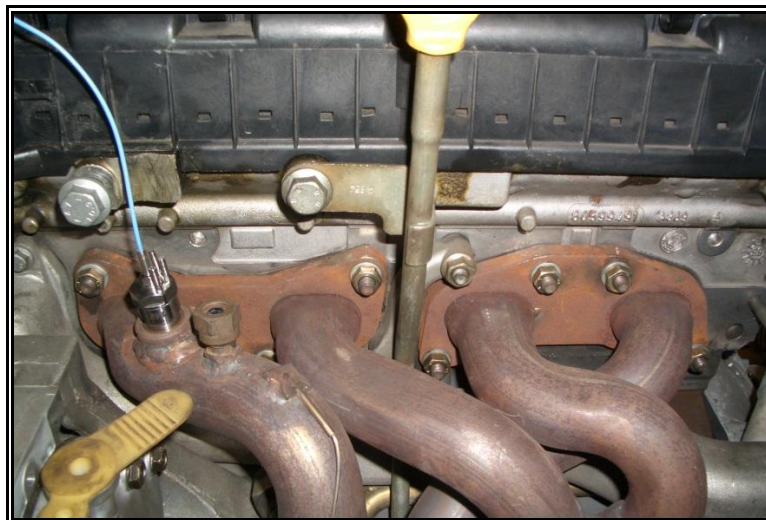
## Camera di combustione

Le misurazioni all'interno del cilindro sono state fatte utilizzando una candela strumentata fornita dall'AVL. Per poterla posizionare sono state smontate tutte le candele ed è sostituita la candela più grossa presente nel cilindro con quella strumentata (nel twin spark ogni cilindro ha una candela grossa e una piccola).

Si è fatta molta attenzione a non danneggiare in fase di montaggio il cavo di misurazione che porta all'esterno il segnale di pressione misurata all'interno del cilindro e inoltre si è ritenuto necessario schermarlo dall'impianto di accensione mediante carta stagnola. In seguito si è cercato di ridurre al minimo ogni rischio di danneggiamento da parte di eventuali fonti di calore, infatti il cavo di misura è stato portato verso il lato freddo del motore.

## Collettore di scarico

Per quanto riguarda il posizionamento del sensore allo scarico sono stati vagliate diverse soluzioni: subito a valle della valvola di scarico, sui catalizzatori, a monte e a valle del primo silenziatore. Quello che permette uno studio più accurato dei fenomeni d'onda è la posizione subito a valle della valvola di scarico. Date le elevate temperature dei gas combusti si è progettato un sistema di raffreddamento del sensore.



**Fig. 3.8 : Immagine che mostra il posizionamento dal sensore di pressione allo scarico.**

## 3.4 Potenzimetro e Freno motore

### Potenzimetro e sua regolazione

Il comando dell'acceleratore avviene per mezzo di un potenziometro analogico della Schenck che comanda un motore elettrico passo-passo. Si è dovuto stabilire il suo campo di funzionamento affinché non andasse a sollecitare in maniera eccessiva il cavo dell'acceleratore e quindi a forzare il meccanismo d'azionamento della farfalla. Per fare ciò si è stabilito il valore minimo sulla consolle di comando assegnando lo zero all'apertura minima della farfalla e il pieno carico alla massima apertura; per sicurezza si è deciso di non aprire completamente la farfalla ma di lasciarle qualche grado di gioco in modo da non forzare il sistema, in ogni caso la condizione di pieno carico viene raggiunta lo stesso.

### Freno a correnti parassite FE350S

Il principio di funzionamento di questo tipo di freno è quello di misurare mediante frenatura, la coppia motrice del motore ad un determinato numero di giri. Infatti le condizioni del motore e del freno sono caratterizzate dal momento torcente e dal numero di giri.

Il sistema è costituito oltre che dal freno, dall'alimentatore per il freno e da un indicatore di coppia che visualizza i Kgm su una bilancia o cella di carico con indicatore digitale. La coppia ed il numero di giri vengono regolati elettricamente nell'alimentatore del freno. Ad ogni posizione degli organi di comando del motore (valvola a farfalla, pompa d'iniezione) e del freno (potenziometro di regolazione) deve essere assegnata una curva caratteristica velocità-coppia. Dall'incontro della curva caratteristica del motore con quella del freno, si deve ottenere un punto d'intersezione. Per poter lavorare in forma stabile, bisogna che la curva di potenza del freno sia superiore a quella del motore in prova a velocità superiore a quella del punto d'intersezione. La corrente continua necessaria per l'eccitazione delle bobine del freno viene fornita dall'alimentatore, che provvede alla sua regolazione e quindi alla regolazione della coppia frenante, sviluppata alle varie velocità.

A secondo del tipo di motore in prova, per ottenere punti stabili di esercizio si possono scegliere diversi tipi di funzionamento:

- Funzionamento in coppia (M): la corrente di eccitazione fornita dall'alimentatore è costante e indipendente dal numero di giri del freno. In questa configurazione il potenziometro di regolazione governa l'intensità di corrente sulle bobine di eccitazione del freno. La coppia frenante varia all'aumentare della velocità in base alle caratteristiche del freno. Viene usata per motori elettrici.
- Funzionamento in coppia costante ( $M=K$ ): il valore della coppia richiesta è regolabile con il potenziometro.
- Funzionamento a caratteristica quadrata ( $Mn^2$ ): con questa regolazione, l'alimentatore eroga una corrente di eccitazione al freno proporzionale al numero di giri. L'andamento della coppia frenante risulta circa quadratico ed simile a quello della resistenza dell'aria contro un veicolo.
- Funzionamento in velocità costante ( $n=cost$ ): raggiunta la velocità impostata, l'alimentatore eroga rapidamente la corrente al freno che mantiene la velocità entro i limiti indipendentemente dal carico. Il modulo è tarato per un fondo scala di 10V di uscita analogica con 10.000 rpm. E' possibile cambiare il fondo scala di giri con un range da un minimo di 0÷2000 ad un massimo di 0÷15000.

Per effettuare le acquisizioni è stata scelta questa ultima configurazione perché le prove vengono svolte a numero di giri costante facendo variare il carico.



## 4 Impostazione Prove Sperimentali

---

La progettazione dell'esperimento risulta essere il primo passo necessario per poter avere delle risposte sufficientemente esaurienti alle domande che ci si pone volendo svolgere l'attività sperimentale.

Dato il tempo necessario alla preparazione della sala prove ed allo svolgimento dei test per ogni singolo carburante, è stato doveroso doverle eseguire in intere differenti giornate. La differenza temporale che caratterizza le prove sui differenti combustibili ha portato ad avere diverse condizioni al contorno, come pressione e temperatura ambientale. Questi fattori influiscono direttamente sulle prestazioni del motore a combustione interna, e risulta indispensabile tenerlo in considerazione una volta che si andrà a valutare i risultati ottenuti.

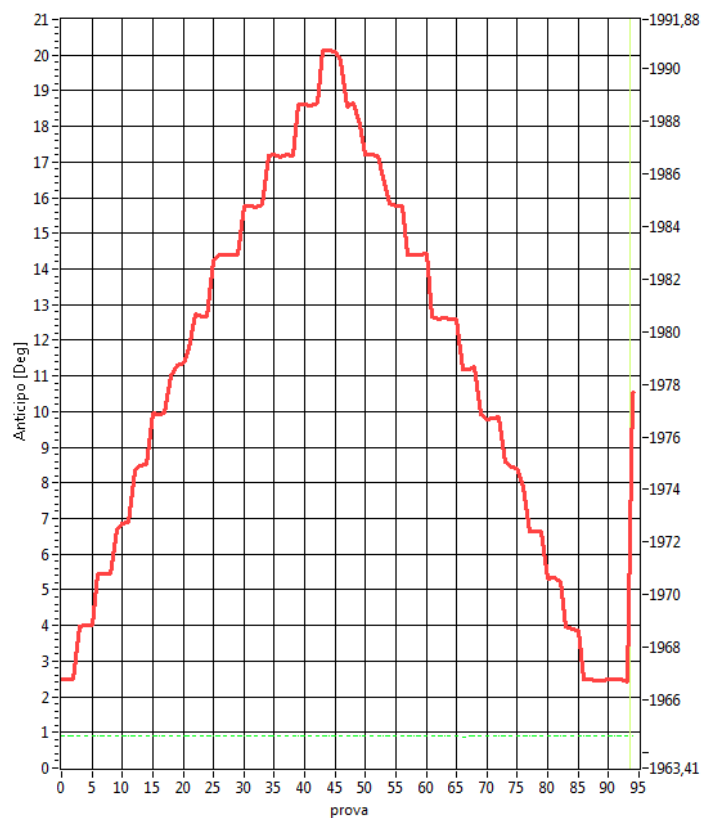
Una volta preparata la sala prove scaldando il motore con la sicurezza che l'intero sistema di alimentazione contenga esclusivamente il carburante d'analizzare, si è pronti ad iniziare le prove. I carburanti a disposizione si suddividono nelle famiglie delle benzine e dei surrogati, e verranno denominati per comodità in base alle seguenti sigle dei campioni :

**Tabella 4.1 : Classificazione dei campioni di benzine e surrogati con descrizione dei loro valori di numero di ottano, sia RON che MON.**

	Benzina					Surrogato			
	A	B	C	D	E	A1	A2	D1	D2
RON	98,3	100,4	100,5	99	95,2	97.9	97.1	99.5	100.2
MON	88,2	88,6	88,2	87,5	85,2	89.4	86.5	88.4	91.2

La giornata di prove inizia con l'acquisizione da parte di tutti i sensori posizionati sul motore, il quale gira a pieno carico e velocità regolata dall'operatore. Il range di velocità varierà da un minimo di 1500 rpm ad un massimo di 4500 rpm. Durante questa rampa di salita delle velocità di rotazioni del motore, le impostazioni della centralina saranno lasciate quelle di default della casa madre. Da tale acquisizione sarà possibile determinare la curva caratteristica del motore semplicemente plottando i valori di coppia rilasciati dal freno motore in funzione della velocità rilevata.

Fatto ciò si può passare alla fase che più interessa la detonazione, cioè quella dove viene fatto variare l'anticipo d'accensione (SA) a condizioni di carico e regime prefissati. Il range degli SA partirà da una condizione in cui la detonazione risulta essere totalmente assente, ad una condizione dove sarà invece chiaramente avvertibile. Per ogni anticipo verranno acquisiti un minimo di 50 cicli non alterati dal transitorio tra il passaggio da un anticipo al successivo. Risulta facile pensare che per benzine meno prestanti la durata della prova sarà inferiore, dovuta ad una probabile prematura interruzione. Questa variazione di anticipi avrà poi una simmetrica discesa dall'anticipo massimo fino a quello iniziale. Questo andamento degli anticipi è rappresentato dalla seguente immagine :



**Fig. 4.1** : Rappresentazione grafico dell'andamento degli anticipi d'accensione durante l'intera prova di acquisizione per carico e regime prefissati. In questo caso esplicativo, la benzina su cui è stata effettuata la prova è il campione commerciale (E), a condizioni motoristiche di pieno carico e regime 4500 rpm.

Tali prove servono a determinare il ciclo indicato e gli indici di detonazione, capendo così l'andamento del rilascio del calore e del potere antidetonante dei vari combustibili. Le prove sono eseguite a diversi carichi e regimi del motore. Una tabella sulle differenti condizioni di funzionamento del motore a cui le prove sono state eseguite è qui riportata :

**Tabella 4.2 : Valori di carico, regime, lambda ed anticipo a cui sono state effettuate le prove.**

Carico [%]	Regime [rpm]	Lambda [ ]	Anticipi [ °]
50	1500	Valore di serie	Valore fisso di serie
	3000	Valore di serie	Valore fisso di serie
	4500	Valore di serie	Valore fisso di serie
70	1500	1	Anticipi variabili
	3000	1	Anticipi variabili
	4500	1	Anticipi variabili
100	1500	0,9	Anticipi variabili
	3000	0,9	Anticipi variabili
	4500	0,9	Anticipi variabili

Come si può osservare da tale tabella, per le prove a carico del 50% non sono stati fatti variare gli anticipi d'accensione. Questo perché l'interesse per tale prova è stato rivolto esclusivamente al consumo specifico ed alle prestazioni globali del motore. Per i rimanenti altri carichi, invece, le prove sono state eseguite a SA variabile secondo la convenzione prima descritta.





# 5 Indici di Detonazione

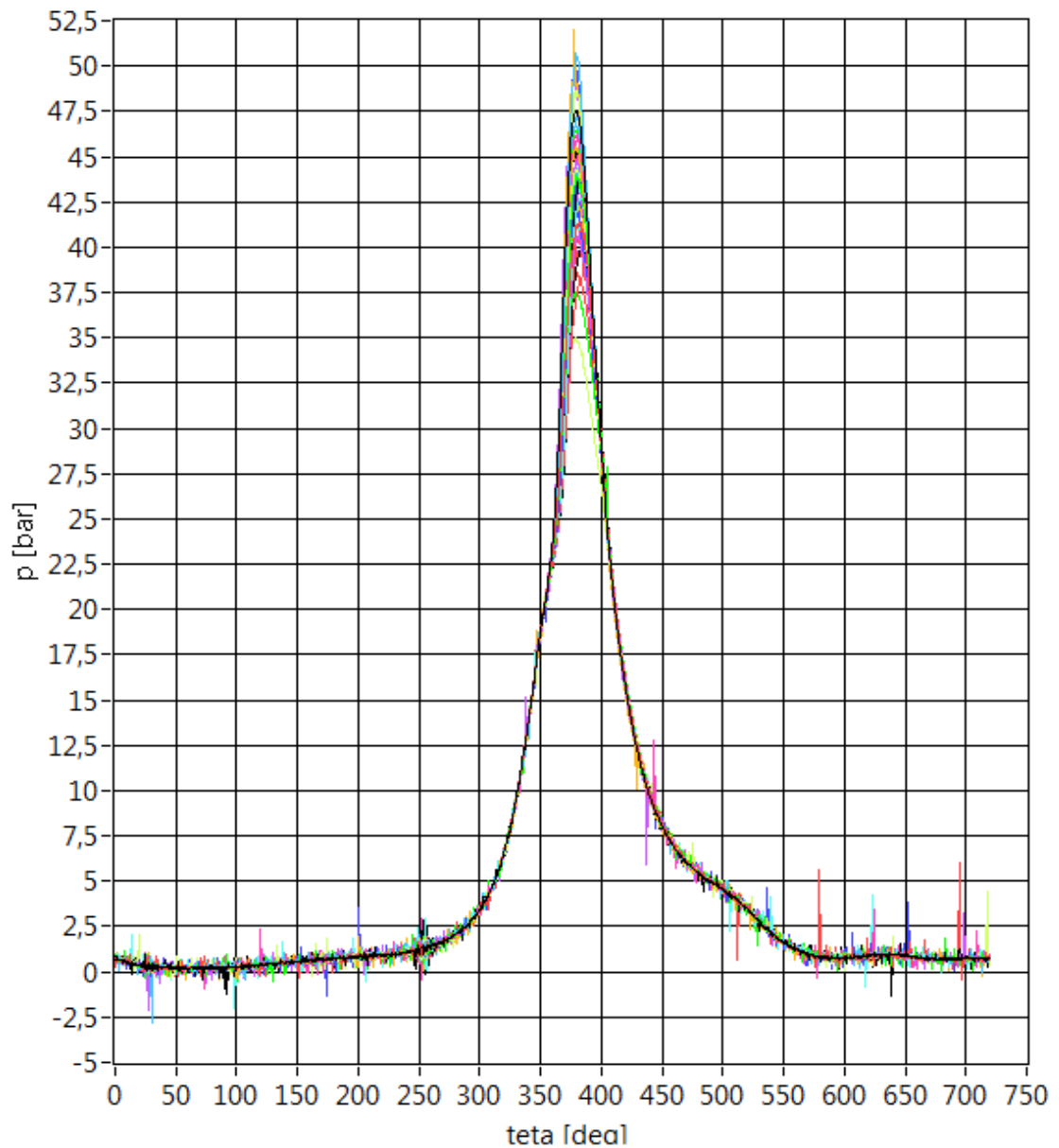
---

## 5.1 Trattamento segnale in ingresso

Il fenomeno della detonazione è stato identificato lavorando sul segnale di pressione in ingresso proveniente dalla candela strumentata posta sul secondo cilindro del motore Alfa. Per poter isolare il fenomeno e per dargli un miglior significato, è stato prima però necessario trattare il segnale elettrico grezzo.

Per alcuni risultati ottenuti, sono state eseguite delle medie su più cicli, in modo che andassero a ridursi gli effetti spuri presenti nelle singole acquisizioni cicliche e si riuscisse a rappresentare un andamento più generale del fenomeno. Come contro, così facendo, si riduce drasticamente l'effetto della dispersione ciclica, ottenendo grandezze medie che non si riferiscono ad alcun ciclo fisico effettivamente descritto dal ciclo termodinamico all'interno del cilindro. Sarà comunque utile per ricavare parametri che sono funzione lineare della pressione, come pressione media indicata, coppia e potenza, ma non quelle di dipendenza più complessa che caratterizzano il processo di combustione, come la curva di rilascio del calore e la frazione di massa combusta.

Nella seguente figura (Fig. 5.1) si può notare l'effetto della dispersione ciclica sulle pressioni dei singoli cicli all'interno della camera di scoppio a prefissate condizioni di funzionamento, e come questo fenomeno possa apportare una variazione sulla pressione massima raggiungibile di oltre il 30% rispetto al ciclo mediato alle stesse condizioni:



**Fig. 5.1** : Grafico della pressione nel cilindro in funzione angolo di manovella per 50 cicli utilizzando benzina commerciale denominata E. Le condizioni di funzionamento sono state mantenute costanti, 4500 rpm a pieno carico con  $\lambda=0,9$ . Anticipo d'accensione fissato a  $20^\circ$ . Si può osservare il grande campo di variazione delle curve.

Dopo aver eliminato eventuali cicli transitori per quanto riguarda l'anticipo d'accensione, i cicli presi in considerazione sono stati 50, ed è stata applicata la seguente media (Eq. 5.1) al variare dell'anticipo stesso:

**Eq. 5.1**

$$\bar{P}_{cyl}(a,n) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T P_{cyl\_i}(a,n)$$

ove :

$\bar{P}_{cyl}$  = segnale di pressione mediato

$P_{cyl\_i}$  = segnale di pressione riferito al ciclo i-esimo

a = indice riferito all'anticipo di accensione

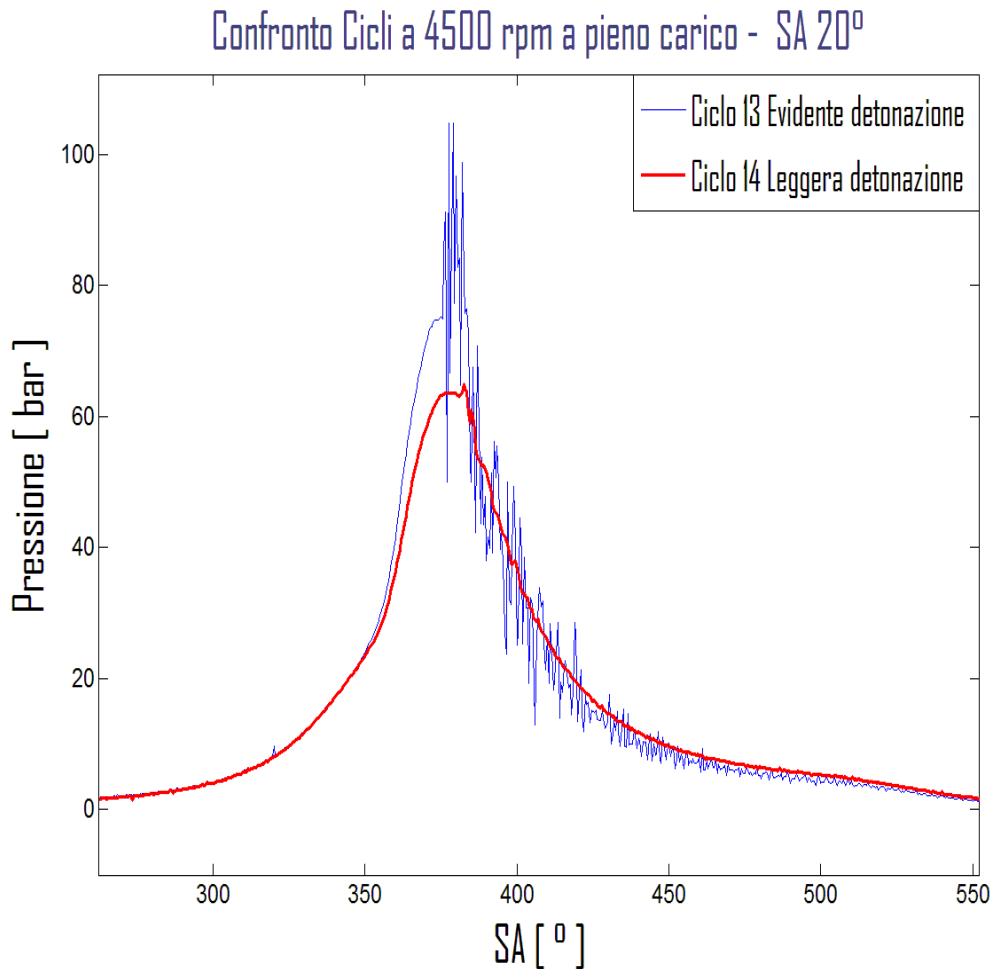
n = indice riferito al numero di punto acquisito, proporzionale a grado di manovella

i = indice riferito al ciclo considerato

T = numero di cicli presi in considerazione dalla media ( nel nostro caso 50 )

Come detto precedentemente, per altri risultati più specifici rispetto ai singoli cicli, non è stata applicata la mediazione dei dati in modo da non perdere informazioni importanti, a discapito di un più alto livello di disturbo, comunque confinato ad un ordine di grandezza inferiore al fenomeno della detonazione. Questo approccio è stato adottato, per esempio, quando ci si trova ad anticipi intermedi, cioè quando il fenomeno, pur presente, non lo è in tutti i cicli. In questi casi, oltre al livello di detonazione presente, è un buon indice anche il rapporto tra il numero dei cicli detonanti ed il numero di quelli osservati.

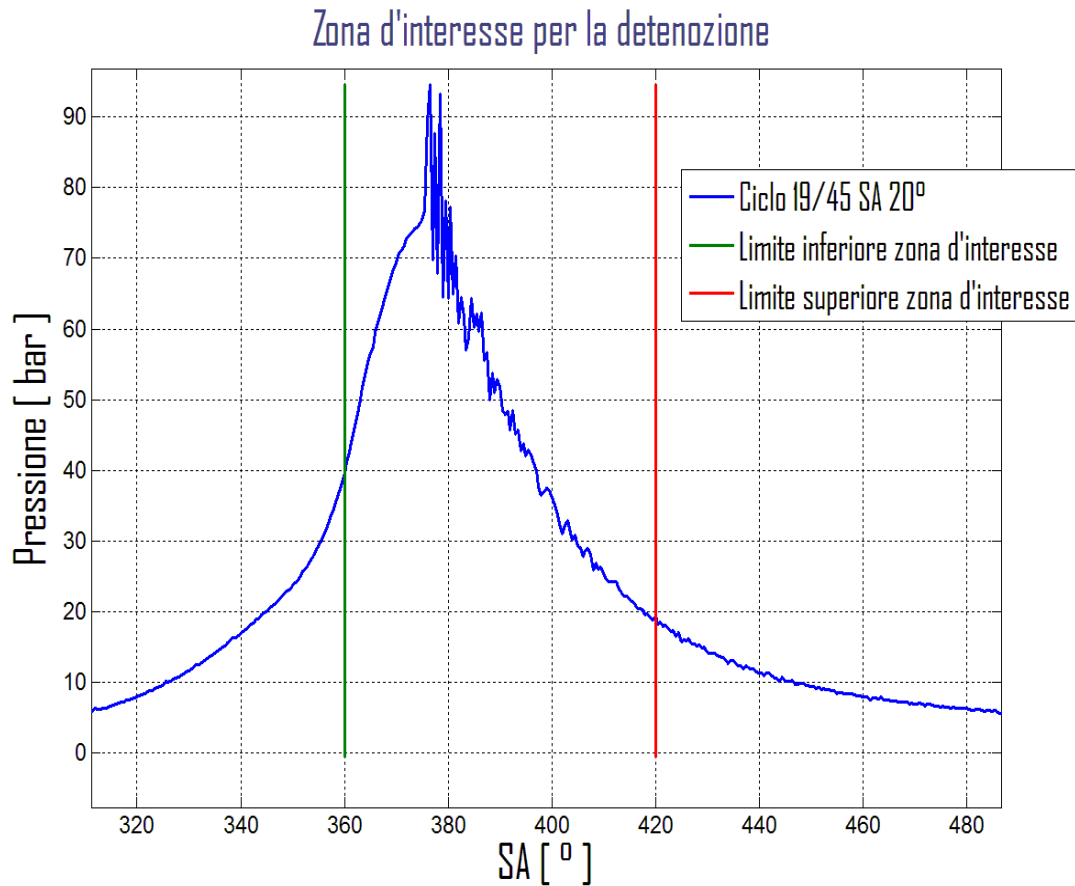
Il seguente grafico (Fig. 5.2) mostra come due cicli successivi, quindi oltre che in identiche condizioni d'esercizio anche molto ravvicinati nel tempo, possano essere caratterizzati da un comportamento molto diverso tra loro sia per quanto riguarda le pressioni in giuoco, che per le repentine variazioni dovute alla improvvisa comparsa di una forte detonazione :



**Fig. 5.2 :** Grafico di confronto delle pressioni di 2 cicli successivi a condizioni di funzionamento fissate di 4500 rpm, pieno carico ed SA=20°. Qui è facile notare oltre le diverse pressioni rilevate, anche una forte differenza anche per quanto riguarda la detonazione avvertibile.

Una ulteriore manipolazione fondamentale dei dati grezzi è stata la finestatura nel dominio del tempo. Questa operazione è stata eseguita poiché, grazie allo stato dell'arte del motore a combustione interna, si è a piena conoscenza che l'incipiente detonazione ha luogo dopo il punto morto superiore e non ha luogo per più di 60° di manovella, pur considerando le diverse velocità a cui viene testato il motore.

La finestra deve comunque essere abbastanza grande da contenere l'intero evolversi del fenomeno. Questo range di interesse è mostrato nel seguente grafico esplicativo (Fig. 5.3):



**Fig. 5.3 :** Grafico rappresentante la zona di interesse per quanto riguarda il fenomeno della detonazione. Le condizioni di funzionamento del motore di tale acquisizione è di 4500 rpm, carico 100% con anticipo di 20°. A queste condizioni di alti regimi la detonazione risulta essere molto accentuata. La finestratura necessaria ad isolare tale fenomeno è limitata proprio a questo range.

Nell'isolare il campo di interesse bisogna tener comunque conto della potenziale possibilità di introduzione di armoniche legate al periodo di acquisizione, cioè all'introduzione dell'errore di leakage. Una non appropriata finestra, oltre a provocare tale problematica, potrebbe distorcere il segnale reale e modificarne lo spettro sul quale ci si basa per l'ottenimento degli indici di detonazione.

Dopo aver preso in considerazione diverse forme di finestre e confrontandone i risultati, si è optato per la scelta di una finestra hanning, la quale restituisce un buon compromesso tra ampiezza di banda e selettività.

L'operazione, eseguita nel dominio del tempo, è descritta semplicemente dalla formula (Eq. 5.2) :

$$\text{Eq. 5.2} \quad P_{cyl\_win}(n) = \begin{cases} P_{cyl}(n) \cdot win(n) & \text{per } 360 \leq n \leq 420 \\ 0 & \text{per } n < 360 \text{ \& } n > 420 \end{cases}$$

ove:

$P_{cyl\_win}(n)$  = segnale di pressione del cilindro 2 finestrato

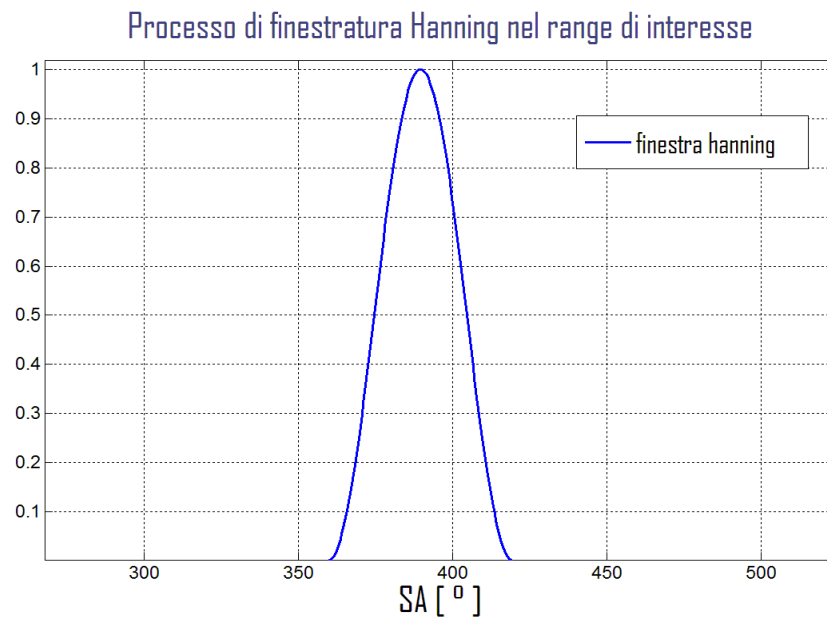
$P_{cyl}(n)$  = segnale di pressione del cilindro 2 funzione del punto di acquisizione

$win(n)$  = funzione finestra definita punto per punto ( n )

n = indice riferito al numero di punto acquisito, proporzionale a grado di manovella

Come si può notare dalla funzione (Eq. 5.2), essa è azzerata artificialmente per i punti che precedono il PMI e succedono il 420° grado di manovella, quindi a 60 gradi dopo lo stesso. La parte di ciclo complementare è finestrato dalla hanning.

Il grafico (Fig. 5.4) mostra come la curva si raccordi ottimamente sulle sue code, non incorrendo in Leakage.



**Fig. 5.4 :** Grafico rappresentante il processo di finestratura tramite una Hanning, applicata tra il grado 360° ed il 420°. Grazie alla sua forma evita l'errore di leakage, isolando la zona d'interesse.

Come già detto, l'encoder utilizzato nella sala prove ha la possibilità di impostare due diverse risoluzioni : uno e mezzo grado. Questo significa che nelle prove dove l'acquisizione è stata effettuata utilizzando il mezzo gradi di risoluzione dell'encoder, il range di punti per i quali è applicata la finestra deve essere raddoppiato (  $720 \leq n \leq 840$  ).

E' stato quindi possibile applicare la trasformata di Fourier al segnale eventualmente mediato e comunque finestrato, potendo valutare così le ampiezze delle sinusoidi che lo compongono. Sempre dallo stato dell'arte inerente al fenomeno, si è a conoscenza che le frequenze che caratterizzano la detonazione sono comprese nel seguente range (Eq. 5.3) :

Eq. 5.3 
$$f = 7.5 \div 17 \text{ kHz}$$

e poiché esse sono di amplitudine relativamente basse confronto a quelle che caratterizzano il ciclo termodinamico che le nascondono, è opportuno eliminare queste ultime applicando un filtro passa-banda. Tale filtro avrà come estremi di applicazione proprio il range appena specificato (Eq. 5.3), cioè frequenze ben più alte di quelle del ciclo stesso.

Il seguente grafico (Fig. 5.5) mostra sia il segnale di pressione grezzo di un singolo ciclo preso a campione, che due suoi spettri.

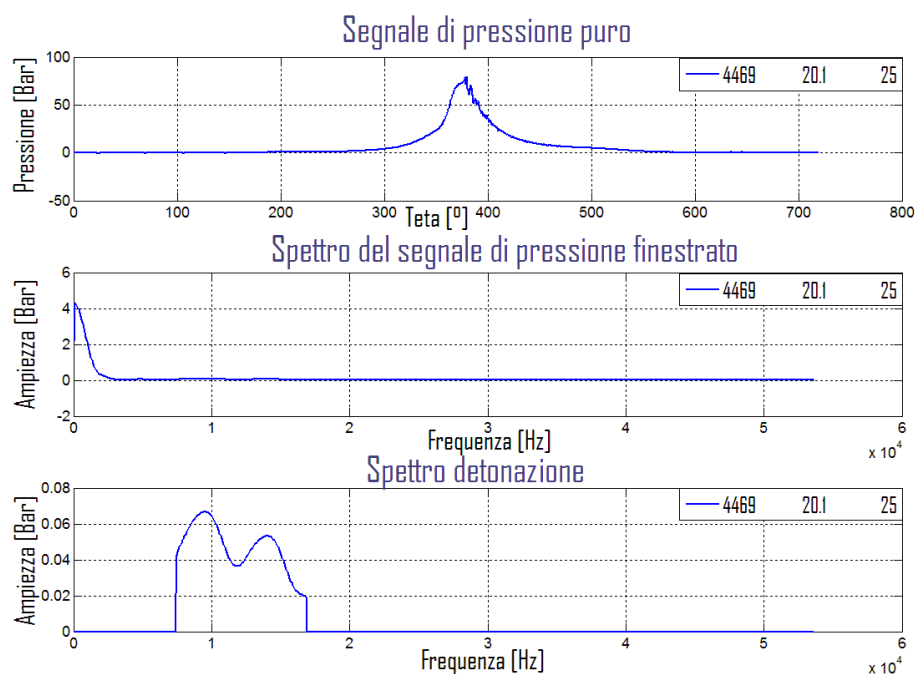


Fig. 5.5 : Grafico plurimo con la rappresentazione in concomitanza sia del segnale di pressione grezzo di un singolo ciclo, del suo intero spettro e dello spettro tagliato alle frequenze interessanti la detonazione. Come si legge dalla legenda, il ciclo in esame è il 25° su 50 la cui SA risulta essere 20°, mentre la velocità di rotazione è pari a 4500 rpm.



Il primo spettro di questo (Fig. 5.5/2) mostra le armoniche presenti in tutto il dominio delle frequenze, mentre il secondo (Fig. 5.5/3) le sole armoniche responsabili della detonazione, come si può notare dal suo asse delle ascisse. Il contributo delle altre sinusoidi è stato annullato tramite un filtro passa-banda.

Le operazioni eseguite nel dominio delle frequenze hanno prodotto uno spettro modificato rispecchiato dalla seguente equazione (Eq. 5.4) :

$$\text{Eq. 5.4} \quad S_{\text{mod}}(\omega) = \begin{cases} S(\omega) & \text{per } 7.5\text{kHz} \leq \omega \leq 17\text{kHz} \\ 0 & \text{per } \omega < 7.5\text{kHz} \ \& \ \omega > 17\text{kHz} \end{cases}$$

ove:

$S_{\text{mod}}(\omega)$  = è lo spettro modificato utilizzato per determinare le armoniche assoggettate alla detonazione

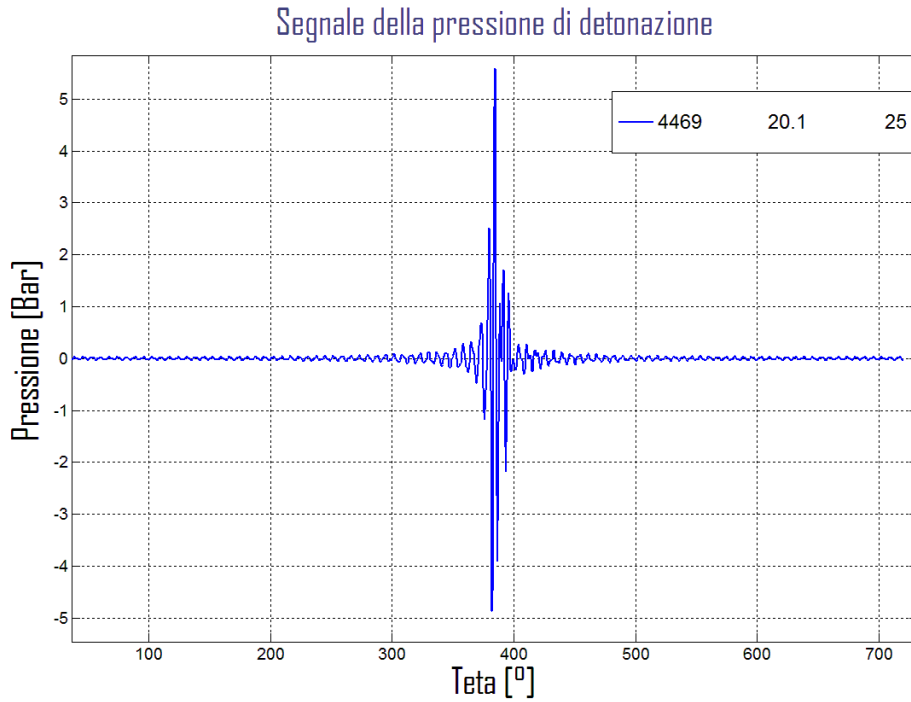
$S(\omega) = \text{fft}\{P_{\text{cyl\_win}}(n)\}$  è lo spettro del segnale di pressione del singolo ciclo nel secondo cilindro, finestrato tramite hanning

$\omega$  = campo di frequenze dominio dello spettro del segnale di pressione

Di questo ultimo spettro depurato dalle armoniche fuori interesse, è possibile eseguirne l'anti-trasformata di Fourier ( IFFT ), in modo da poter identificare il contributo delle sole armoniche assoggettate alla detonazione nel dominio del tempo \*\*. Esso è interessante per valutare, rapportandolo alle pressioni in giuoco, di che entità il deleterio effetto della detonazione influisce sul ciclo termodinamico.

\*\* In realtà tutti grafici, per migliore comprensione nel loro studio, sono espressi in funzione dell'angolo di manovella, che comunque risulta essere proporzionale al tempo e dipendente, fissata la frequenza di acquisizione, dalla sola velocità di rotazione del motore.

Un esempio è apprezzabile dal seguente grafico ( Fig. 5.6 ) :



**Fig. 5.6** : Grafico rappresentante la IFFT delle armoniche assoggettate alla detonazione. Il segnale preso come esempio si riferisce a quello di pressione di un singolo ciclo a 4500 rpm e 20° di anticipo (SA). L'ultimo numero nella legenda permette di identificarlo all'interno dei dati ottenuti dalla prove, e nel particolare si riferisce al 25° ciclo acquisito alle precedenti esplicitate condizioni.

Eq. 5.5 
$$P_{\text{det}}(n) = \text{ifft} \{ S_{\text{mod}}(\omega) \}$$

ove :

$P_{\text{det}}(n)$  = pressione nel dominio del tempo assoggettato al fenomeno della detonazione

$S_{\text{mod}}(\omega)$  = è lo spettro modificato utilizzato per determinare le armoniche assoggettate alla detonazione

Le funzioni fino ad ora trovate saranno quelle su cui si baseranno gli indici di denotazione in modo da poter confrontare la caratteristica antidetonante delle diverse benzine e surrogati. Tali indici sono dettagliati nel paragrafo seguente.

## 5.2 Formulazione

Gli indici di detonazione confrontati in questo elaborato sono stati essenzialmente quattro, e permettono di valutare il fenomeno sia nel dominio del tempo che in quello delle frequenze. Si è scelto di considerarne diversi per confrontare la loro veridicità pur utilizzando differenti approcci.

La loro formulazione è esplicitata come segue ( Eq. 5.6 ) :

$$\begin{aligned} \text{I.} \quad & MAPO = \max \left( |P_{cyl\_win}| \right)_{\vartheta_i}^{\vartheta_f} \\ \text{II.} \quad & INT = \frac{1}{\vartheta_f - \vartheta_i} \int_{\vartheta_i}^{\vartheta_f} |P_{cyl\_win}| d\vartheta \end{aligned}$$

Eq. 5.6

$$\begin{aligned} \text{III.} \quad & Ss = \text{mean} \left[ |(S_{\text{mod}}(\omega))| \right] \\ \text{IV.} \quad & Sa = \max \left[ \text{ifft} (S_{\text{mod}}(\omega)) \right] \end{aligned}$$

ove :

MAPO = indice di detonazione che prende il nome dall'acronimo "Maximum Amplitude Pressure Oscillation"

INT = indice di detonazione che si basa sulla funzione di Integrazione

Ss = indice di detonazione ricavata dall'analisi dello spettro

Sa = sensitivity, indice di detonazione ricavata dall'analisi dell'anti-trasformata dello spettro

$P_{cyl\_win}$  = segnale di pressione del cilindro 2 finestrato

$\vartheta_i$  = angolo di manovella da cui si inizia ad osservare il fenomeno

$\vartheta_f$  = angolo di manovella in cui si termina di osservare il fenomeno

$S_{\text{mod}}(\omega)$  = è lo spettro modificato utilizzato per determinare le armoniche assoggettate alla detonazione

Come si può notare, i primi due indici si basano direttamente sul segnale di pressione all'interno del cilindro a cui è stata applicata preventivamente la finestatura, mentre i successivi due lavorano sullo spettro dello stesso.

Guardando più nel dettaglio si nota come l'indice denominato MAPO considera come effetto della detonazione la sola pressione massima del ciclo. Nel caso di detonazione, come anche nel caso di regolare combustione, il massimo della pressione dipenderà fortemente sia dalla velocità di rotazione che dal carico, e quindi risulta cruciale la posizione corretta della finestra all'interno del ciclo.

L'indice INT pur basandosi, come il precedente, sul segnale di pressione finestrato cerca di valutare l'intensità della detonazione non solo dal picco massimo della curva, ma valutandone un eventuale susseguirsi effettuando un'operazione di integrazione, che nel caso di un segnale acquisito come nel nostro, diviene una semplice operazione di sommatoria (Eq. 5.7) :

Eq. 5.7 
$$INT = \frac{1}{\vartheta_f - \vartheta_i} \int_{\vartheta_i}^{\vartheta_f} |P_{cyl\_win}| d\vartheta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_{cyl\_win}(i)|$$

ove :

$P_{cyl\_win}$  = segnale di pressione del cilindro 2 finestrato

$\vartheta_i$  = angolo di manovella da cui si inizia ad osservare il fenomeno

$\vartheta_f$  = angolo di manovella in cui si termina di osservare il fenomeno

$N$  = numero di punti tenuti in considerazione per la determinazione della detonazione all'interno di un ciclo

$i$  = i-esimo punto di campionamento del segnale di pressione ciclo

L'indice denominato Ss, a differenza dei precedenti due, si basa sugli spettri dei segnali di pressione all'interno del cilindro adeguatamente trattati. Tali spettri, come precedentemente spiegato, sono tenuti in considerazione solo per la parte di spettro inerente al fenomeno della detonazione. Quindi, riprendendo la nomenclatura usata nel paragrafo precedente, le operazioni necessarie ad ottenere lo spettro utilizzato direttamente dall'indice di sensitivity sono illustrate dalle equazioni (Eq. 5.8) :

$$\begin{aligned}
 S(\omega) &= \text{fft}(P_{cyl\_win}) \\
 \text{Eq. 5.8} \quad S_{\text{mod}}(\omega) &= \begin{cases} S(\omega) & \text{per } 7.5\text{kHz} \leq \omega \leq 17\text{kHz} \\ 0 & \text{per } \omega < 7.5\text{kHz} \ \& \ \omega > 17\text{kHz} \end{cases} \\
 Ss(i) &= \text{mean} \left[ \left| S_{\text{mod}_i}(\omega) \right| \right]
 \end{aligned}$$

ove:

$S(\omega)$  = lo spettro del segnale di pressione del singolo ciclo nel secondo cilindro, finestrato tramite hanning

$P_{cyl\_win}$  = segnale di pressione del cilindro 2 finestrato

$S_{\text{mod}}(\omega)$  = è lo spettro modificato utilizzato per determinare le armoniche assoggettate alla detonazione

$\Omega$  = campo di frequenze dominio dello spettro del segnale di pressione

$Ss(i)$  = indice di sensitivity del knock utilizzando lo spettro

$i$  = riferimento che scandisce gli anticipi ( SA ) presi in considerazione di volta in volta

L'ultimo indice analizzato è denominato Sa e, come il precedente, si basa sugli spettri dei segnali di pressione all'interno del cilindro opportunamente trattati, che vengono poi successivamente riportati nel dominio del tempo tramite l'anti-trasformata di Fourier.

Le operazioni necessarie ad ottenere lo spettro e poi la sua anti-trasformata di Fourier utilizzata dall'indice di sensitivity Sa sono illustrate dalle equazioni ( Eq. 5.9 ) :

$$\begin{aligned}
 S(\omega) &= \text{fft}(P_{cyl\_win}) \\
 \text{Eq. 5.9} \quad S_{\text{mod}}(\omega) &= \begin{cases} S(\omega) & \text{per } 7.5\text{kHz} \leq \omega \leq 17\text{kHz} \\ 0 & \text{per } \omega < 7.5\text{kHz} \ \& \ \omega > 17\text{kHz} \end{cases} \\
 Sa(i) &= \max \left[ \text{ifft}(S_{\text{mod}_i}(\omega)) \right]
 \end{aligned}$$

ove:

$S(\omega)$  = lo spettro del segnale di pressione del singolo ciclo nel secondo cilindro, finestrato tramite hanning

$P_{cyl\_win}$  = segnale di pressione del cilindro 2 finestrato

$S_{\text{mod}}(\omega)$  = è lo spettro modificato utilizzato per determinare le armoniche assoggettate alla detonazione

$\omega$  = campo di frequenze dominio dello spettro del segnale di pressione

$Sa(i)$  = indice di sensitivity del knock basato sull'anti-trasformata di Fourier dello spettro

$i$  = riferimento che scandisce gli anticipi ( SA ) presi in considerazione di volta in volta

## 5.3 Normalizzazione

Gli indici descritti fin ora soffrono di una problematica che li rende inconfrontabili da prova a prova facendogli perdere così la loro funzione principale. Questo è dovuto al fatto che, spazzolando le diverse velocità del motore e carichi, il segnale si modifica anche nella zona che interessa la detonazione. Tali variazioni si avvertono sia nel dominio del tempo a causa di differenti pressioni nel cilindro, che nel dominio delle frequenze poiché varia il rumore di fondo il quale comunque inserisce armoniche all'interno dello spettro.

Per poter rapportare gli indici si è così deciso di normalizzarli rispetto ad una loro condizione definita “standard”, cioè condizione per cui gli anticipi non sono tali da innescare il fenomeno della detonazione pur continuando comunque ad avere curve di pressioni pulite paragonabili tra loro \*\*. Tale operazione di normalizzazione deve essere eseguita ad ogni carico e velocità di funzionamento del motore. La scelta dei cicli di riferimento presi in considerazione per effettuare la normalizzazione è fondamentale per quanto riguarda i futuri esami scrupolosi effettuati sugli indici stessi.

Durante la fase di elaborazione dati è stata vagliata la possibilità di utilizzare sia un ciclo di riferimento ad anticipo normalmente dettato da centralina a tali condizioni di funzionamento, e sia un ciclo appartenente al più basso anticipo considerato in ogni prova. Dopo varie considerazioni si è deciso di utilizzare il secondo per diverse motivazioni. La principale è che, in questo modo, si riesce ad ottenere una risoluzione più alta, soprattutto ad alti regimi e carichi, dove gli indici di detonazione agli anticipi dettati originariamente dalla centralina possono essere già alti a causa delle vicine condizioni di incipiente detonazione. Questo è dimostrato anche dal segnale d'uscita del sensore antibattito di serie sul motore che, in tali condizioni, risultava intervenire per ridurre gli anticipi stessi. Optando per imporre un ciclo di riferimento tra quelli ad anticipo più basso si è sicuramente in condizioni ben lontane dalla detonazione, e quindi questa scelta dà luogo ad un valore unitario dell'indice di detonazione normalizzato proprio ad anticipi prossimi allo zero. Bisogna comunque valutare che a questi bassi valori di indici sono associate anche delle relative basse pressioni in giuoco, il che deve far riflettere su dove posizionare un eventuale limite di detonazione in base alla natura dei diversi indici.

Detto ciò, tutte le curve standard utilizzate qui di seguito sono state scelte con il criterio appena descritto e con l'obiettivo di rendere confrontabili tra loro gli indici di detonazione normalizzati, sia a condizioni di funzionamento diverse utilizzando lo stesso combustibile, e sia diverse tipologie di combustibili a parità di queste.

\*\* Per curve di pressioni pulite si intende che le pressioni in giuoco non sono intaccate dal knock, ma comunque dipendenti dai rpm e dal carico. Fissati questi 2 parametri, la curva di pressioni standard sarà il metro di paragone per tutte le curve a tali condizioni e differenti anticipi.

Per quanto riguarda l'indice MAPO, esso viene normalizzato rispetto al massimo valore di pressione della curva standard, come reso comprensibile dalla seguente equazione (Fig. 5.10) :

Eq. 5.10

$$MAPO_{norm} = \frac{\max \left( |P_{cyl\_win}| \right)_{\vartheta_i}^{\vartheta_f}}{\max \left( |P_{cyl\_win}|_{standard} \right)_{\vartheta_i}^{\vartheta_f}}$$

ove :

$MAPO_{norm}$  = indice di detonazione che prende il nome dall'acronimo "Maximum Amplitude Pressure Oscillation" normalizzato.

$P_{cyl\_win}$  = segnale di pressione del cilindro 2 finestrato

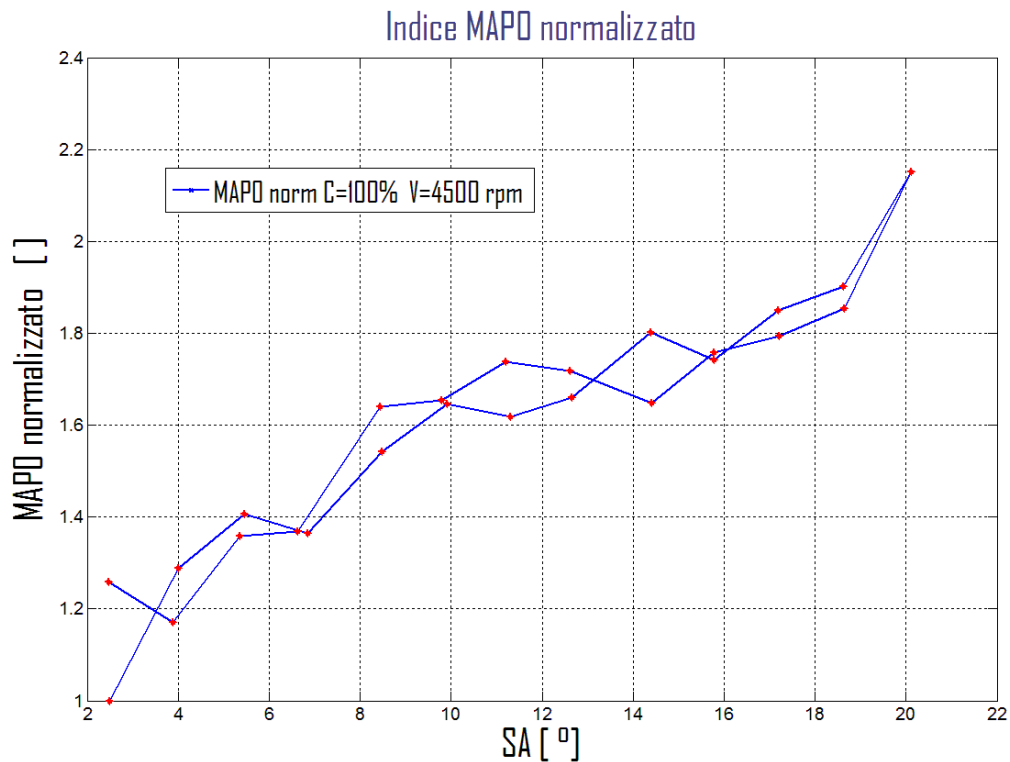
$|P_{cyl\_win}|_{standard}$  = modulo del segnale di pressione standard del cilindro 2 finestrato

$\vartheta_i$  = angolo di manovella a cui si inizia ad osservare il fenomeno

$\vartheta_f$  = angolo di manovella a cui si termina ad osservare il fenomeno

Dal seguente grafico (Fig. 5.7) è possibile visionare come varia tale indice al variare dell'anticipo d'accensione SA per una benzina commerciale, classificata nei test come benzina E. Per la conformità della prova, i futuri grafici avranno una fase di salita ed una di discesa, che potrebbero discostarsi tra loro, anche se pur di poco. I due rami sono dovuti alla scelta della variazione a piramide degli anticipi, che partendo da valori bassi raggiungono un massimo per poi ritornarci a ritroso creando una prova potenzialmente simmetrica.





**Fig. 5.7** : Tale grafico mostra il comportamento dell'indice MAPO normalizzato al variare del grado d'anticipo d'accensione SA. La benzina su cui è stata eseguita tale prova è quella commerciale denominata E, e come si evince dalla legenda, le condizioni di funzionamento sono 4500 rpm a pieno carico. Questa acquisizione è la 25° di ogni singolo SA.

La curva sopra (Fig. 5.7) collega tra loro gli indici ottenuti da un determinato ciclo (il 25°) per ogni singolo Spark Advance Value, quindi non rappresenta un reale fenomeno continuo ma riesce comunque ad idealizzarne l'andamento. I test eseguiti sulla benzina E, che ricordiamo avere un RON 95, non si sono potuti spingere oltre i 20° d'anticipo a causa della forte detonazione riscontrata già da dopo i 18.5°.

Per quanto riguarda la normalizzazione dell'indice INT, esso è riferito alla media del segnale di pressione standard per le specifiche condizioni di velocità e carico. L'anticipo della curva standard è lo stesso utilizzato per determinare la normalizzazione del MAPO.

La relazione è espressa qui di seguito (Eq. 5.11) :

$$\text{Eq. 5.11} \quad INT_{norm} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_{cyl\_win}(i)|}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_{cyl\_win}(i)|_{standard}}$$

ove :

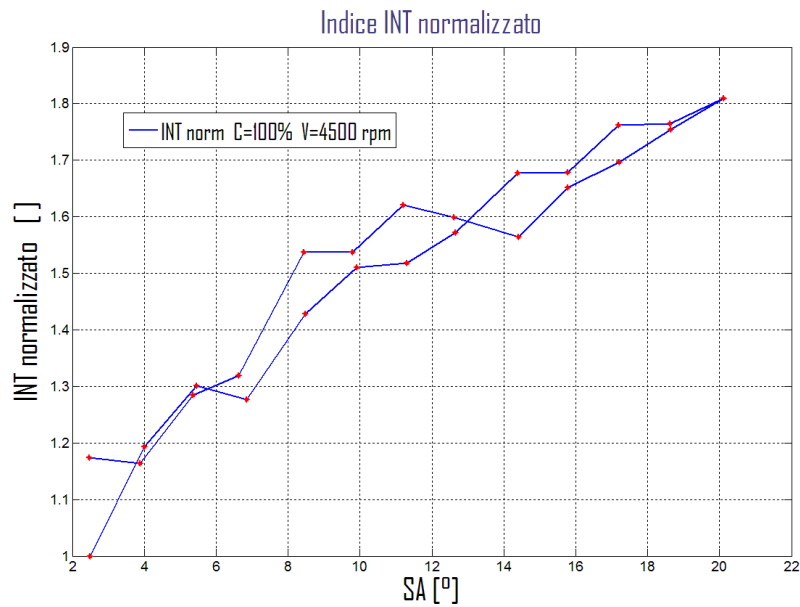
$P_{cyl\_win}$  = segnale di pressione del cilindro 2 finestrato

$|P_{cyl\_win}(i)|_{standard}$  = modulo segnale di pressione definito come standard

$N$  = numero di punti tenuti in considerazione all'interno di un ciclo

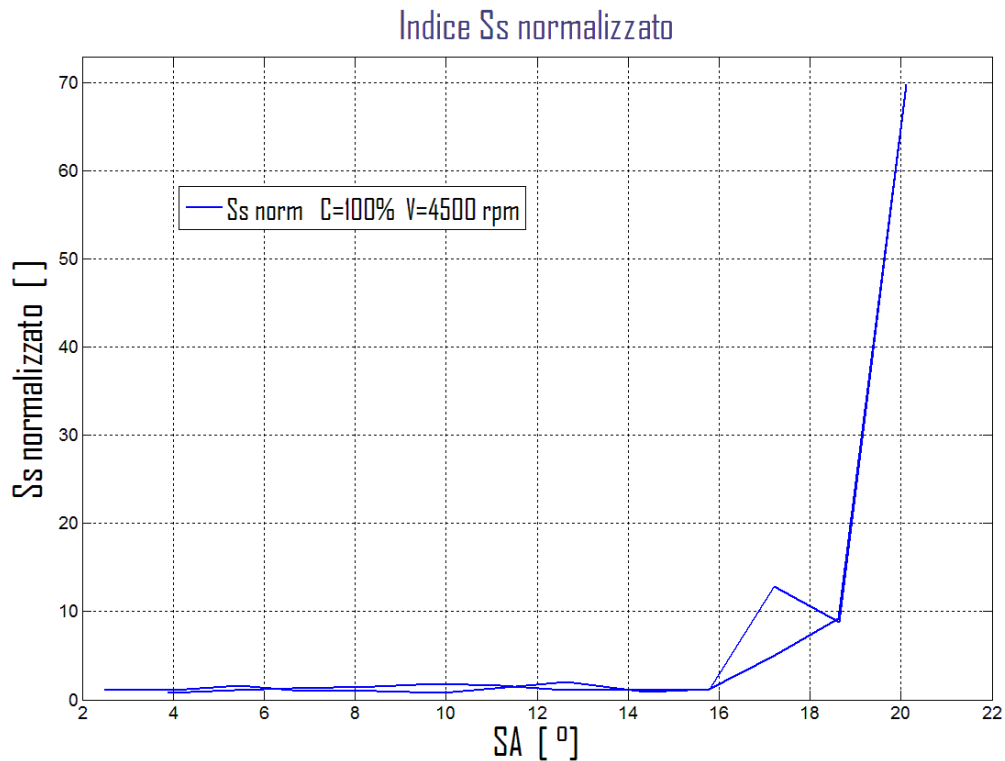
$i$  = i-esimo punto di campionamento del segnale di pressione ciclo

Il seguente grafico di esempio (Fig. 5.8) mostra come la tendenza dell'indice in esame segua fedelmente il trend dell'indice MAPO, validando le considerazioni fatte per determinare gli indici stessi.



**Fig. 5.8** : Tale grafico mostra il comportamento dell'indice INT normalizzato al variare del grado d'anticipo d'accensione SA. La benzina su cui è stata eseguita tale prova è ancora la E, alle stesse condizioni di funzionamento viste precedentemente di 4500 rpm a pieno carico. Si nota la sostanziale congruenza col grafico dell'indice MAPO, anche se i valori sono leggermente differenti a causa della differenza di approccio.

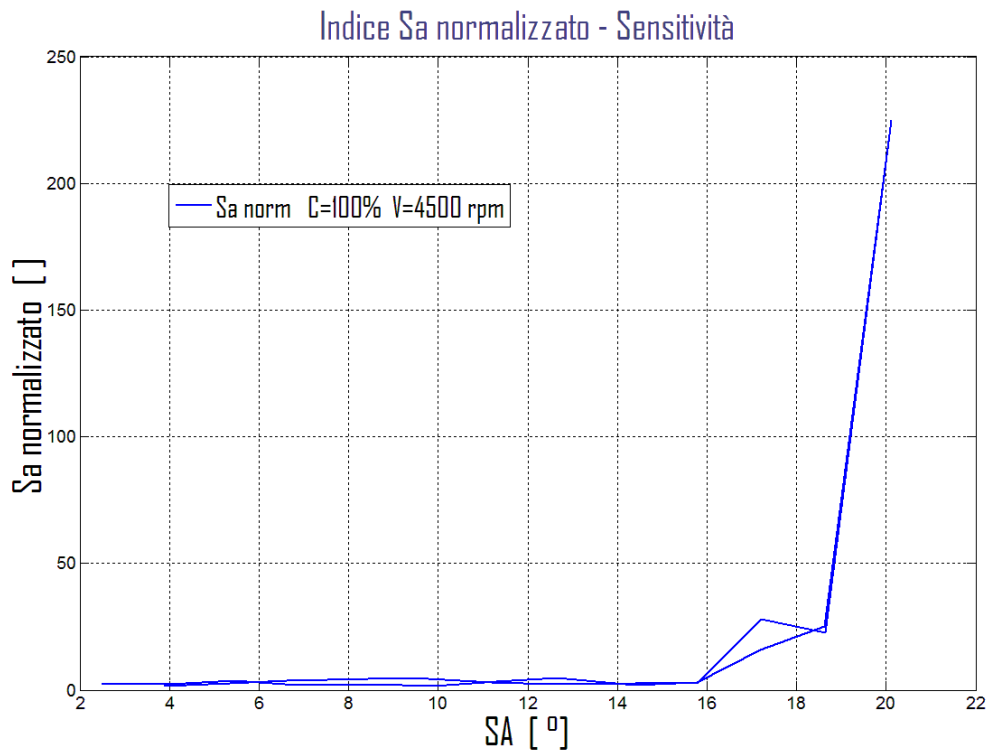
Il terzo indice Ss viene normalizzato con la stessa logica finora utilizzata, cioè viene relazionato alla media del modulo dello spettro tagliato del segnale di pressione standard, cioè quello di riferimento dove sicuramente non compare alcun fenomeno assoggettato alla detonazione. Il grafico di tale indice (per la stessa benzina e condizioni di funzionamento viste per gli altri due) è qui riportato (Fig. 5.9) :



**Fig. 5.9** : Tale grafico mostra il comportamento dell'indice Ss normalizzato al variare del grado d'anticipo d'accensione SA. La benzina su cui è stata eseguita tale prova è ancora la E, alle stesse condizioni di funzionamento viste precedentemente di 4500 rpm a pieno carico. Si nota la sostanziale congruenza col grafico dell'indice MAPO e INT, anche se i valori sono differenti a causa della differenza di approccio.

L'indice Sa viene relazionato al massimo valore dell'anti-trasformata di Fourier dello spettro tagliato del segnale di pressione standard, cioè quello di riferimento dove sicuramente non compare alcun fenomeno assoggettato alla detonazione.

Il grafico di tale indice (per la stessa benzina e condizioni di funzionamento viste per gli altri tre) è qui riportato (Fig. 5.10) :



**Fig. 5.10** : Tale grafico mostra il comportamento dell'indice Sa normalizzato al variare del grado d'anticipo d'accensione SA. La benzina su cui è stata eseguita tale prova è ancora la E, alle stesse condizioni di funzionamento viste precedentemente di 4500 rpm a pieno carico. Si nota la sostanziale congruenza col grafico dell'indice MAPO, INT e Ss, anche se i valori sono differenti a causa della differenza di approccio matematico.

Dai grafici ottenuti per i diversi indici studiati, si può osservare che il trend è comune a tutti, anche se le scale sono differenti. Anche i gradienti risultano essere maggiori negli indici ottenuti passando attraverso gli spettri rispetto al MAPO ed INT. Questo è un risultato che ci si poteva aspettare poiché le grandezze in gioco dipendono fortemente dalla logica con cui gli indici sono stati costruiti, mentre la loro tendenza dipende proprio dal così ricercato effetto della detonazione. Per questo motivo è più logico confrontare a coppie gli indici ottenuti, proprio in base al dominio da cui scaturiscono.

La prima immagine (Fig. 5.11) confronta l'indice MAPO ed INT mentre la seconda (Fig. 5.12) i rimanenti indici Ss e Sa. I grafici nascono da un'unica prova in cui è stata utilizzata la stessa benzina ed impostate le medesime condizioni di funzionamento fino ad ora utilizzate per esplicitare i risultati. Inoltre, per maggiore chiarezza, la visualizzazione delle prove è svolta per la sola fase di salita degli anticipi.

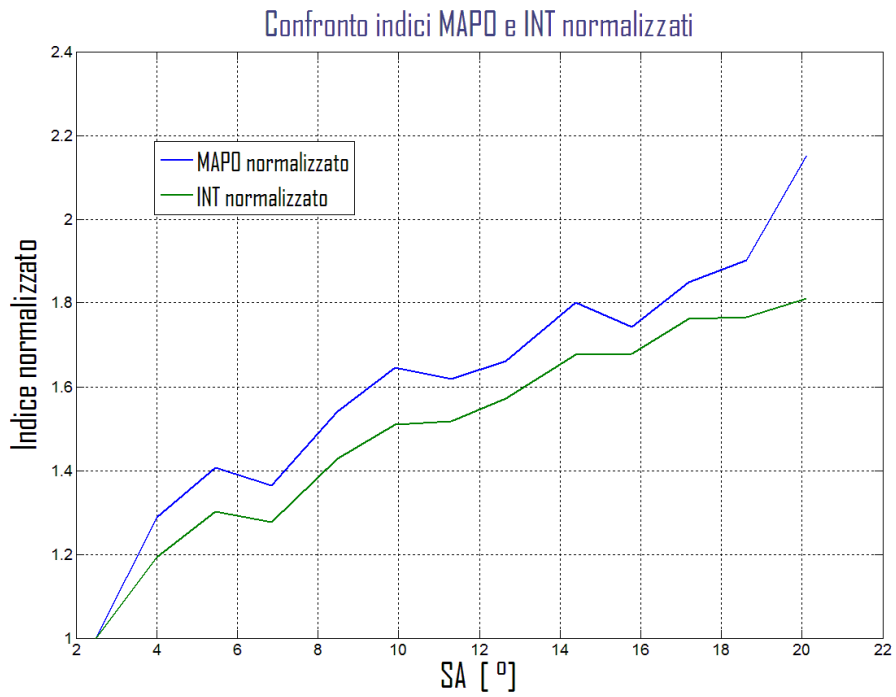


Fig. 5.11 : Confronto degli indici MAPD ed INT normalizzati per benzina E , carico 100% , regime 4500 rpm e  $\lambda=0.9$ .

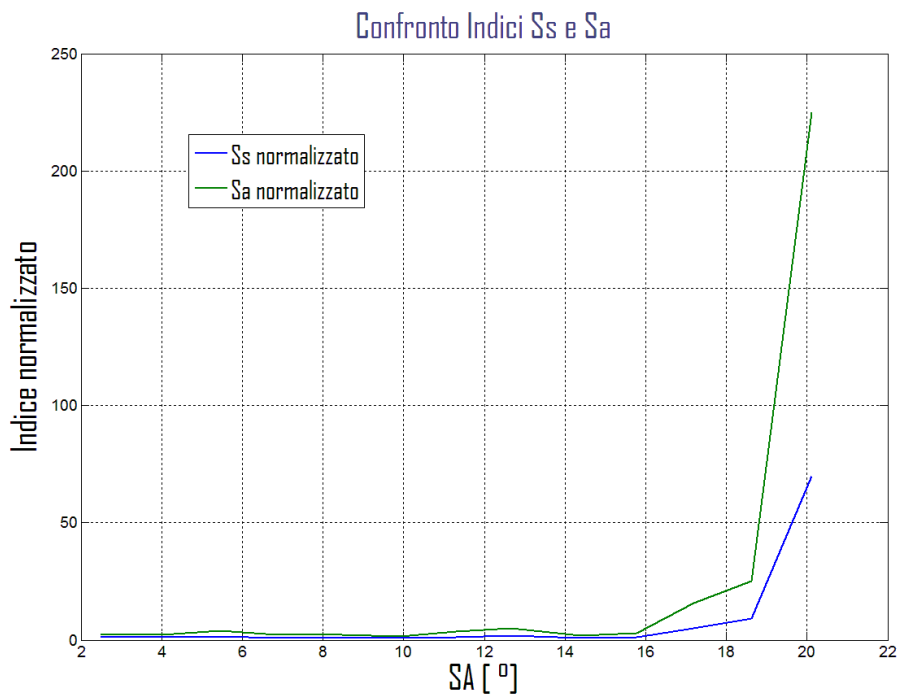


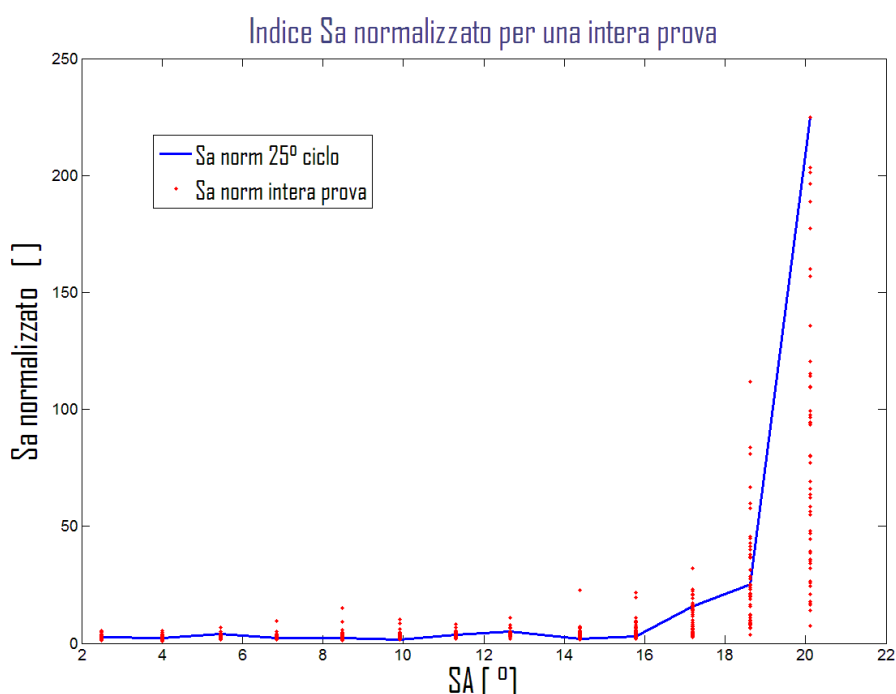
Fig. 5.12 : Confronto degli indici Ss e Sa normalizzati per benzina E , carico 100% , regime 4500 rpm e  $\lambda=0.9$ .

Sia per le caratteristiche degli indici che per le loro differenze, è intuitivo doverne utilizzare esclusivamente uno di questi quando si vuole trarre dei risultati di paragone. Per esempio bisogna imporselo quando si vuole studiare il comportamento di più combustibili alle stesse condizioni di funzionamento prefissate, come anche il comportamento alla detonazione di un singolo combustibile al variare delle condizioni di velocità e carico.

La scelta dell'indice da impiegare per tali prove è ricaduta sull'indice Sa normalizzato (chiamato anche "sensitivity"), il quale, essendo passato attraverso lo spettro, gode del taglio effettuato sulle frequenze non imputabili alla detonazione, quindi più legato al solo fenomeno sotto osservazione rispetto agli indici MAPO e INT.

Tutti questi grafici fino ad ora visti esplicitano gli indici al variare dell'anticipo, ma dove per ogni anticipo viene preso comunque in considerazione un unico ciclo. Risulta molto interessante visionare tutti i punti ottenuti durante l'intera acquisizione per capire la variabilità dovuta sia alla dispersione ciclica che alla comparsa random della detonazione.

La seguente rappresentazione ( Fig. 5.13 ) racchiude tutti i risultati di un'intera prova, esplicitando gli indici trovati sia per la salita che la discesa d'anticipo di un determinato combustibile a prefissate condizioni di funzionamento :



**Fig. 5.13 :** Questo grafico permette di visionare gli indici ottenuti per ogni ciclo acquisito durante l'intera prova, mettendo a risalto l'eventuale variabilità complessiva anche a prefissato grado d'anticipo SA. La linea continua è la congiungente dei valori ottenuti al 25° ciclo su 50 per ogni anticipo, ed è posta a grafico per capire meglio la tendenza dell'indice di detonazione, ma ovviamente non rappresenta nessun comportamento consecutivo di cicli difficilmente realizzabile nella realtà. Benzina E, carico 100% , regime 4500 rpm e  $\lambda=0.9$ .

Dato il gran numero di cicli tenuti in considerazione per ogni prova, risulta alquanto difficile comprendere il confronto degli indici di detonazione di più combustibili.

Un parametro che si è ritenuto importante da confrontare è la mediana delle distribuzioni di indici al variare degli anticipi d'accensione, la quale, oltre ad essere un reale parametro scaturito dalla prova, rappresenta il centro statistico della distribuzione stessa. Questo criterio di giudizio è utile esclusivamente per capire l'andamento della detonazione al variare degli anticipi, ma per un'analisi corretta del fenomeno devono essere tenuti in considerazione tutti i dati ottenuti.

Nel caso si volesse studiare il comportamento di un singolo combustibile ed analizzarne i suoi parametri statistici, è possibile creare un grafico Boxplot tramite software dedicati e stimare sia l'andamento che la variabilità intuitivamente. Da tale grafico è poi possibile estrapolare la mediana, il range interquartile, tutti i quartili e gli outliers (dettati gli intervalli di confidenza). Un esempio di tale grafico è riportato qui di seguito (Fig. 5.14) :

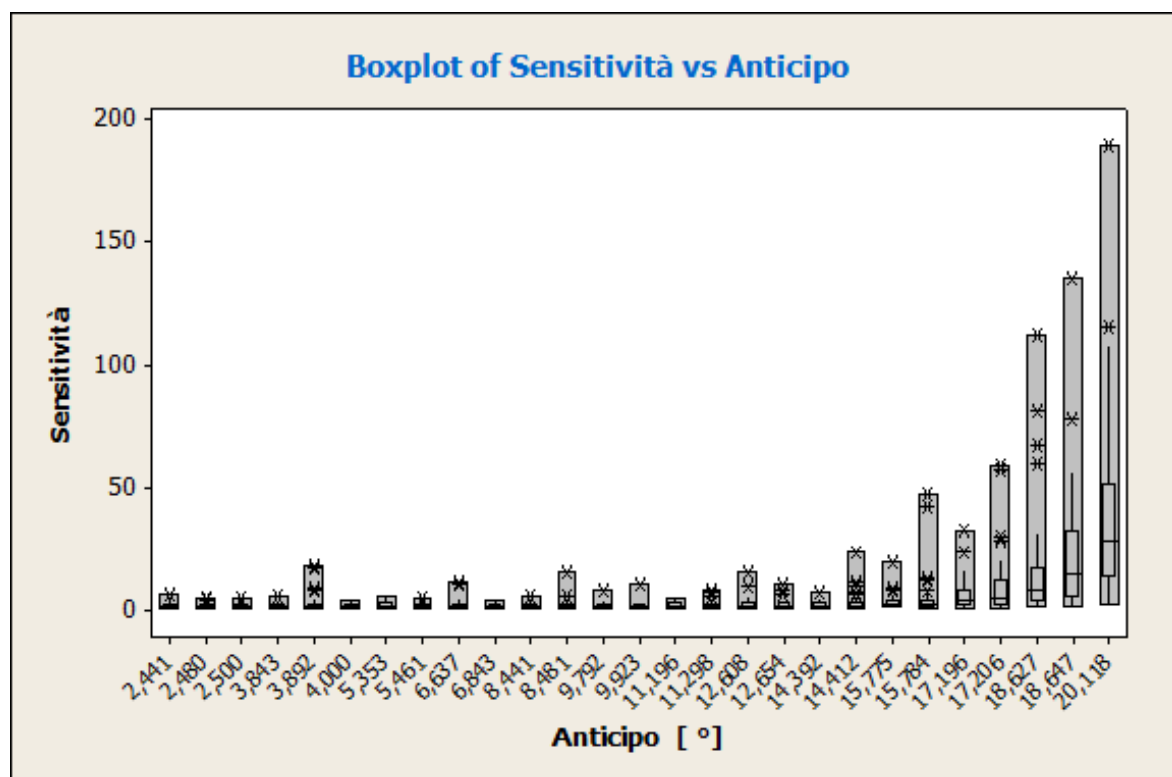


Fig. 5.14 : Questo grafico permette di visionare la variazione di tutti i parametri statistici della distribuzione degli indici di detonazione  $S_a$  normalizzati ( Sensitivity ) per un solo campione di benzina, nella fattispecie la E. Le condizioni di funzionamento del motore sono fissate a carico 100%, regime 4500 rpm e  $\lambda=0.9$ .

Un esempio degli andamenti della mediana per più combustibili è riportato qui di seguito (Fig. 5.15) :

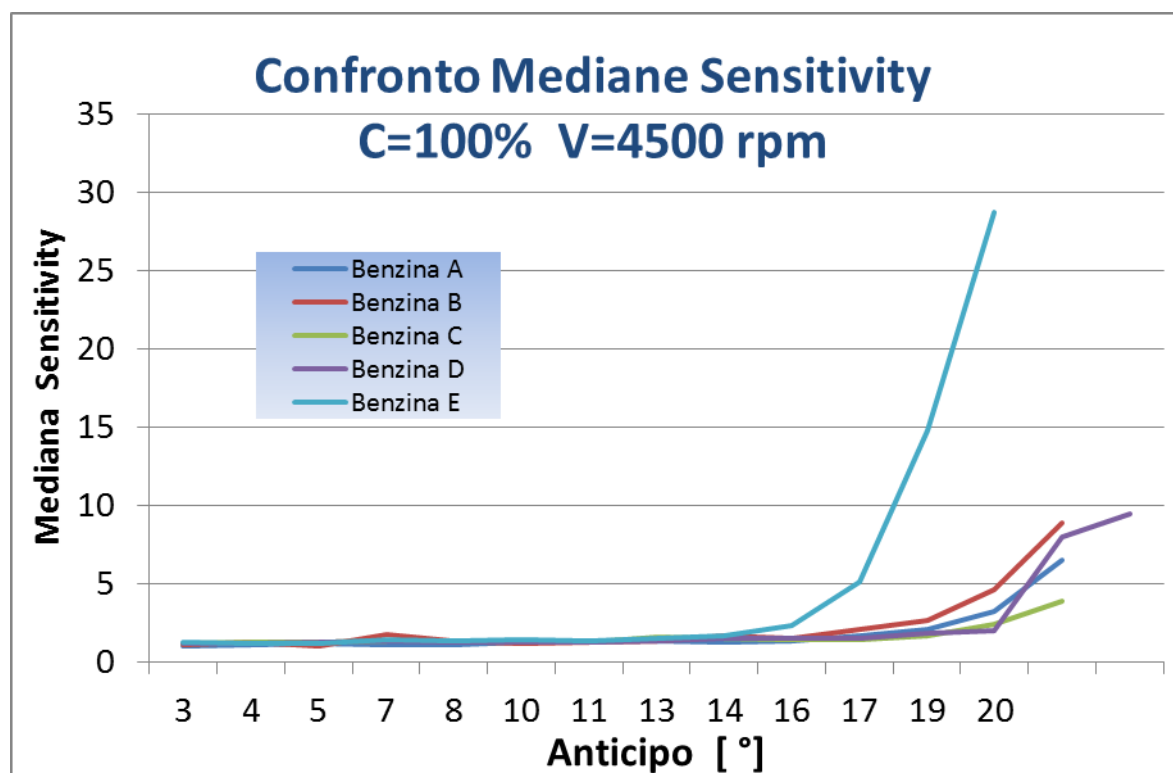


Fig. 5.15 : Questo grafico permette di visionare la variazione della mediana della distribuzione degli indici di detonazione  $S_a$  normalizzati ( Sensitivity ) per tutti i campioni di benzine. Questo dato ci rende visibile esclusivamente l'andamento della detonazione al variare degli anticipi, permettendoci di effettuare un confronto. Le condizioni di funzionamento del motore sono fissate a carico 100%, regime 4500 rpm e  $\lambda=0.9$ .

Dallo stato dell'arte è noto che con l'aumentare dell'anticipo d'accensione, oltre ad aumentare il livello di rumore imputabile alla detonazione, aumenta anche la variabilità del fenomeno da ciclo a ciclo. Questo è un importante aspetto da tenere in considerazione nel momento in cui si impostano i parametri di funzionamento di un motore durante la fase di progettazione. Per poter visionare questa tendenza, si è deciso di studiare il range interquartile di ogni distribuzione di indici di detonazione al variare degli anticipi d'accensione. Questa tipologia di grafici, insieme all'andamento delle mediane, restituisce un carattere generale dei diversi combustibili che si vorrà confrontare, per poterne così determinare le loro caratteristiche basate sui diversi composti chimici che li compongono.



Un grafico d'esempio che rappresenta l'andamento dei range interquartili della sensitivity per tutti i campioni di benzine esaminate è riportato qui di seguito (Fig. 5.16) :

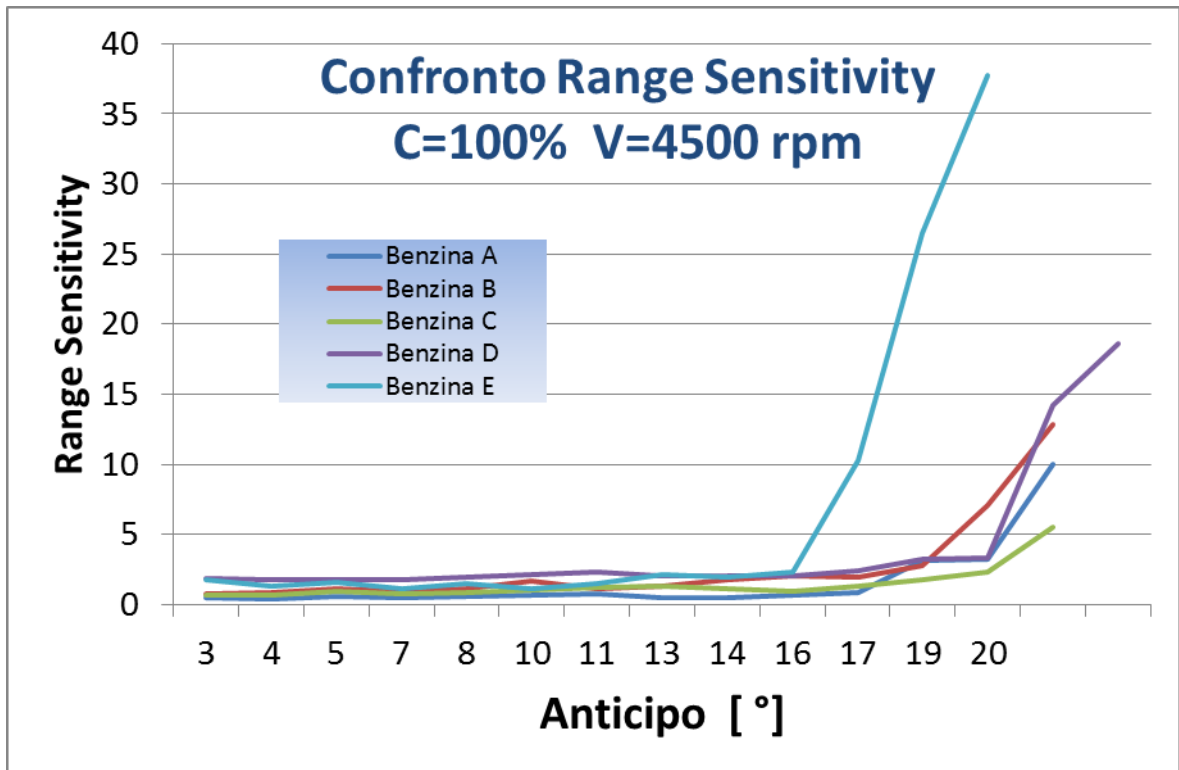


Fig. 5.16 : Questo grafico permette di visionare la variazione del range interquartile della distribuzione degli indici di detonazione  $S_a$  normalizzati ( Sensitivity ) per tutti i campioni di benzine. Questo dato ci rende visibile la variabilità del fenomeno detonazione al variare degli anticipi, permettendoci di effettuare un confronto. Le condizioni di funzionamento del motore sono fissate a carico 100%, regime 4500 rpm e  $\lambda=0.9$ .

## 6 Risultati ottenuti

---

Grazie alle molteplici prove eseguite sulle varie tipologie di combustibili a disposizione, è stato possibile ottenere informazioni sia sulle loro prestazioni generiche in accoppiata col motore Alfa con impostazioni di fabbrica, sia sulle potenzialità e caratteristiche che essi avrebbero a condizioni diverse.

Per questo motivo i primi risultati resi espliciti saranno le curve di coppia e potenza a condizioni di normale utilizzo impostate da centralina al variare del numero di giri. Saranno rapportate le curve sia per il gruppo di benzine che per i surrogati, anche se quello che ci si aspetta è una variazione dovuta esclusivamente alle condizioni al contorno, poiché il potere calorifico inferiore è uguale per tutti i combustibili.

Ovviamente per poter ottenere le maggiori prestazioni da ogni combustibile, le case costruttrici di veicoli dovrebbero settare le impostazioni del motore in base alle caratteristiche degli stessi e non utilizzare quelle ottimali per altre benzine, che nella fattispecie sarebbe la benzina E ( commerciale ).

Per rendersi conto della predisposizione alla detonazione dei vari combustibili e delle loro prestazioni a condizioni diverse da quelle di centralina, si sono plottati gli indici di detonazione e le coppie rilevate dal freno motore al variare degli anticipi. Tra i vari indici di detonazione creati è stato scelto di utilizzare l'indice  $S_a$  normalizzato, chiamato anche nei seguenti grafici "sensitivity". Per tali prove è stato necessario tenere costanti i carichi ed i regimi, ottenendo un alto numero di grafici che saranno approfonditi proprio in questo capitolo.

Per poter visualizzare comprensibilmente il confronto tra le prestazioni dei vari combustibili con quella del campione commerciale di riferimento in uno stesso grafico, è stata plottata l'efficienza della curva di coppia della benzina E e, su una differente scala, le variazioni percentuali di coppia imputabili alle altre benzine rispetto a quella di riferimento. Questo tipo di visualizzazione rende immediato il confronto delle prestazioni al variare degli anticipi di accensione.

Un ulteriore studio è stato poi eseguito per poter notare se, come da stato dell'arte, esiste una maggiore dispersione dei cicli detonanti all'aumentare dell'anticipo. Questo è un parametro di forte interesse per i costruttori di veicoli poiché una bassa variabilità di detonazione può essere associata, a parità di potere antidetonante, a migliori risultati ottenibili esclusivamente dal settaggio centralina in sala prove.

Per fare ciò si è portato a grafico la variabilità degli indici di detonazione dei vari combustibili al variare degli anticipi, ovviamente tenendo costanti le altre condizioni di funzionamento. Questo range di variabilità è stato poi considerato in relazione anche alla mediana degli indici, la quale indica semplicemente il valore medio assunto realmente in uno dei cento cicli per anticipo tenuti in considerazione dall'analisi statistica. Questa tipologia di approccio statistico è stato eseguita esclusivamente sui dati ottenuti a pieno carico dove ci si è resi conto di poter ottenere risultati apprezzabili.

Qui di seguito è elencato l'ordine di presentazione dei risultati precedentemente illustrati :

### *1) Comparazione prestazioni con settaggio centralina standard*

- ❖ Prestazioni Benzine
- ❖ Prestazioni Surrogati

### *2) Confronto Benzine*

- ❖ Pieno carico a 1500 rpm
- ❖ Pieno carico a 3000 rpm
- ❖ Pieno carico a 4500 rpm

### *3) Confronto Surrogati*

- ❖ Pieno carico a 1500 rpm
- ❖ Pieno carico a 3000 rpm
- ❖ Pieno carico a 4500 rpm

## 6.1 Comparazione prestazioni con settaggio centralina standard

### ❖ Prestazioni Benzine

Come informazione generale si è ottenuta, per ogni benzina analizzata, la curva di coppia al variare della velocità di rotazione del motore mantenendo inalterate le impostazioni della centralina originale. La variabilità massima delle diverse curve si accosta al 5 %, che può essere ritenuto accettabile visto il diverso periodo temporale in cui le prove sono state eseguite, il quale comporta diverse temperature e pressioni atmosferica. Questi parametri, influenzando direttamente sia sulla densità dell'aria che sul coefficiente di riempimento, giustificano largamente le leggere differenze comportamentali plottate nel seguente grafico (Fig. 6.1) :

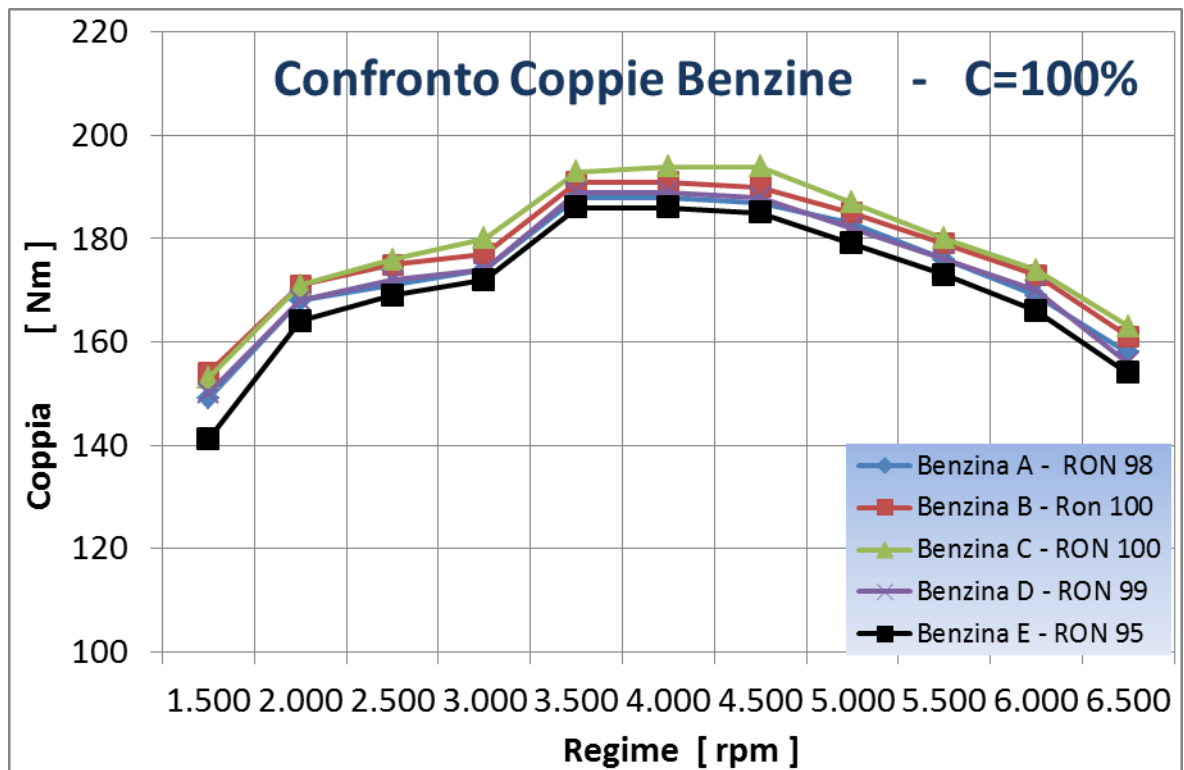


Fig. 6.1 : Grafico rappresentante le curve di coppia al variare del regime per le diverse benzine. Le condizioni di funzionamento del motore sono quelle impostate dalla casa madre su centralina originale.

Per completezza è qui riportato il grafico delle curve di potenza (Fig. 6.2), il quale riesce a restituire le medesime informazioni del grafico precedente pur con una minore leggibilità, dovuta proprio alla moltiplicazione per la velocità di rotazione del motore. La semplice relazione tra coppia e potenza è qui riportata (Eq. 6.1):

Eq. 6.1 
$$P = C_m \cdot n$$

ove :

P = potenza motore espressa in W

$C_m$  = coppia motrice espressa in Nm

n = numero di giri del motore espressa in  $sec^{-1}$

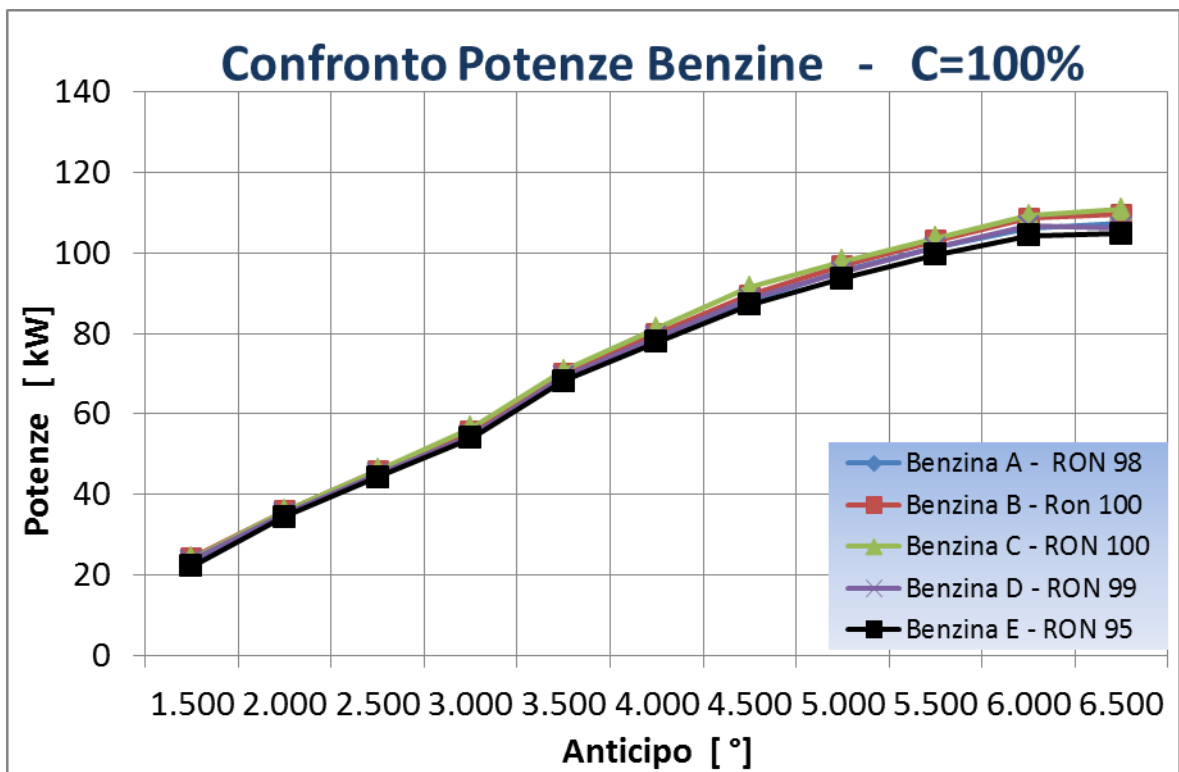


Fig. 6.2 : Grafico rappresentante le curve di potenza al variare del regime per le diverse benzine. Le condizioni di funzionamento del motore sono quelle impostate dalla casa madre su centralina originale.

## ❖ Prestazione Surrogati

Le stesse tipologie di grafici di coppia e potenza al variare del numero di giri ottenute per le benzine, sono ora mostrate per i quattro surrogati. Qui le differenze sono ancora più leggere di quanto riscontrato per le benzine, proprio a dimostrare l'incidenza del fattore temporale. Infatti, le prove per i diversi surrogati sono state eseguite in un lasso di tempo più ridotto rispetto a quello eseguito per le diverse benzine.

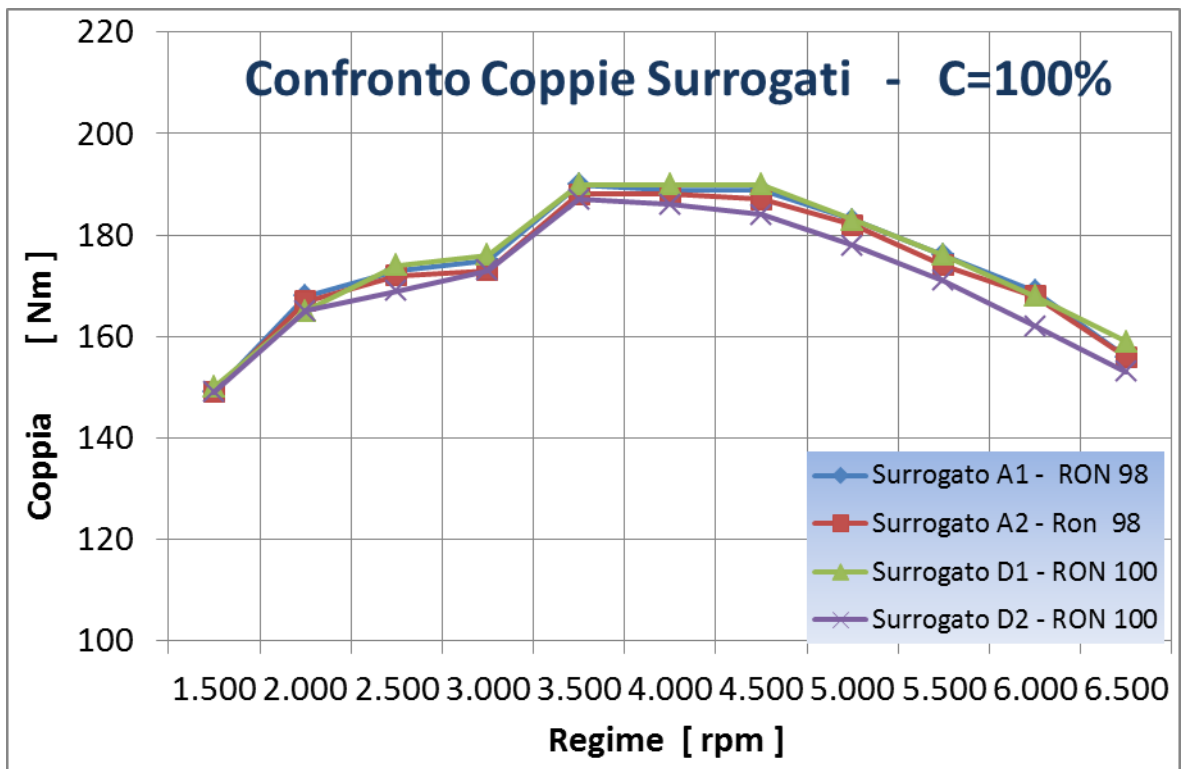


Fig. 6.3 : Grafico rappresentante le curve di coppia al variare del regime per i diversi surrogati. Le condizioni di funzionamento del motore sono quelle impostate dalla casa madre su centralina originale.

Per completezza è qui riportato il grafico delle curve di potenza dei diversi surrogati (Fig. 6.4), il quale riesce a restituire le medesime informazioni del grafico precedente pur con una minore leggibilità, dovuta proprio alla moltiplicazione per la velocità di rotazione del motore.

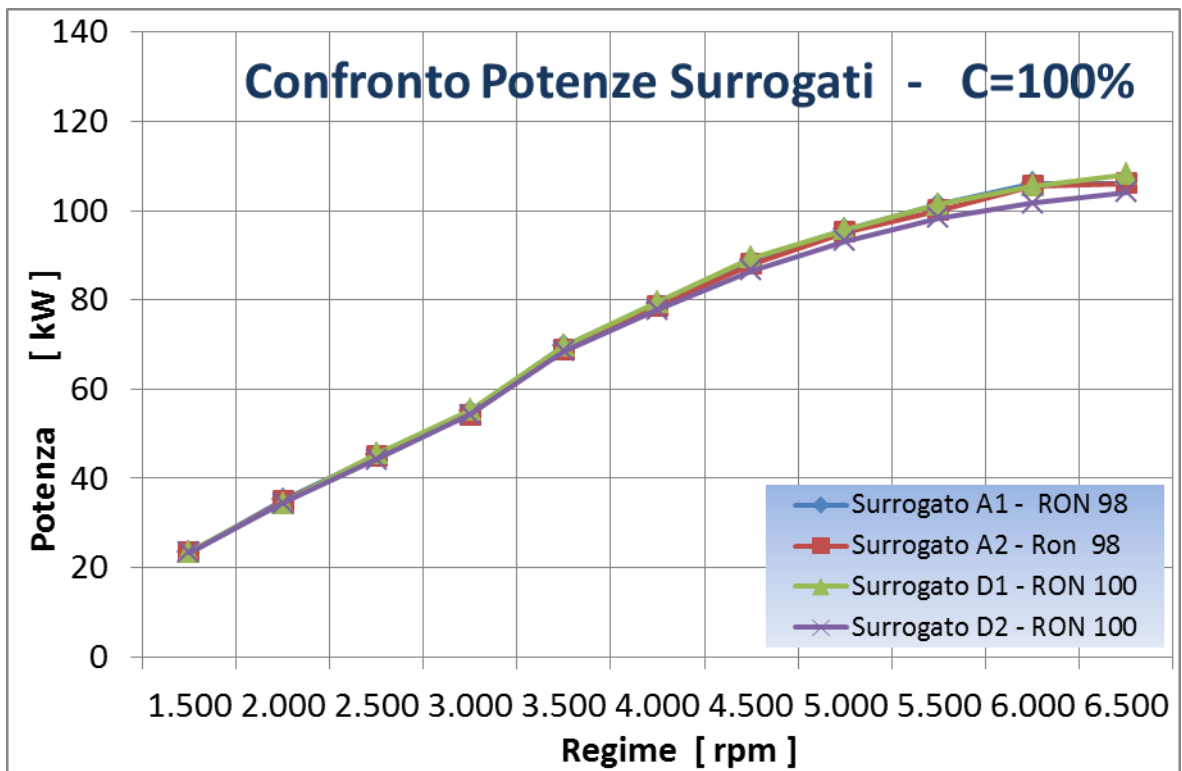


Fig. 6.4 : Grafico rappresentante le curve di potenza al variare del regime per i diversi surrogati. Le condizioni di funzionamento del motore sono quelle impostate dalla casa madre su centralina originale.

### ❖ Prestazioni congiunte Benzine - Surrogati

Per poter testare la congruenza delle prestazioni sia delle benzine che dei surrogati, è possibile osservare il seguente grafico (Fig. 6.5) che mostra la ristretta differenza tra le varie coppie motore rilevate a differenti regimi. Come già accennato, questa variabilità è da imputare esclusivamente alla aleatorietà sperimentale.

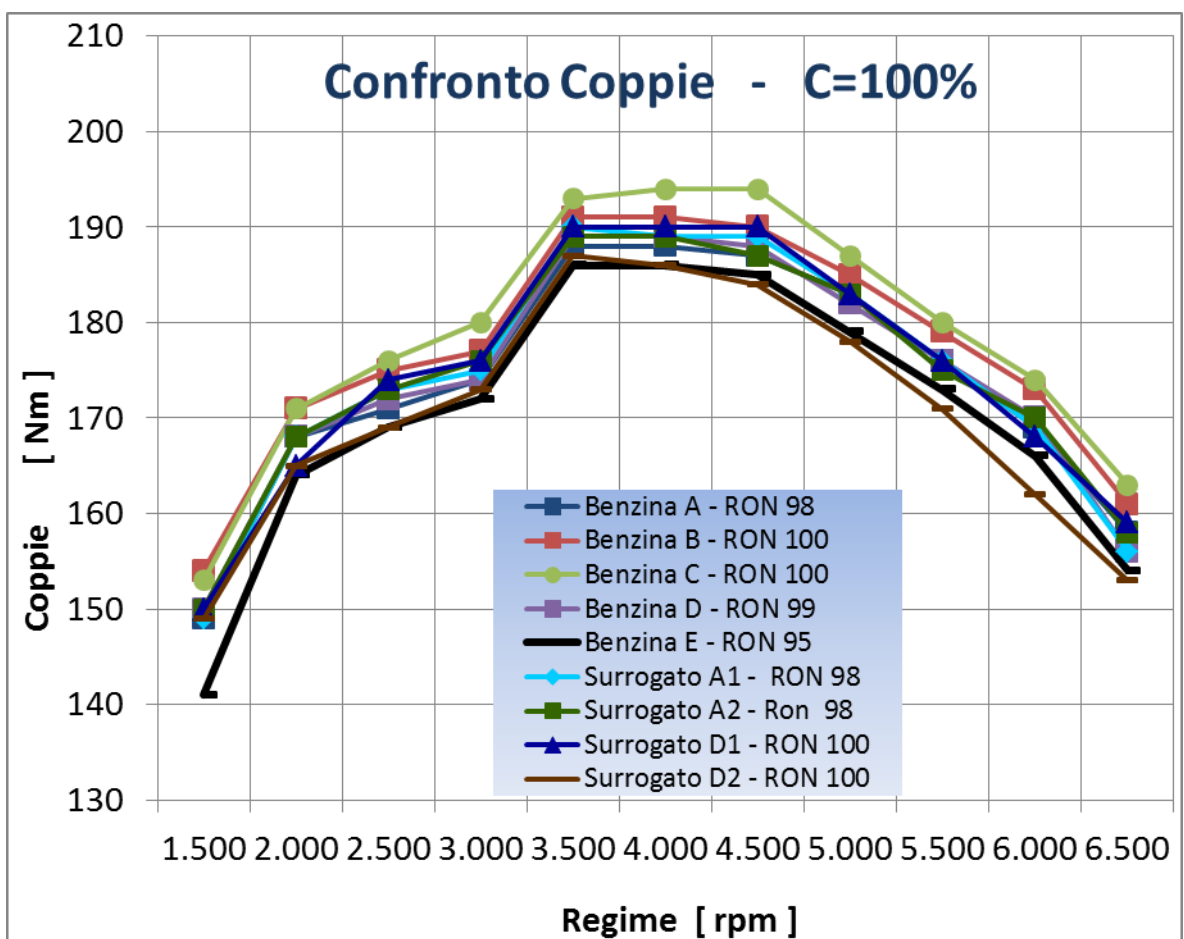


Fig. 6.5 : Grafico rappresentante le curve di coppia al variare del regime per tutti i combustibili, quindi sia benzine che surrogati. Le condizioni di funzionamento del motore sono quelle impostate dalla casa madre su centralina originale.



Le stesse prestazioni acquisite sono riportate nella seguente immagine (Fig. 6.6) sotto forma di potenza motore. Qui è ancora più difficile accorgersi delle sottili differenze, soprattutto a regimi medio-bassi dove le curve vanno quasi a collapsare in una unica.

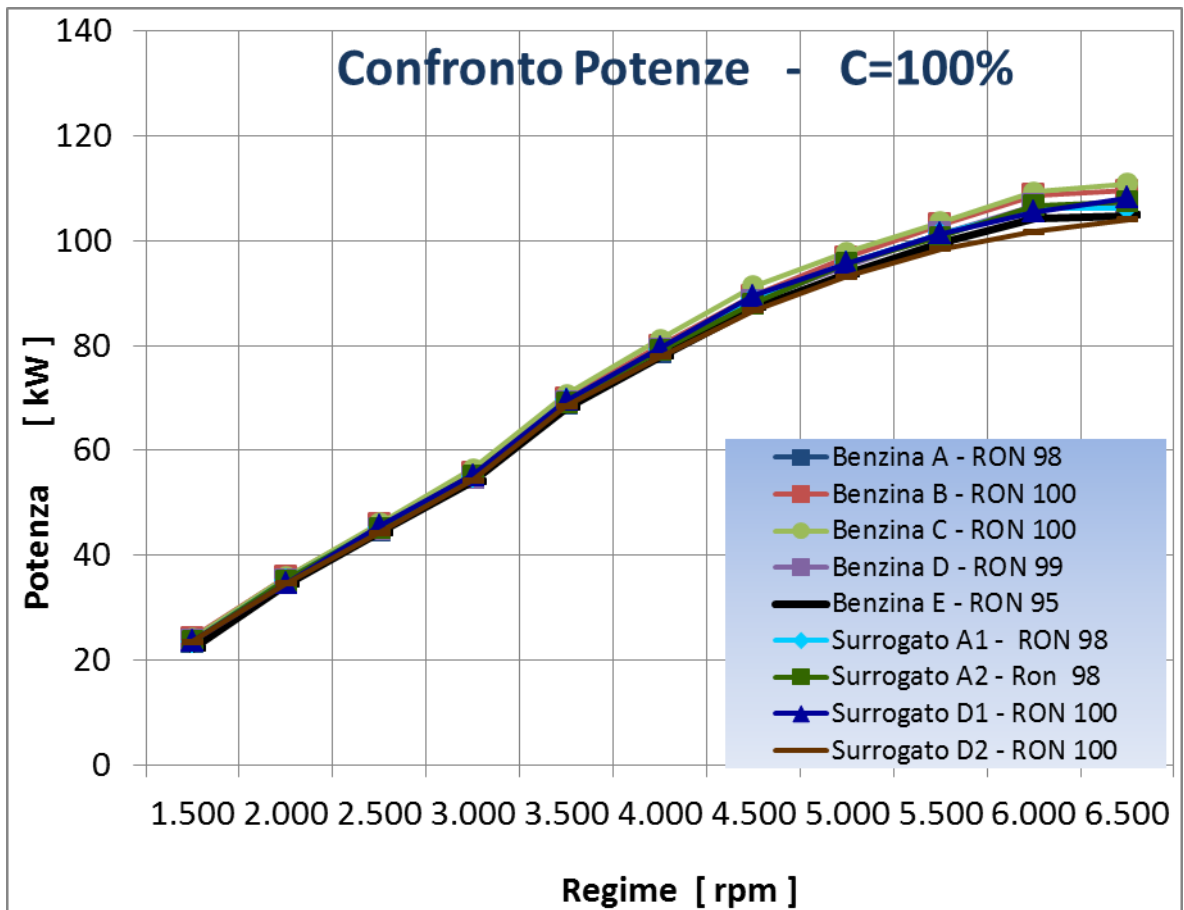


Fig. 6.6 : Grafico rappresentante le curve di potenza al variare del regime per tutti i combustibili, quindi sia benzine che surrogati. Le condizioni di funzionamento del motore sono quelle impostate dalla casa madre su centralina originale.

## 6.2 Confronto Benzine

Nel seguente paragrafo sono rappresentati i risultati sia prestazionali che antidetonanti ottenuti sulle cinque benzine a disposizione. I risultati ottenuti sono funzione del grado di anticipo che è stato spazzolato durante le prove a centralina aperta tenendo costanti le altre condizioni di funzionamento del motore.

Le uniche prove che hanno restituito valori realmente confrontabili sono state quelle a pieno carico, mentre quelle a carico parziale differivano tra loro di quantità considerevoli. Questa ampia differenza è dovuta ad una impossibilità da parte della centralina di perfetta regolazione dell'angolo di farfalla dell'aspirazione durante le diverse prove effettuate, la quale ha provocato differenti carichi applicati al motore. Tali scostamenti sulle condizioni di funzionamento non hanno invece interessato le prove a pieno carico, dove l'apertura della farfalla al 100% non è stata fonte di incertezza.

I confronti a pieno carico tra le diverse benzine sono poi studiati per i differenti regimi impostati dalla prova sperimentale : 1500, 3000 e 4500 rpm.

### ❖ *Pieno carico al regime di 1500 rpm*

Dal freno motore a correnti parassite, impostato a velocità costante di 1500 rpm è stato possibile ricavare la coppia motore al variare dell'anticipo motore. Queste prove eseguite su tutti i campioni di benzine a tale regime sono rese confrontabili dal seguente grafico (Fig. 6.7) :

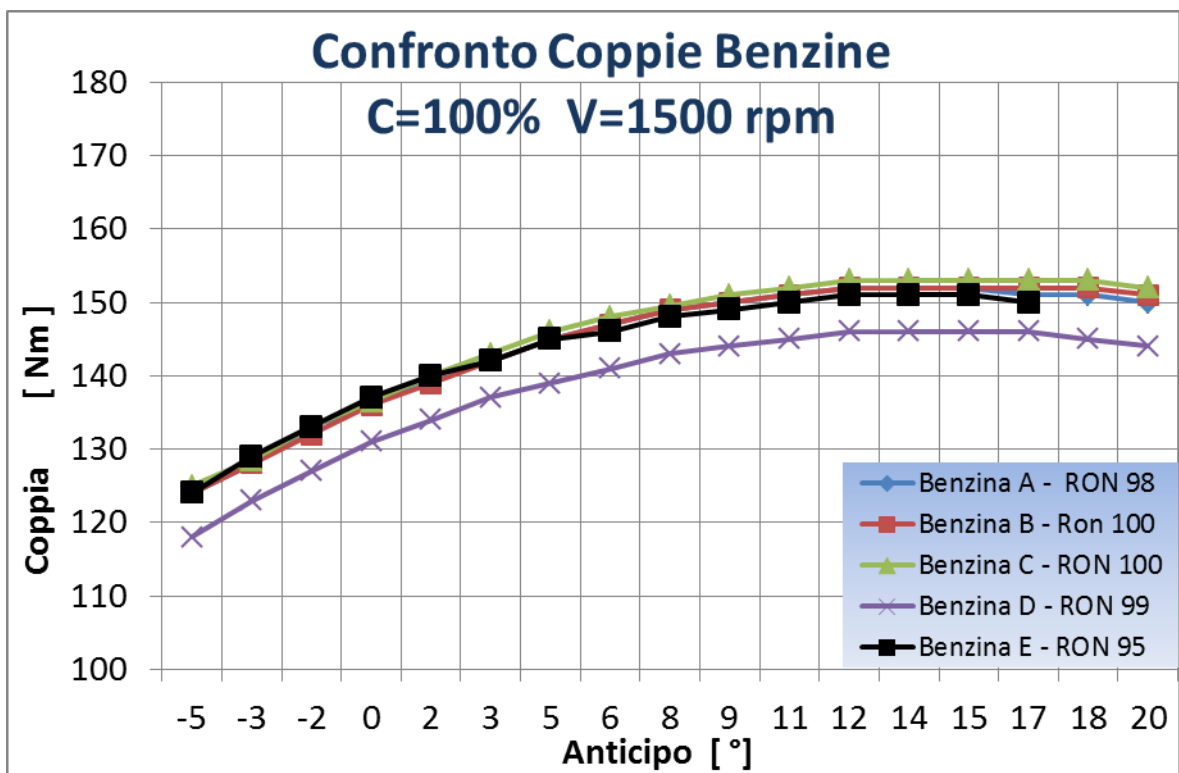


Fig. 6.7 : Grafico rappresentante il confronto della coppia motore al variare dell'anticipo d'accensione per le 5 benzine a disposizione. Per eseguire tale prova ci si è dovuti servire di una centralina aperta la quale rendesse possibile la regolazione dell'anticipo d'accensione del motore. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 1500 rpm.

Da tale confronto è possibile carpire lo stesso trend prestazionale per tutti i campioni. I valori risultano leggermente differenti, in modo più marcato quelli che riguardano la benzina D. Questa discrepanza può essere imputata alle diverse condizioni di temperatura e pressione a cui le prove sono state eseguite.

Il più alto numero RON dei quattro campioni di benzine rispetto a quella commerciale E è reso noto dal fatto che con questi ci si è potuti spingere fino a più alti gradi di anticipo. Infatti la curva nera rappresentante la prova sul campione di benzina commerciale risulta troncata a causa di una alta detonazione udibile dalla sala prove, che ha forzato l'interruzione prematura della prova stessa.

Per rendere più intuibile il confronto delle curve di coppia tra loro, si è portato a grafico le differenze percentuali di coppia rispetto alla efficienza di coppia della benzina E. Per fare ciò si è dovuto utilizzare una doppia scala sullo stesso grafico. Per efficienza di coppia si intende il valore percentuale per ogni anticipo riferito a quello massimo acquisito durante la prova sulla benzina stessa, in questo caso la commerciale tenuta a riferimento

Come si può notare dalla Fig. 6.8, la curva di efficienza di coppia parte dall'80% per bassi anticipi tendendo ad aumentare fino a superare il suo massimo quando si raggiunge il 100%. Le differenze di coppia rispetto alla curva di riferimento si attestano in misura di pochi punti percentuali.

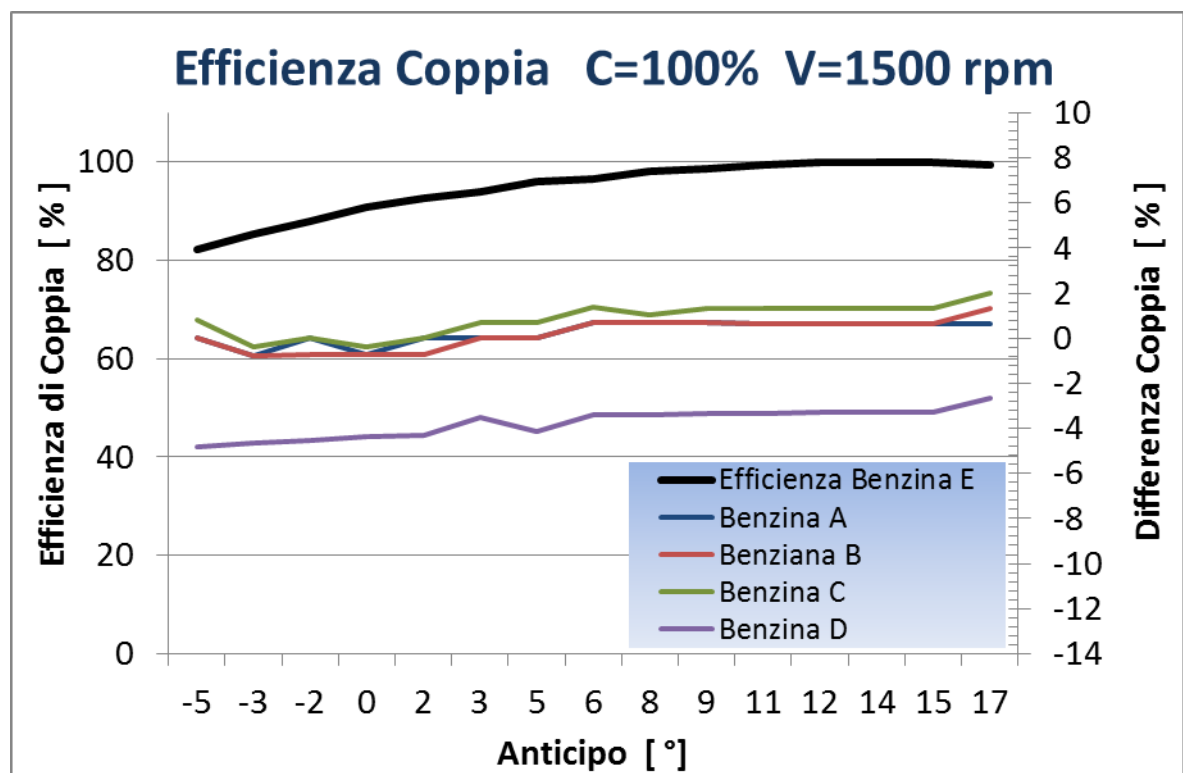
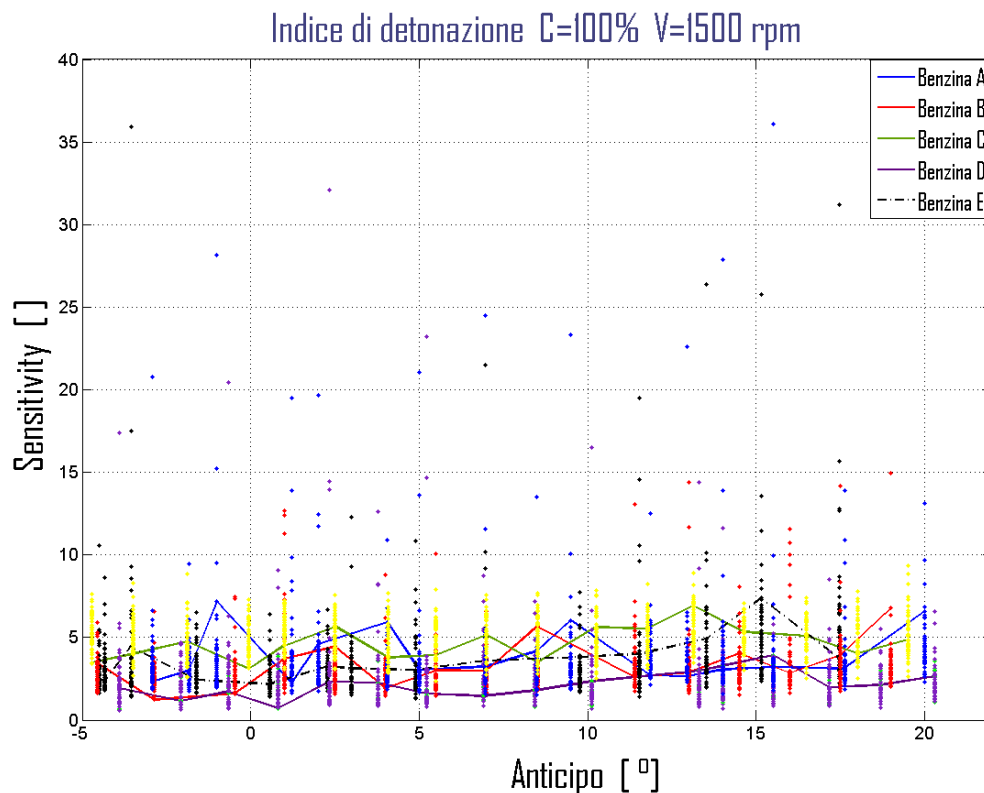


Fig. 6.8 : Tramite l'asse delle ordinate di sinistra, il grafico rappresenta l'efficienza di coppia della benzina di riferimento E. Grazie al secondo asse sono rappresentate le differenze percentuali di coppia delle restanti benzine rispetto ai valori di coppia di quella commerciale. Per eseguire tale prova ci si è dovuti servire di una centralina aperta la quale rendesse possibile la regolazione dell'anticipo d'accensione del motore. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 1500 rpm.

Come è osservabile dall'asse delle ascisse, ci si è limitati a confrontare le coppie delle benzine fino all'anticipo massimo raggiunto nella prova del campione E, che risulta ben inferiore a quello raggiungibile con gli altri campioni. I valori di coppia risultano distare tra loro di quantità ritenute percentualmente assoggettabili alla sola variabilità sperimentale.

La benzina D risulta avere prestazioni inferiori fino ad un 4% rispetto a quella commerciale, dovuto probabilmente ad una sfortunata condizione atmosferica che ne ha penalizzato leggermente l'efficienza motoristica.

Dopo aver saggiato l'aspetto prestazionale, si è passati a studiare gli indici di detonazione denominati "sensitivity", esposti precedentemente nel capitolo 5. Essi descrivono la caratteristica antidetonante delle diverse benzine al variare dell'anticipo d'accensione. Nel seguente grafico (Fig. 6.9) sono riportati i valori degli indici di detonazione per le intere prove di tutti i campioni di benzine a disposizione, dove le prefissate condizioni di funzionamento del motore risultano essere pieno carico e regime di 1500 rpm.



**Fig. 6.9** : Il presente grafico mostra gli indici di detonazione "sensitivity" al variare dell'anticipo d'accensione ottenuti per le intere prove dei 5 campioni di benzine a disposizione. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 1500 rpm.

Mostrando le intere prove, questa tipologia di grafici riesce a fornire la totalità del fenomeno della detonazione ciclo dopo ciclo con l'inconveniente di una scarsa leggibilità del fenomeno. Infatti le linee che si possono osservare rappresentano esclusivamente la congiunzione di indici ottenuti da cicli campione (i venticinquesimi) all'interno delle famiglie di acquisizioni per anticipi.

Utilizzando metodologie di statistica descrittiva è possibile estrapolare dalle nubi di valori rappresentanti gli indici di detonazione, informazioni sul loro trend e dispersione con l'aumentare dell'anticipo.

Il seguente grafico (Fig. 6.10) mostra la mediana degli indici di detonazione al variare dell'anticipo d'accensione per i campioni di benzina a disposizione. Tale parametro riesce a rappresentare l'andamento del fenomeno della detonazione durante la prova. La mediana è stata preferita alla media aritmetica essendo esso un reale valore assunto dall'indice durante le prove.

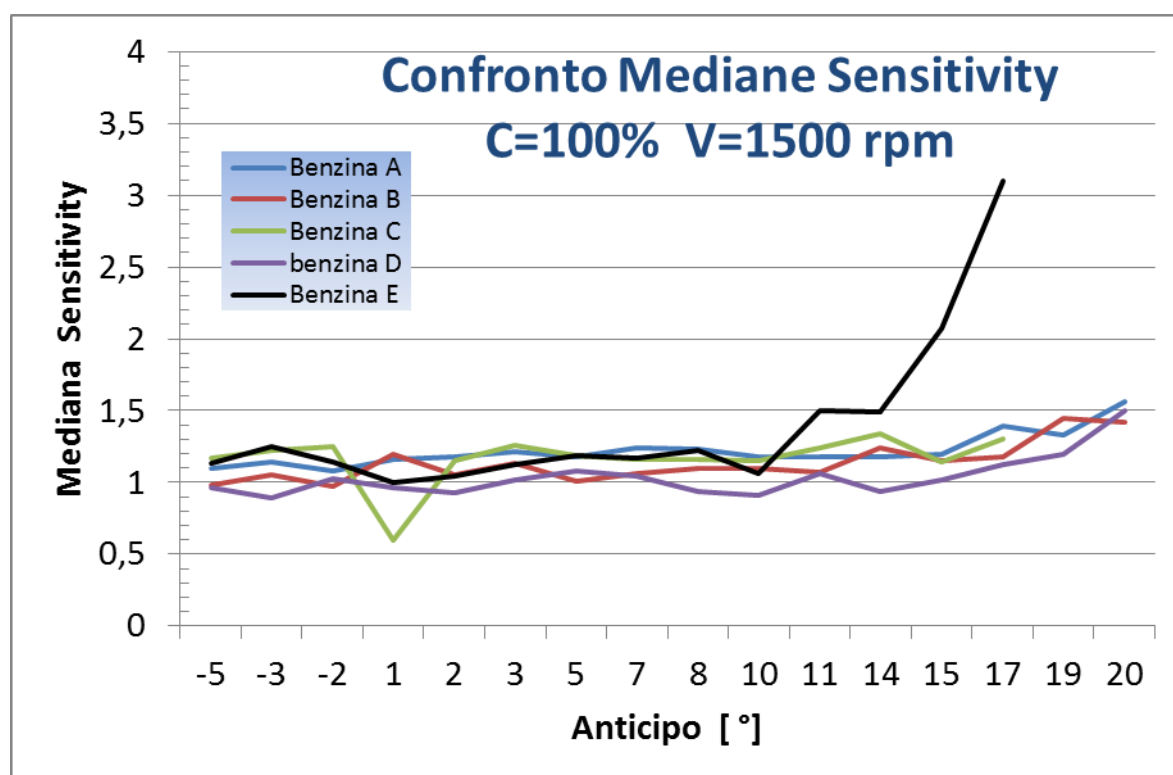


Fig. 6.10 : Grafico rappresentante l'andamento della mediana degli indici di detonazione acquisiti per le varie benzine, al variare degli anticipi d'accensione. Dal grafico si riesce a capire il trend del fenomeno della detonazione durante la prova sperimentale ad anticipo crescente. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 1500 rpm.

Risulta nettamente evidente che, a differenza delle altre benzine, nel campione commerciale a più basso numero di RON la detonazione diventi importante agli alti anticipi. Questa caratteristica poco antidetonante della benzina E a queste condizioni di funzionamento del motore, è stato il motivo dell'interruzione della prova ad anticipi prematuri rispetto agli altri campioni.

Un'altra informazione interessante ricavabile dagli indici di detonazione risulta essere rappresentata nella Fig. 6.11. Qui è visibile la tendenza della dispersione degli indici di detonazione con l'anticipo. Da stato dell'arte ci si aspetta che questa caratteristica propria della tipologia di benzina aumenti col crescere dell'anticipo d'accensione.

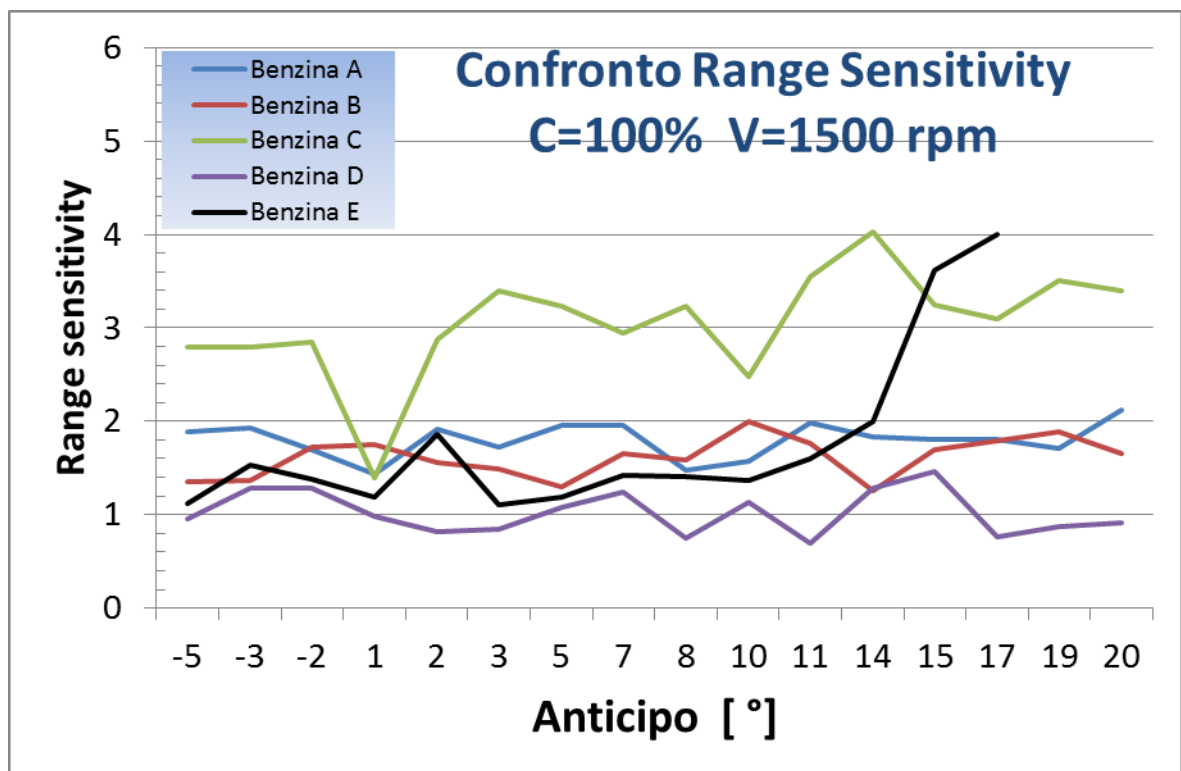


Fig. 6.11 : Grafico rappresentante l'andamento del range interquartile delle distribuzioni degli indici di detonazione acquisiti per le varie benzine, al variare degli anticipi d'accensione. Dal grafico si riesce a capire la dispersione del fenomeno della detonazione durante la prova sperimentale ad anticipo crescente. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 1500 rpm.

Da tale grafico è possibile notare come nel campione E cresca la variabilità degli indici di detonazione andando verso gli alti anticipi. Il comportamento delle altre benzine risulta invece più costante, anche se nel campione C è evidente una più alta dispersione durante l'intera prova.

### ❖ *Pieno carico al regime di 3000 rpm*

Le stesse considerazioni svolte precedentemente saranno applicate ora per i campioni di benzina testati a condizioni di pieno carico ed al regime di 3000 rpm.

Dal freno motore a correnti parassite impostato a velocità costante di 3000 rpm è stato possibile ricavare la coppia motore al variare dell'anticipo motore. Queste prove eseguite su tutti i campioni di benzine a tale regime sono rese confrontabili dal seguente grafico (Fig. 6.12) :

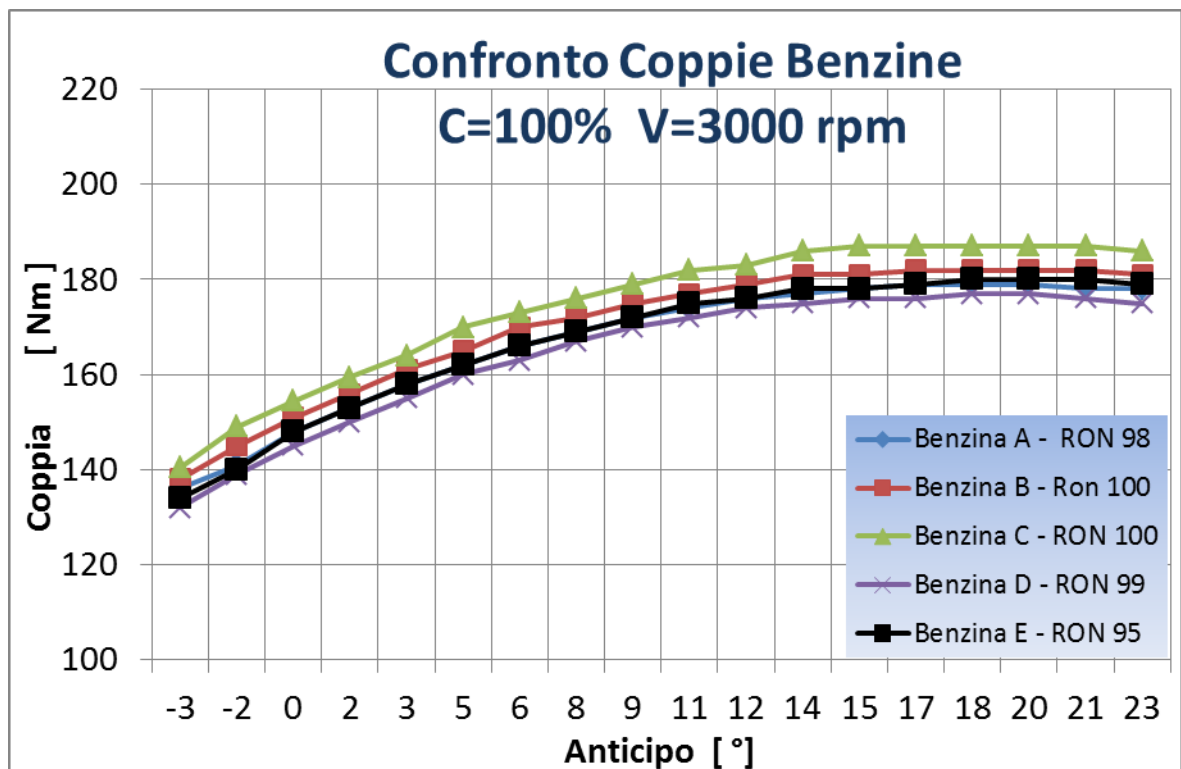


Fig. 6.12 : Grafico rappresentante il confronto della coppia motore al variare dell'anticipo d'accensione per le 5 benzine a disposizione. Per eseguire tale prova ci si è dovuti servire di una centralina aperta che rendesse possibile la regolazione dell'anticipo d'accensione del motore. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 3000 rpm.



Anche in questo caso le differenze ottenute risultano essere assoggettabili esclusivamente alla variabilità sperimentale. Le leggere differenze percentuali sono meglio apprezzabili dal grafico successivo (Fig. 6.13):

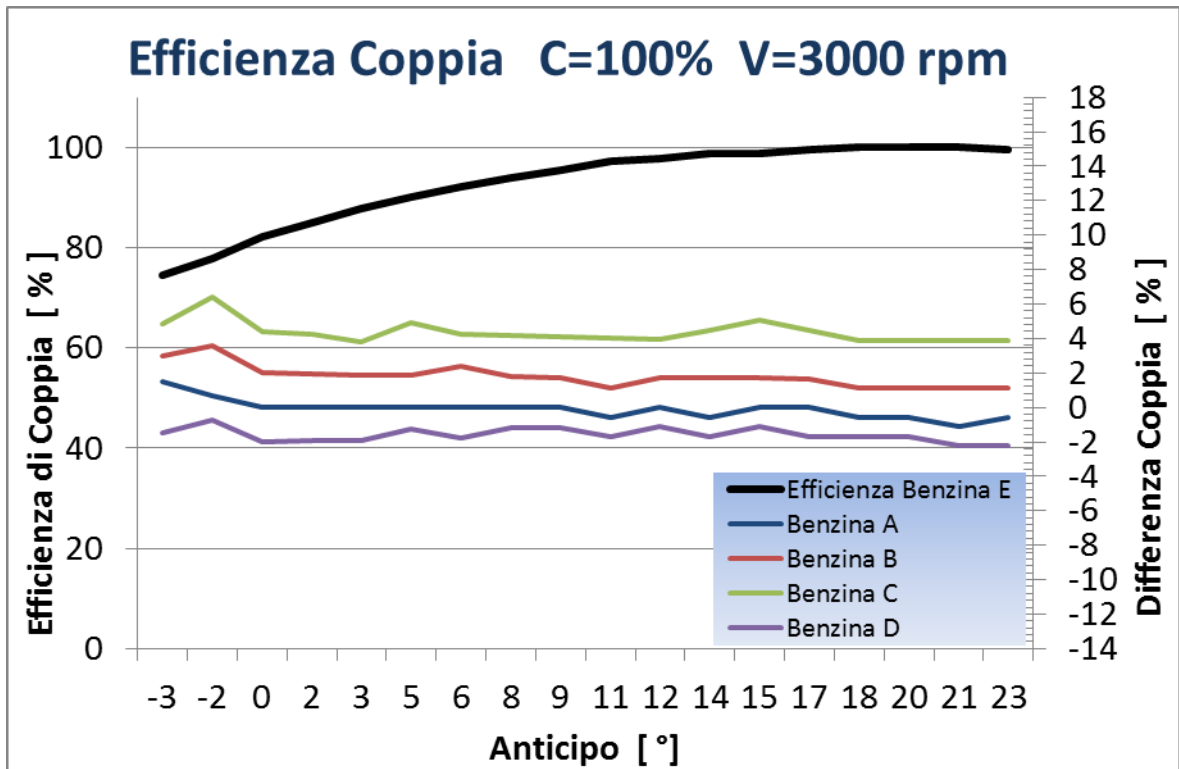
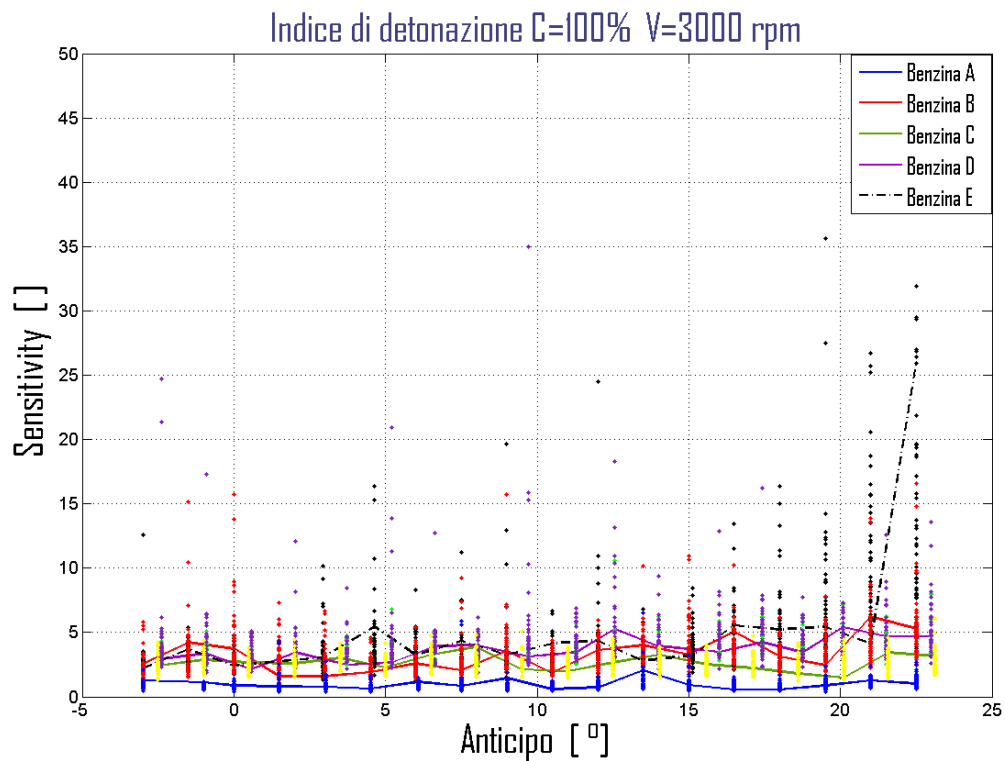


Fig. 6.13 : Grafico rappresentante, tramite l'asse delle ordinate di sinistra, l'efficienza di coppia della benzina di riferimento E. Grazie al secondo asse sono rappresentate le differenze percentuali di coppia delle restanti benzine rispetto ai valori di coppia di quella commerciale. Per eseguire tale prova ci si è dovuti servire di una centralina aperta la quale rendesse possibile la regolazione dell'anticipo d'accensione del motore. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 3000 rpm.

Le differenti prestazioni risultano anche per questo regime poco significative, ma comunque nello stesso rapporto osservato al regime di 1500 rpm.

Dopo aver saggiato l'aspetto prestazionale, passeremo a studiare gli indici di detonazione denominati "sensitivity". Nel seguente grafico (Fig. 6.14) sono riportati i valori degli indici di detonazione per le intere prove di tutti i campioni di benzine a disposizione, dove le prefissate condizioni di funzionamento del motore risultano essere pieno carico e regime di 3000 rpm.



**Fig. 6.14 :** Il presente grafico mostra gli indici di detonazione “sensitivity” al variare dell’anticipo d’accensione ottenuti per le intere prove dei 5 campioni di benzine a disposizione. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 3000 rpm.

A questo regime è già possibile notare una più alta attività detonante ad alti anticipi, in particolare per la benzina E. Queste considerazioni dovrebbero essere ancora più apprezzabili dai seguenti grafici, i quali ne estraggono i principali parametri statistici.

La figura sottostante (Fig. 6.15) mostra, per il regime in esame, la mediana degli indici di detonazione al variare dell’anticipo d’accensione per i campioni di benzina a disposizione. Tale parametro riesce a rappresentare l’andamento del fenomeno della detonazione durante la prova.

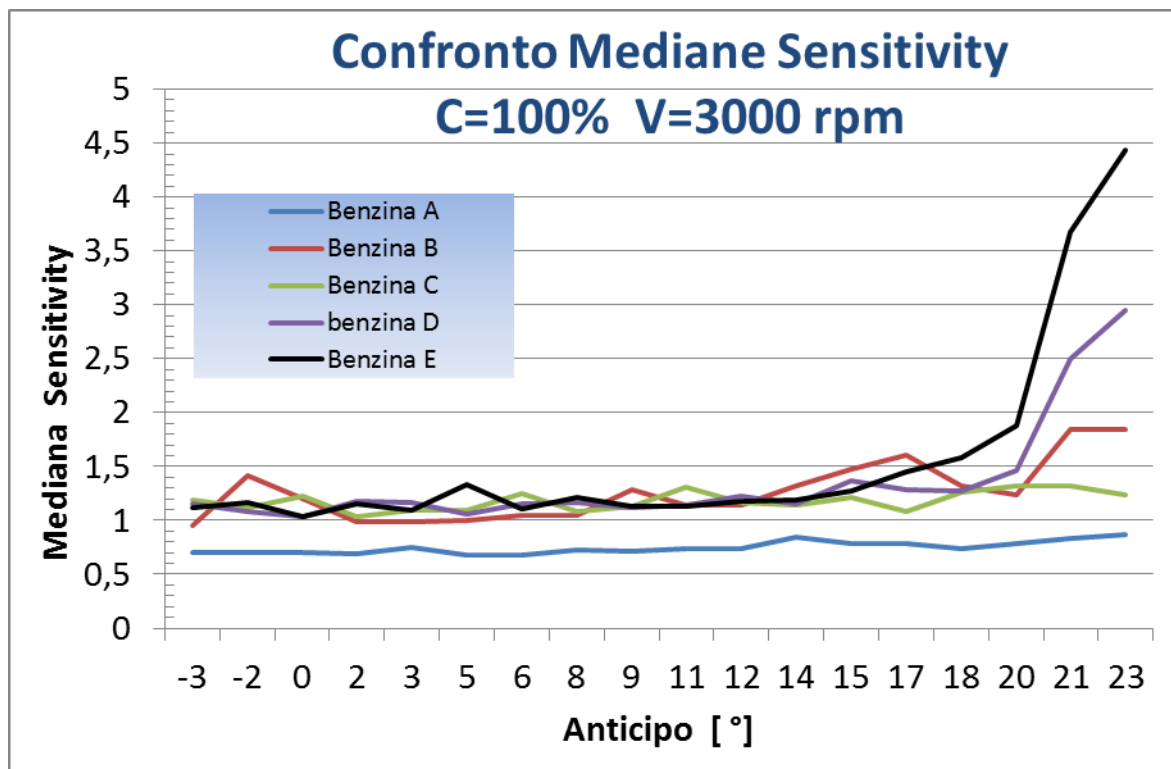


Fig. 6.15 : Grafico rappresentante l'andamento della mediana degli indici di detonazione acquisiti per le varie benzine, al variare degli anticipi d'accensione. Dal grafico si riesce a capire il trend del fenomeno della detonazione durante la prova sperimentale ad anticipo crescente. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 3000 rpm.

Risulta nettamente evidente che, a differenza delle altre benzine, nel campione commerciale (dove si ha il più basso numero di RON) la detonazione diventi importante agli alti anticipi. Un considerevole livello di detonazione è anche visibile nel campione D. Questa caratteristica meno antidetonante della due benzine a queste condizioni di funzionamento del motore è stato rilevato anche in sala prove dal semplice rumore udibile.

Dal seguente grafico (Fig. 6.16) è possibile osservare la tendenza della dispersione degli indici di detonazione al variare dell'anticipo di accensione per le prove effettuate a pieno carico e regime di 3000 rpm.

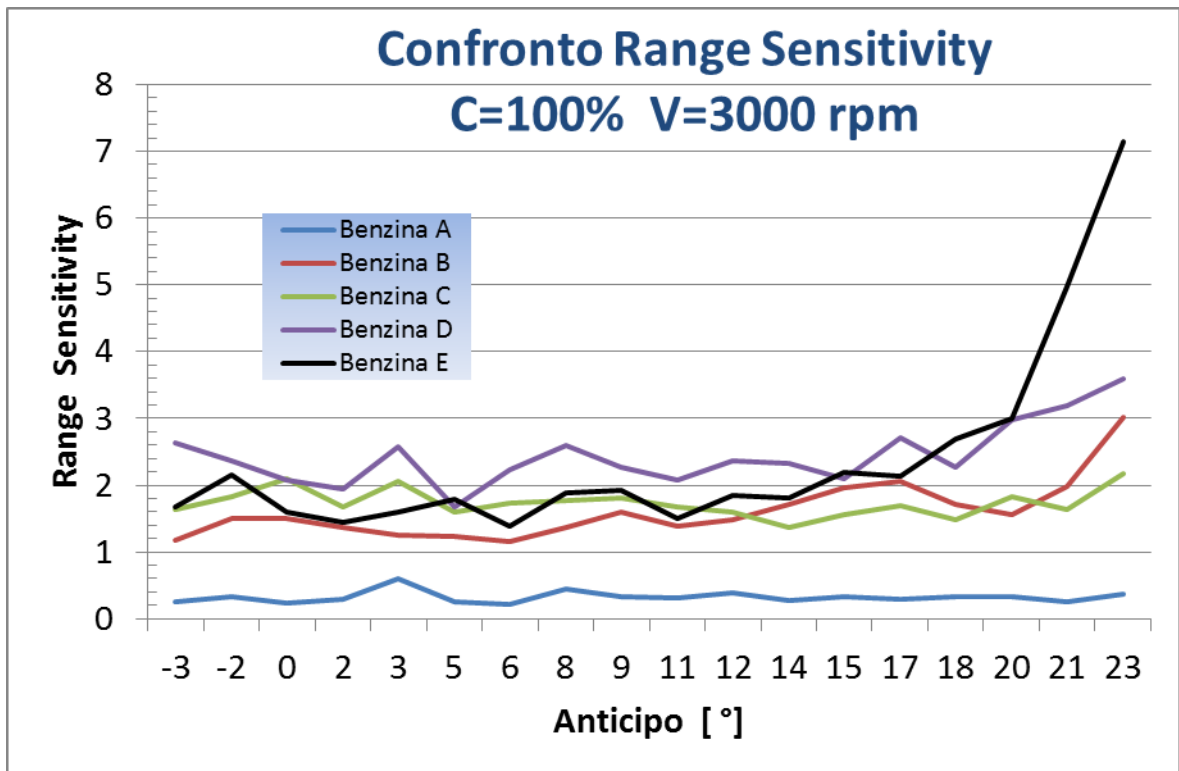


Fig. 6.16 : Grafico rappresentante l'andamento del range interquartile delle distribuzioni degli indici di detonazione acquisiti per le varie benzine, al variare degli anticipi d'accensione. Dal grafico si riesce a capire la dispersione del fenomeno della detonazione durante la prova sperimentale ad anticipo crescente. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 3000 rpm.

Da tale grafico è possibile notare come, sia nel campione E che nel D cresca la variabilità degli indici di detonazione andando verso gli alti anticipi. Il comportamento delle altre benzine risulta invece più costante, specialmente nel campione A dove, oltre a mantenere una variabilità pressoché identica per l'intera prova, essa si attesta su valori estremamente bassi.

### ❖ *Pieno carico al regime di 4500 rpm*

Le stesse considerazioni svolte precedentemente, saranno applicate ora per i campioni di benzina testati a condizioni di pieno carico ed al regime di 4500 rpm.

Dal freno motore a correnti parassite impostato a velocità costante di 4500 rpm è stato possibile ricavare la coppia motore al variare dell'anticipo motore. Queste prove eseguite su tutti i campioni di benzine a tale regime sono rese confrontabili dal seguente grafico (Fig. 6.17):

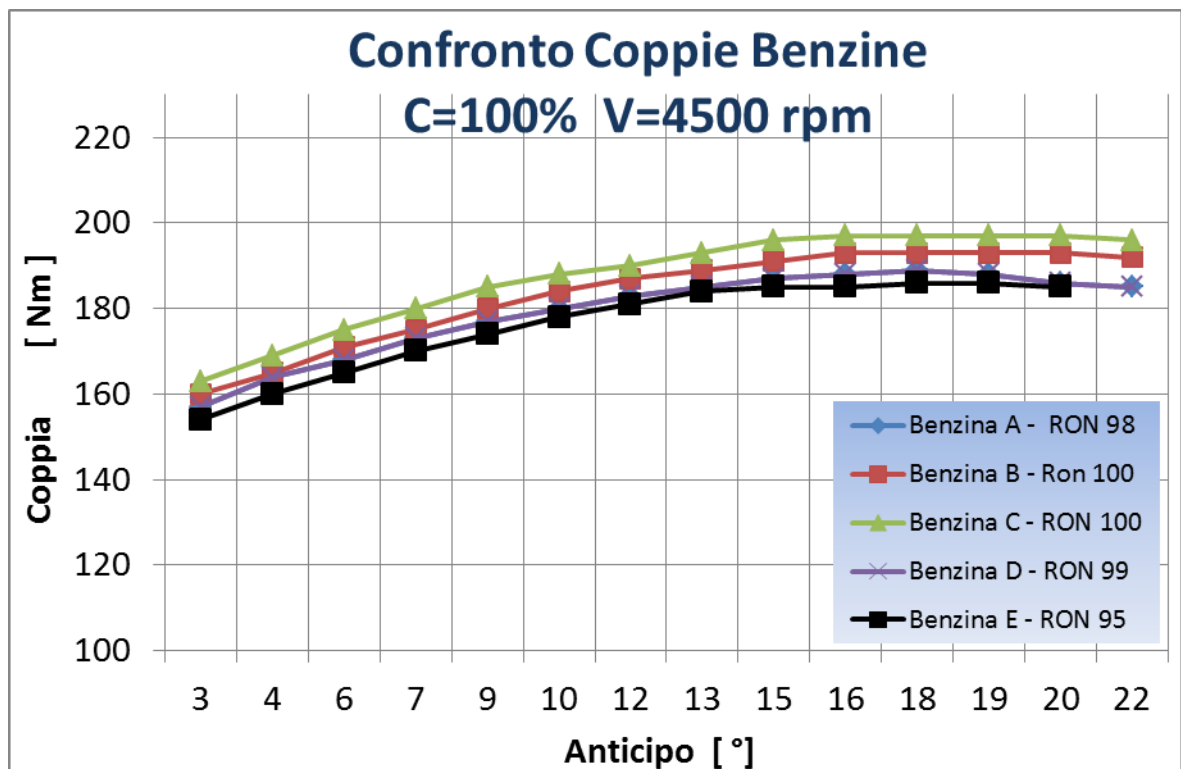


Fig. 6.17 : Grafico rappresentante il confronto della coppia motore al variare dell'anticipo d'accensione per le 5 benzine a disposizione. Per eseguire tale prova ci si è dovuti servire di una centralina aperta la quale rendesse possibile la regolazione dell'anticipo d'accensione del motore. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 4500 rpm.

Anche in questo caso le differenze ottenute risultano essere assoggettabili esclusivamente alla variabilità sperimentale. Le leggere differenze percentuali sono meglio apprezzabili dal grafico successivo :

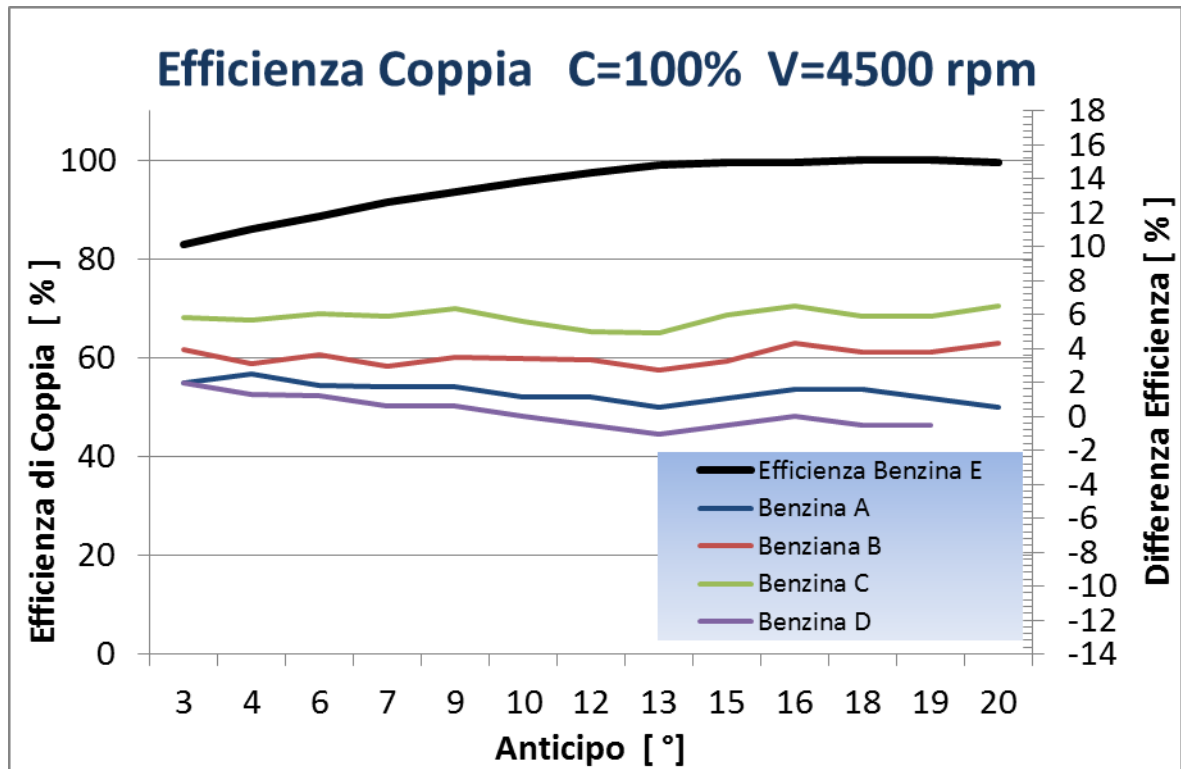
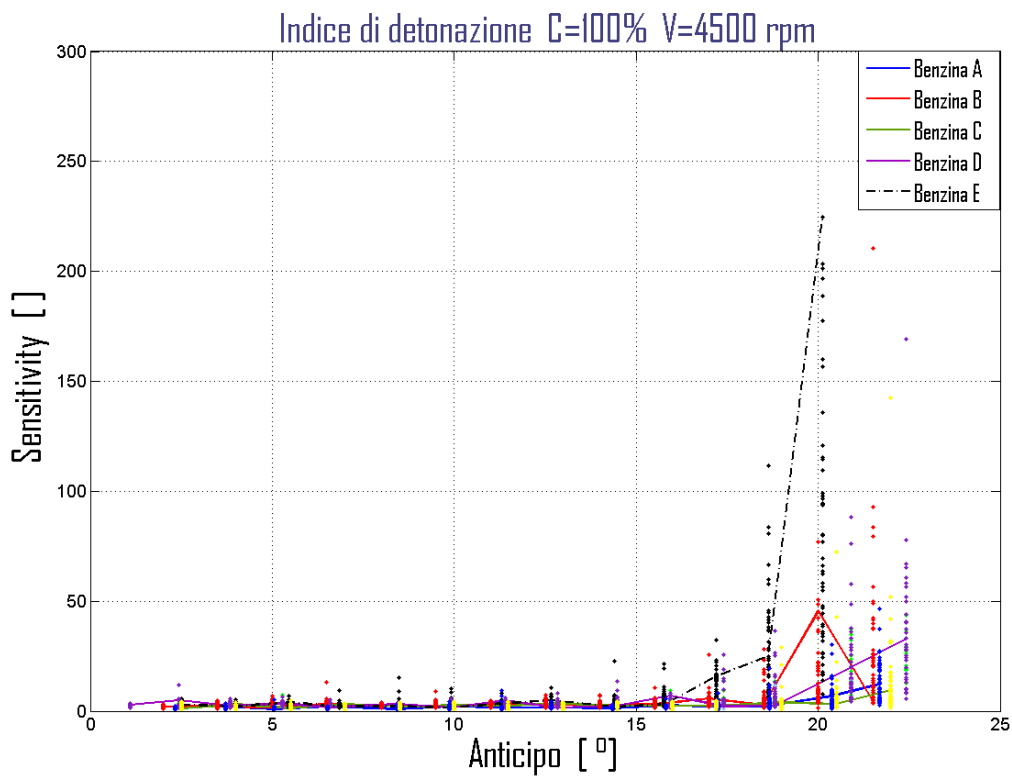


Fig. 6.18 : Grafico rappresentante, tramite l'asse delle ordinate di sinistra, l'efficienza di coppia della benzina di riferimento E. Grazie al secondo asse sono rappresentate le differenze percentuali di coppia delle restanti benzine rispetto ai valori di coppia di quella commerciale. Per eseguire tale prova ci si è dovuti servire di una centralina aperta la quale rendesse possibile la regolazione dell'anticipo d'accensione del motore. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 4500 rpm.

Le differenti prestazioni risultano anche per questo regime poco significative, ma comunque nello stesso rapporto osservato per gli altri regimi

Dopo aver saggiato l'aspetto prestazionale, si è passato a studiare gli indici di detonazione denominati " sensitivity ". Nel seguente grafico (Fig. 6.19) sono riportati i valori degli indici di detonazione per le intere prove di tutti i campioni di benzine a disposizione, dove le prefissate condizioni di funzionamento del motore risultano essere pieno carico e regime di 4500 rpm.



**Fig. 6.19** : Il presente grafico mostra gli indici di detonazione “sensitivity” al variare dell’anticipo d’accensione ottenuti per le intere prove dei 5 campioni di benzine a disposizione. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 4500 rpm.

A questo regime è già possibile notare una più alta attività detonante ad alti anticipi, in particolare per la benzina E. Per tale campione, per non incorrere nella rottura motore dovuto proprio dalle armoniche caratterizzanti il fenomeno della detonazione, si è scelto di interrompere la prova ad anticipi ancora prematuri rispetto a quanto fosse previsto. L’incipiente detonazione è apprezzabile anche in altri campioni, ma comunque in misura meno marcata.

Queste considerazioni dovrebbero essere ancora più apprezzabili dai seguenti grafici, i quali ne estraggono i principali parametri statistici.

Il seguente grafico (Fig. 6.20) mostra, per il regime in esame, la mediana degli indici di detonazione al variare dell'anticipo d'accensione per i campioni di benzina a disposizione. Tale parametro riesce a rappresentare l'andamento del fenomeno della detonazione durante la prova.

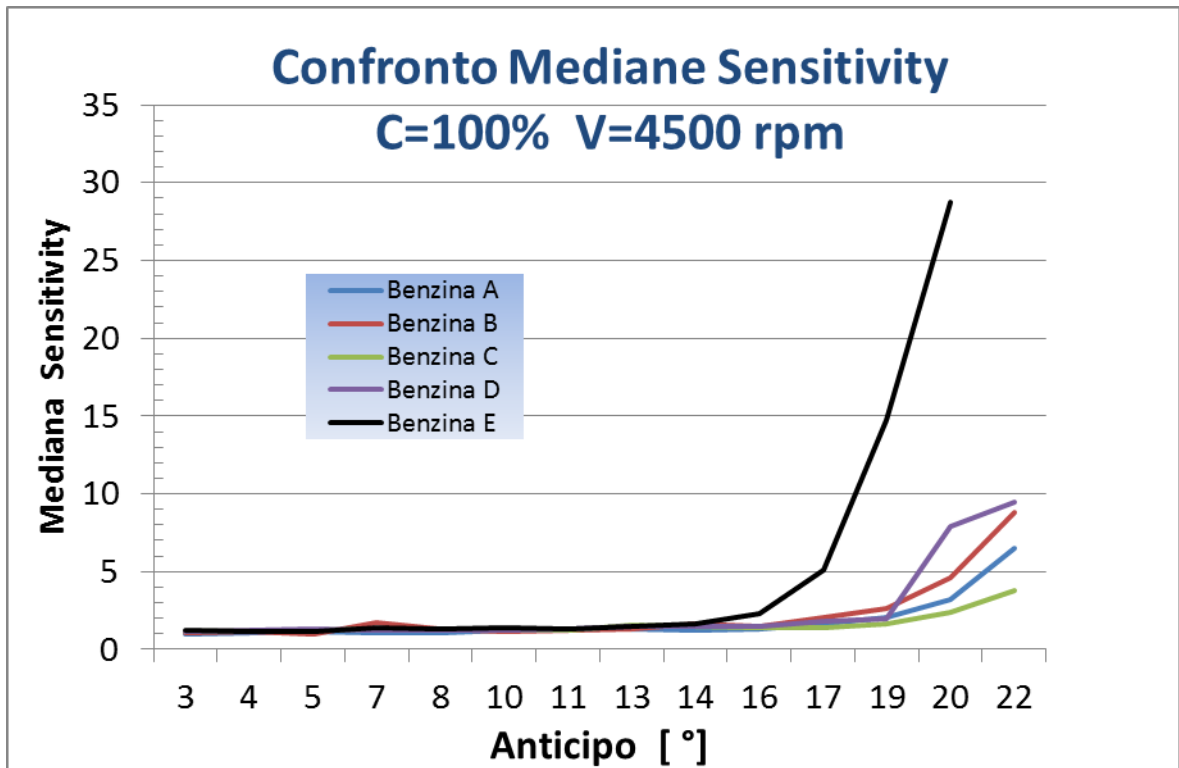


Fig. 6.20 : Grafico rappresentante l'andamento della mediana degli indici di detonazione acquisiti per le varie benzine, al variare degli anticipi d'accensione. Dal grafico si riesce a capire il trend del fenomeno della detonazione durante la prova sperimentale ad anticipo crescente. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 4500 rpm.

Risulta nettamente evidente che, a differenza delle altre benzine, nel campione commerciale (dove si ha il più basso numero di RON) la detonazione diventi importante agli alti anticipi. Un considerevole livello di detonazione è anche visibile nel campione D. Questa caratteristica meno antidetonante della due benzine a queste condizioni di funzionamento del motore è stato rilevato anche in sala prove dal semplice rumore udibile.



Dal seguente grafico (Fig. 6.21) è possibile osservare la tendenza della dispersione degli indici di detonazione al variare dell'anticipo di accensione per le prove effettuate a pieno carico e regime di 4500 rpm.

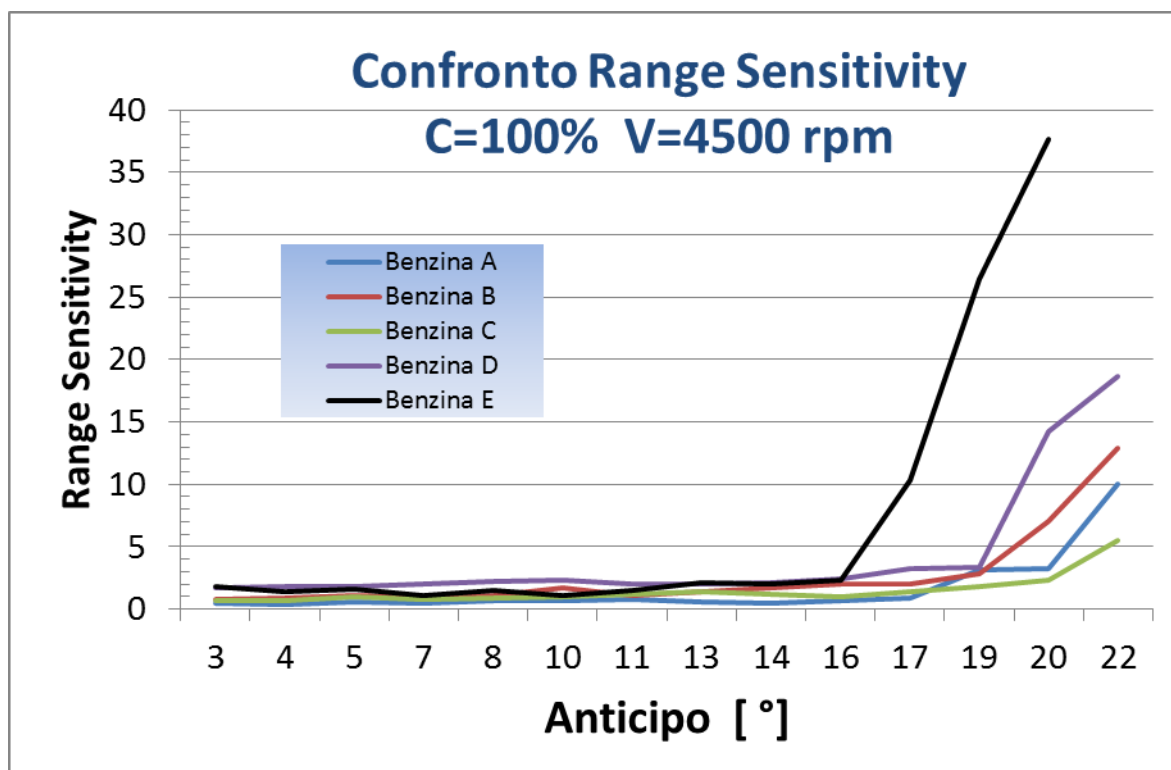


Fig. 6.21 : Grafico rappresentante l'andamento del range interquartile delle distribuzioni degli indici di detonazione acquisiti per le varie benzine, al variare degli anticipi d'accensione. Dal grafico si riesce a capire la dispersione del fenomeno della detonazione durante la prova sperimentale ad anticipo crescente. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 4500 rpm.

Da tale grafico è possibile notare come, sia nel campione E che nel D cresca la variabilità degli indici di detonazione andando verso gli alti anticipi. Il comportamento delle altre benzine risulta sempre peggiorare con l'aumentare dell'anticipo, ma in misura ridotta rispetto a quella commerciale di riferimento.

## 6.3 Confronto Surrogati

Nel seguente paragrafo sono rappresentati i risultati sia prestazionali che antidetonanti ottenuti su quattro surrogati a disposizione. I risultati ottenuti sono funzione del grado di anticipo che è stato spazzolato durante le prove a centralina aperta tenendo costanti le altre condizioni di funzionamento del motore.

Le uniche prove che hanno restituito valori realmente confrontabili sono state quelle a pieno carico, mentre quelle a carico parziale differivano tra loro di quantità considerevoli. Questa ampia differenza è dovuta ad una impossibilità da parte della centralina di perfetta regolazione dell'angolo di farfalla dell'aspirazione durante le diverse prove effettuate, la quale ha provocato differenti carichi applicati al motore. Tali scostamenti sulle condizioni di funzionamento non hanno invece interessato le prove a pieno carico, dove l'apertura della farfalla al 100% non è stata fonte di incertezza.

I confronti a pieno carico tra i diversi surrogati sono poi studiati per i differenti regimi impostati dalla prova sperimentale : 1500, 3000 e 4500 rpm.

### ❖ *Pieno carico al regime di 1500 rpm*

Le stesse considerazioni svolte precedentemente per le benzine saranno applicate ora per i campioni di surrogati. In primo luogo si analizzeranno i risultati ottenuti a condizioni di pieno carico ed al regime di 1500 rpm.

Dal freno motore a correnti parassite impostato a velocità costante di 1500 rpm è stato possibile ricavare la coppia motore al variare dell'anticipo motore. Queste prove eseguite su tutti i campioni di surrogati a tale regime sono rese confrontabili dal seguente grafico (Fig. 6.22):

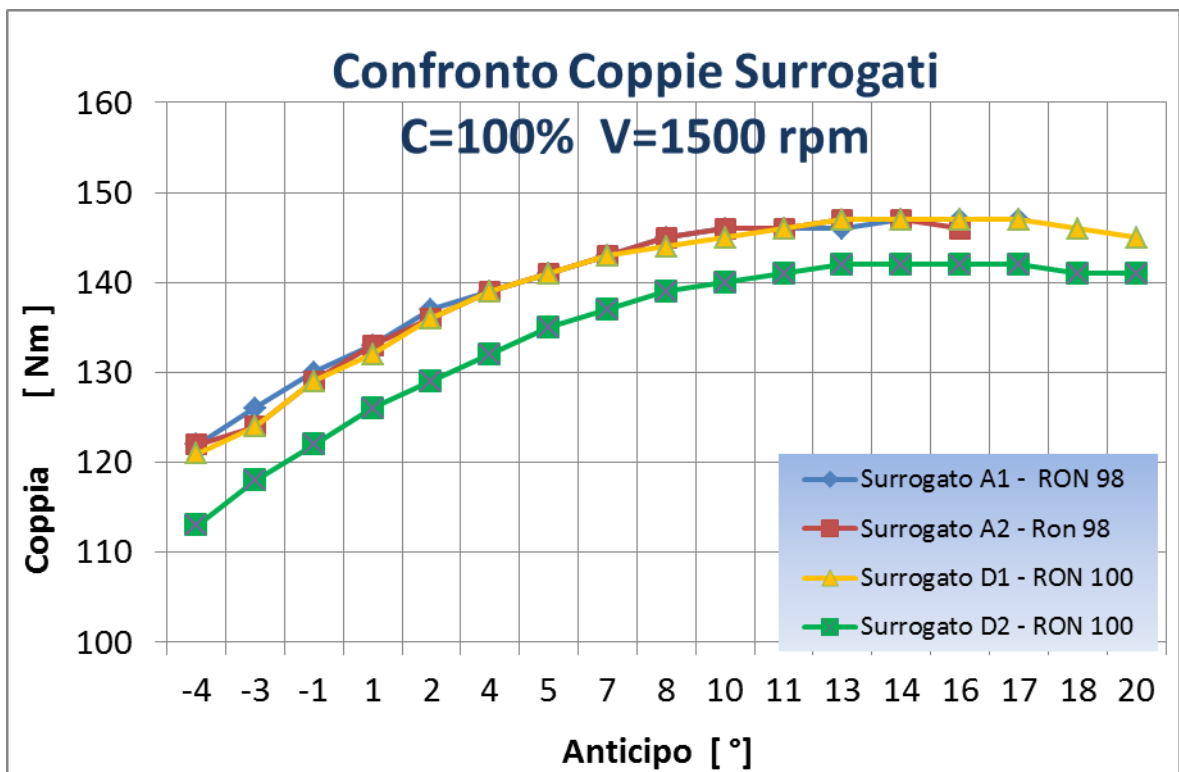


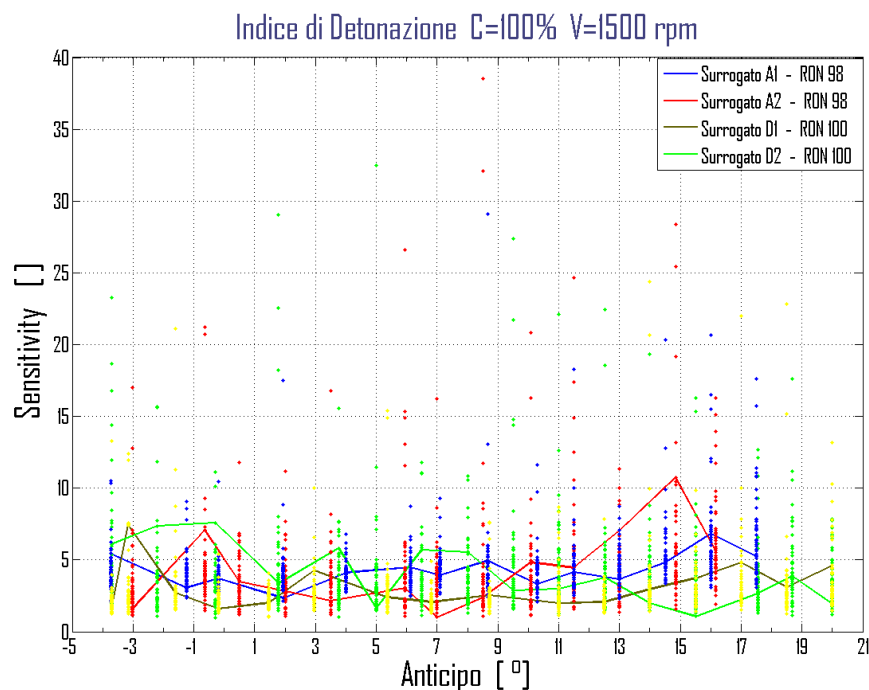
Fig. 6.22 : Grafico rappresentante il confronto della coppia motore al variare dell'anticipo d'accensione per i quattro surrogati a disposizione. Per eseguire tale prova ci si è dovuti servire di una centralina aperta che rendesse possibile la regolazione dell'anticipo d'accensione del motore. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 1500 rpm.

Da tale confronto è possibile carpire lo stesso trend prestazionale per tutti i campioni. I valori risultano leggermente differenti, in modo più marcato quelli che riguardano il surrogato D2. Questa discrepanza può essere imputata alle diverse condizioni di temperatura e pressione a cui le prove sono state eseguite.

Il più alto numero RON dei due campioni di surrogati caratterizzati dalla lettera D rispetto a quelli con lettera A è reso noto dal fatto che ci si è potuti spingere fino a più alti gradi di anticipo. Questo aspetto si manifesta in un troncamento delle due linee rappresentanti i surrogati A1 ed A2, proprio a causa di una alta detonazione udibile dalla sala prove che ha forzato l'interruzione prematura della prova stessa.

Il surrogato D2 risulta avere prestazioni inferiori fino ad un 5% rispetto a quella commerciale, dovuto probabilmente ad una sfortunata condizione atmosferica che ne ha penalizzato leggermente l'efficienza motoristica.

Dopo aver saggiato l'aspetto prestazionale, si è passato a studiare gli indici di detonazione denominati "sensitivity", descritti precedentemente nel capitolo 5. Essi descrivono la caratteristica antidetonante dei diversi surrogati al variare dell'anticipo d'accensione. Nel seguente grafico (Fig. 6.23) sono riportati i valori degli indici di detonazione per le intere prove di tutti i campioni di surrogati a disposizione, dove le prefissate condizioni di funzionamento del motore risultano essere pieno carico e regime di 1500 rpm.

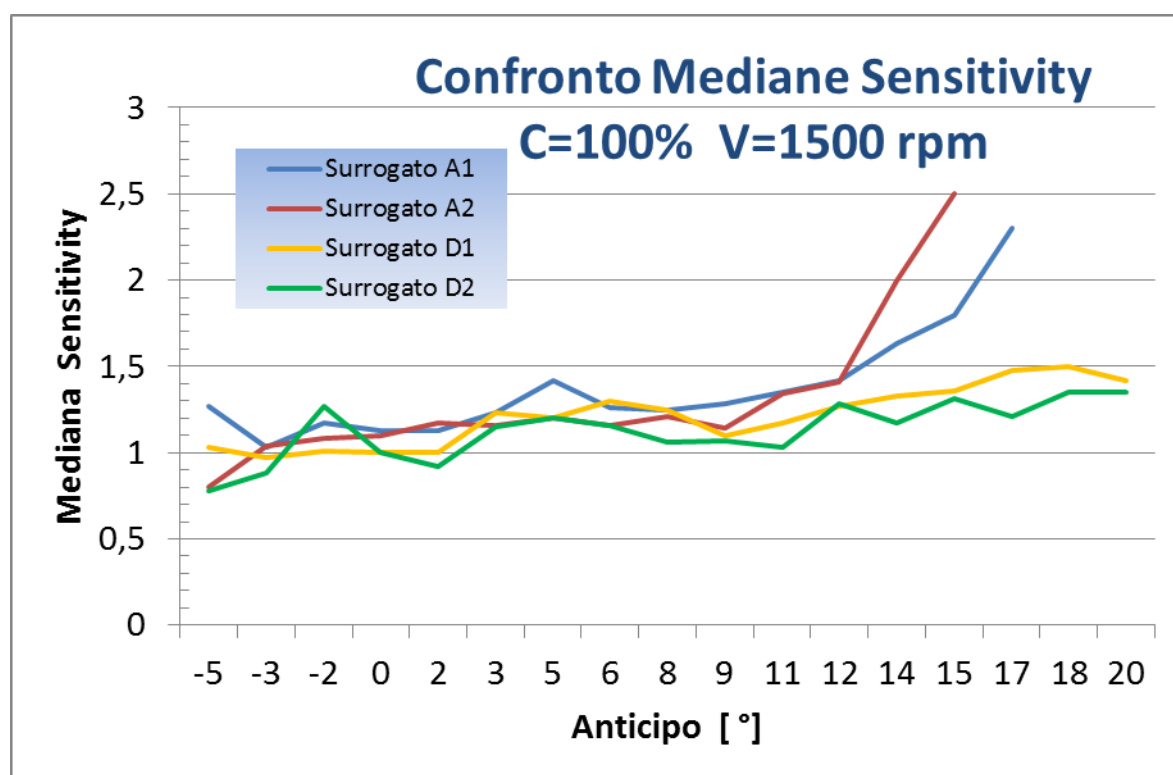


**Fig. 6.23** : Il presente grafico mostra gli indici di detonazione "sensitivity" al variare dell'anticipo d'accensione ottenuti per le intere prove dei 4 campioni di surrogati a disposizione. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 1500 rpm.

A questo regime è già possibile notare una più alta attività detonante ad alti anticipi esclusivamente per i surrogati della famiglia A. Per tali campioni si è scelto di interrompere la prova ad anticipi prematuri rispetto a quanto fosse previsto, per non incorrere nella rottura motore dovuto proprio alle armoniche caratterizzanti il fenomeno della detonazione.

Queste considerazioni dovrebbero essere ancora più apprezzabili dai seguenti grafici, i quali ne estraggono i principali parametri statistici.

La figura sottostante (Fig. 6.24) mostra, per il regime in esame, la mediana degli indici di detonazione al variare dell'anticipo d'accensione per i campioni di surrogati a disposizione. Tale parametro riesce a rappresentare l'andamento del fenomeno della detonazione durante la prova.



**Fig. 6.24** : Grafico rappresentante l'andamento della mediana degli indici di detonazione acquisiti per i vari surrogati, al variare degli anticipi d'accensione. Dal grafico si riesce a capire il trend del fenomeno della detonazione durante la prova sperimentale ad anticipo crescente. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 1500 rpm

Risulta nettamente evidente che, a differenza dei surrogati contrassegnati dalla lettera D, nei rimanenti (dove si ha il più basso numero di RON) la detonazione diventi importante agli alti anticipi.

Questa caratteristica meno antidetonante della due benzine a queste condizioni di funzionamento del motore è stato rilevato anche in sala prove dal semplice rumore udibile.

Dal seguente grafico (Fig. 6.25) è possibile osservare la tendenza della dispersione degli indici di detonazione al variare dell'anticipo di accensione per le prove effettuate a pieno carico e regime di 1500 rpm.

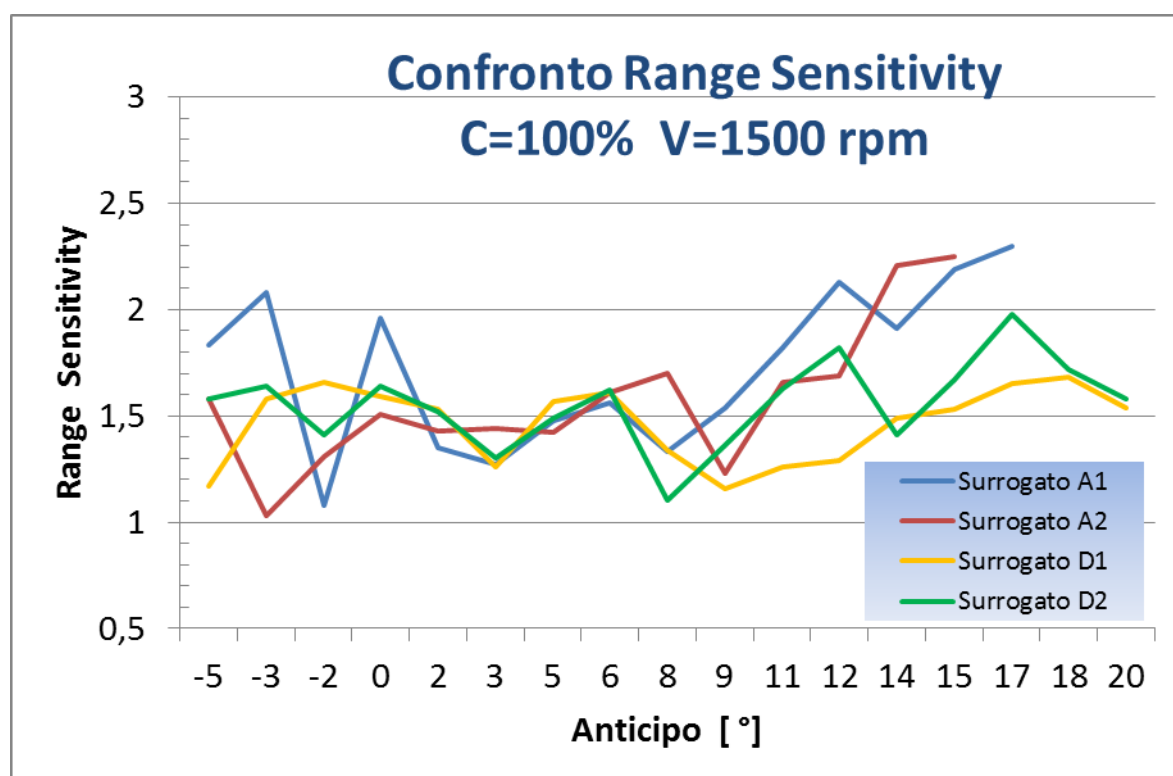


Fig. 6.25 : Grafico rappresentante l'andamento del range interquartile delle distribuzioni degli indici di detonazione acquisiti per i vari surrogati, al variare degli anticipi d'accensione. Dal grafico si riesce a capire la dispersione del fenomeno della detonazione durante la prova sperimentale ad anticipo crescente. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 1500 rpm.

Da tale grafico è possibile notare come, in entrambi i campioni A ci sia un andamento crescente della variabilità degli indici di detonazione andando verso gli alti anticipi. Il comportamento degli altri surrogati risulta più costante.

### ❖ *Pieno carico al regime di 3000 rpm*

Le stesse considerazioni svolte precedentemente saranno ora applicate sui campioni di surrogati in condizioni di funzionamento di pieno carico e regime di 3000 rpm.

Dal freno motore a correnti parassite impostato a velocità costante di 3000 rpm è stato possibile ricavare la coppia motore al variare dell'anticipo motore. Queste prove eseguite su tutti i campioni di surrogati a tale regime sono rese confrontabili dal seguente grafico (Fig. 6.26) :

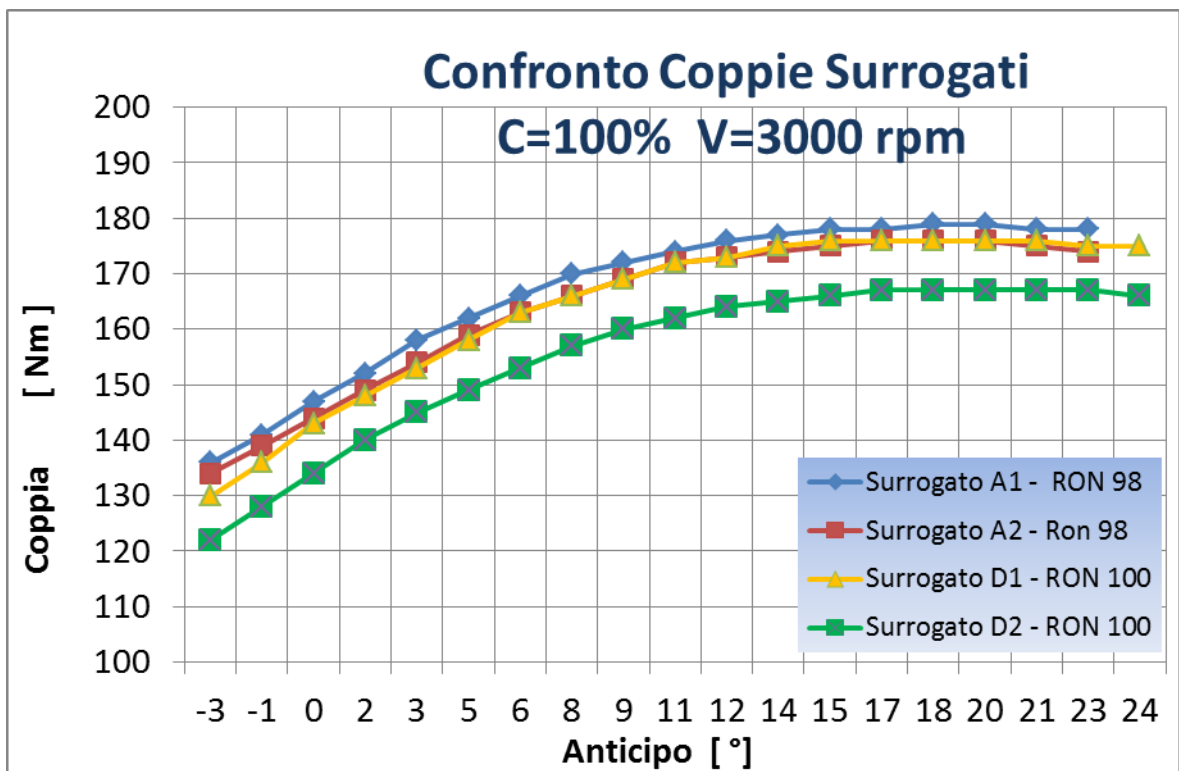


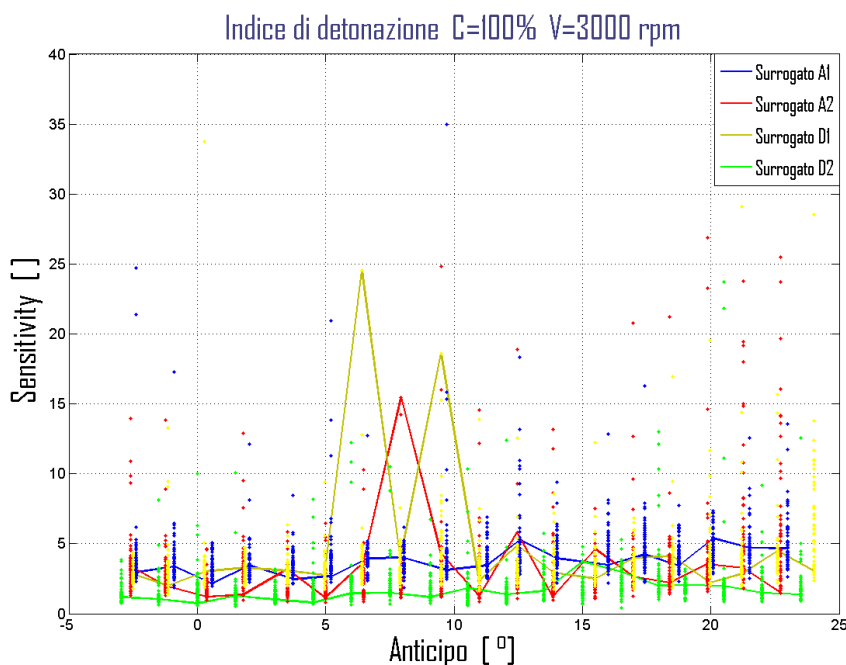
Fig. 6.26 : Grafico rappresentante il confronto della coppia motore al variare dell'anticipo d'accensione per i quattro surrogati a disposizione. Per eseguire tale prova ci si è dovuti servire di una centralina aperta la quale rendesse possibile la regolazione dell'anticipo d'accensione del motore. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 3000 rpm.

Da tale confronto è possibile carpire lo stesso trend prestazionale per tutti i campioni. I valori risultano leggermente differenti, in modo più marcato quelli che riguardano il surrogato D2. Questa discrepanza può essere imputata alle diverse condizioni di temperatura e pressione a cui le prove sono state eseguite.

Il più alto numero RON dei due campioni di surrogati caratterizzati dalla lettera D rispetto a quelli con lettera A è reso noto dal fatto che ci si è potuti spingere fino a più alti gradi di anticipo. Questo aspetto si manifesta in un troncamento delle due linee rappresentanti i surrogati A1 ed A2, proprio a causa di un inizio di udibile detonazione che ha forzato l'interruzione prematura della prova stessa.

Il surrogato D2 risulta avere prestazioni inferiori rispetto a quella commerciale, dovuto probabilmente ad una sfortunata condizione atmosferica che ne ha penalizzato leggermente l'efficienza motoristica.

Dopo aver saggiato l'aspetto prestazionale, si è passato a studiare gli indici di detonazione denominati "sensitivity", descritti precedentemente nel capitolo 5. Essi descrivono la caratteristica antidetonante dei diversi surrogati al variare dell'anticipo d'accensione. Nel seguente grafico (Fig. 6.27) sono riportati i valori degli indici di detonazione per le intere prove di tutti i campioni di surrogati a disposizione, dove le prefissate condizioni di funzionamento del motore risultano essere pieno carico e regime di 3000 rpm.

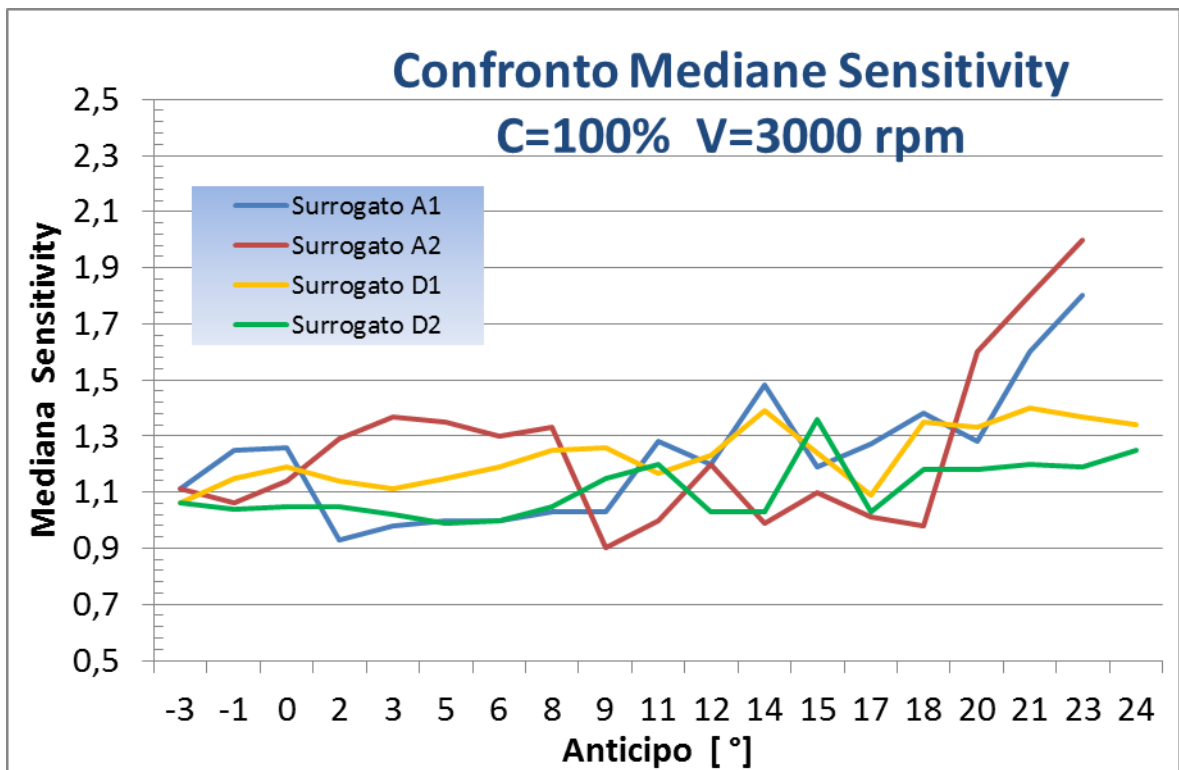


**Fig. 6.27** : Il presente grafico mostra gli indici di detonazione "sensitivity" al variare dell'anticipo d'accensione ottenuti per le intere prove dei 4 campioni di surrogati a disposizione. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 3000 rpm.



A questo regime non è distintamente possibile notare da tale grafico un trend detonante per i surrogati. Dagli spike presenti ad anticipi intermedi sembrerebbe che proprio lì ci sia un aumento del fenomeno della detonazione. In realtà, questa è una falsa informazione dovuta al tentativo di creare, dai dati così plottati, una linea che ne rappresentasse l'andamento. Tale linea, come già detto precedentemente, mette in comunicazione esclusivamente dei punti acquisiti durante la prova ma senza accertarsi se essi possano essere outliers o comunque poco rappresentativi della reale famiglia di punti, anticipo per anticipo. Se casualmente vengono scelti questi casi, come accaduto in questa situazione, la linea acquisisce una derivata che non rappresenta la reale tendenza delle distribuzioni. Per questo motivo ci si è serviti dei seguenti due grafici, i quali ne estraggono i principali parametri statistici.

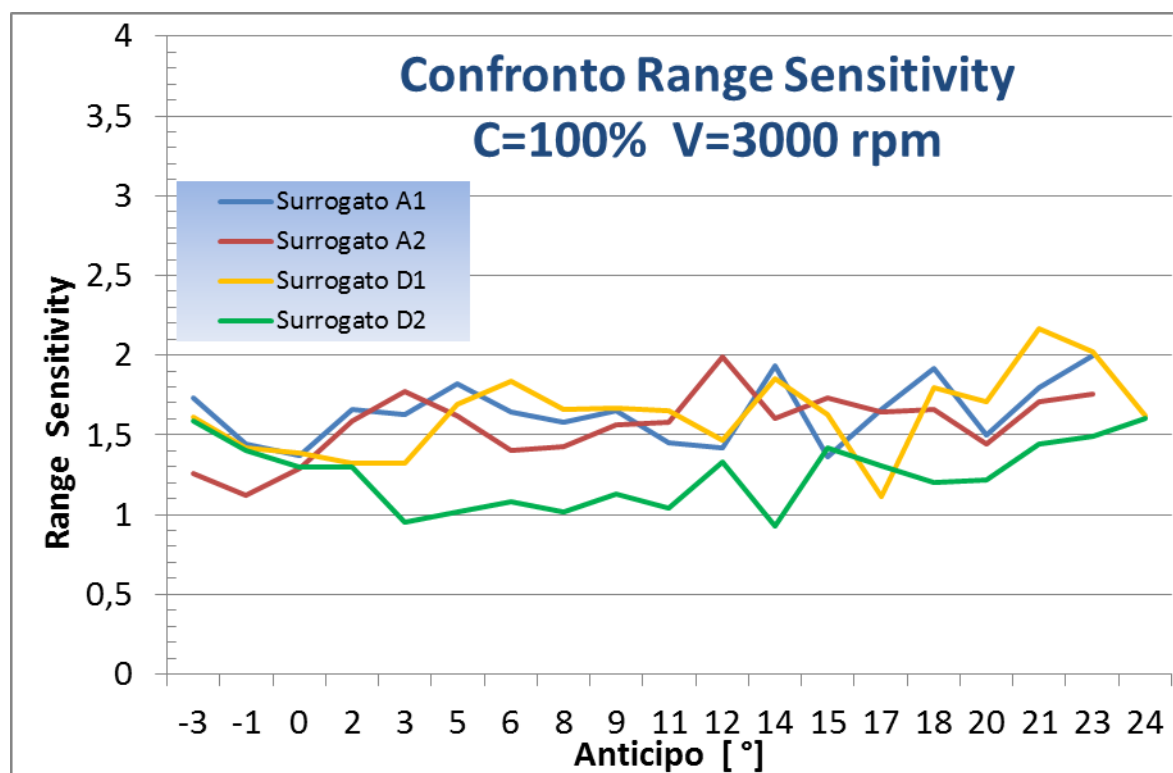
Il seguente grafico (Fig. 6.28) mostra, per il regime in esame, la mediana degli indici di detonazione al variare dell'anticipo d'accensione per i campioni di surrogati a disposizione. Tale parametro riesce a rappresentare l'andamento del fenomeno della detonazione durante la prova.



**Fig. 6.28** : Grafico rappresentante l'andamento della mediana degli indici di detonazione acquisiti per i vari surrogati, al variare degli anticipi d'accensione. Dal grafico si riesce a capire il trend del fenomeno della detonazione durante la prova sperimentale ad anticipo crescente. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 3000 rpm

Risulta leggermente evidente che, a differenza dei surrogati contrassegnati dalla lettera D, nei rimanenti (dove si ha il più basso numero di RON) la detonazione diventi più importante agli alti anticipi. Tenendo conto dei valori riportati sull'asse delle ordinate, a questo regime non si ha una marcata differenza di comportamento, pur rimanendo in accordo con le informazioni ottenute finora.

Dal seguente grafico (Fig. 6.29) è possibile osservare la tendenza della dispersione degli indici di detonazione al variare dell'anticipo di accensione per le prove effettuate a pieno carico e regime di 3000 rpm.



**Fig. 6.29** : Grafico rappresentante l'andamento del range interquartile delle distribuzioni degli indici di detonazione acquisiti per i vari surrogati, al variare degli anticipi d'accensione. Dal grafico si riesce a capire la dispersione del fenomeno della detonazione durante la prova sperimentale ad anticipo crescente. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 3000 rpm.

Anche da tale grafico non è possibile notare variabilità degli indici di detonazione scansionando i vari anticipi. Ciò mette in evidenza una variabilità dei surrogati più costante a tali condizioni di funzionamento. Questo non significa una non propensione alla detonazione, ma esclusivamente una più omogeneità di comportamento dei singoli cicli.

### ❖ *Pieno carico al regime di 4500 rpm*

Le stesse considerazioni svolte precedentemente saranno ora applicate sui campioni di surrogati in condizioni di funzionamento di pieno carico e regime di 4500 rpm.

Dal freno motore a correnti parassite impostato a velocità costante di 4500 rpm è stato possibile ricavare la coppia motore al variare dell'anticipo motore. Queste prove eseguite su tutti i campioni di surrogati a tale regime sono rese confrontabili dal seguente grafico (Fig. 6.30) :

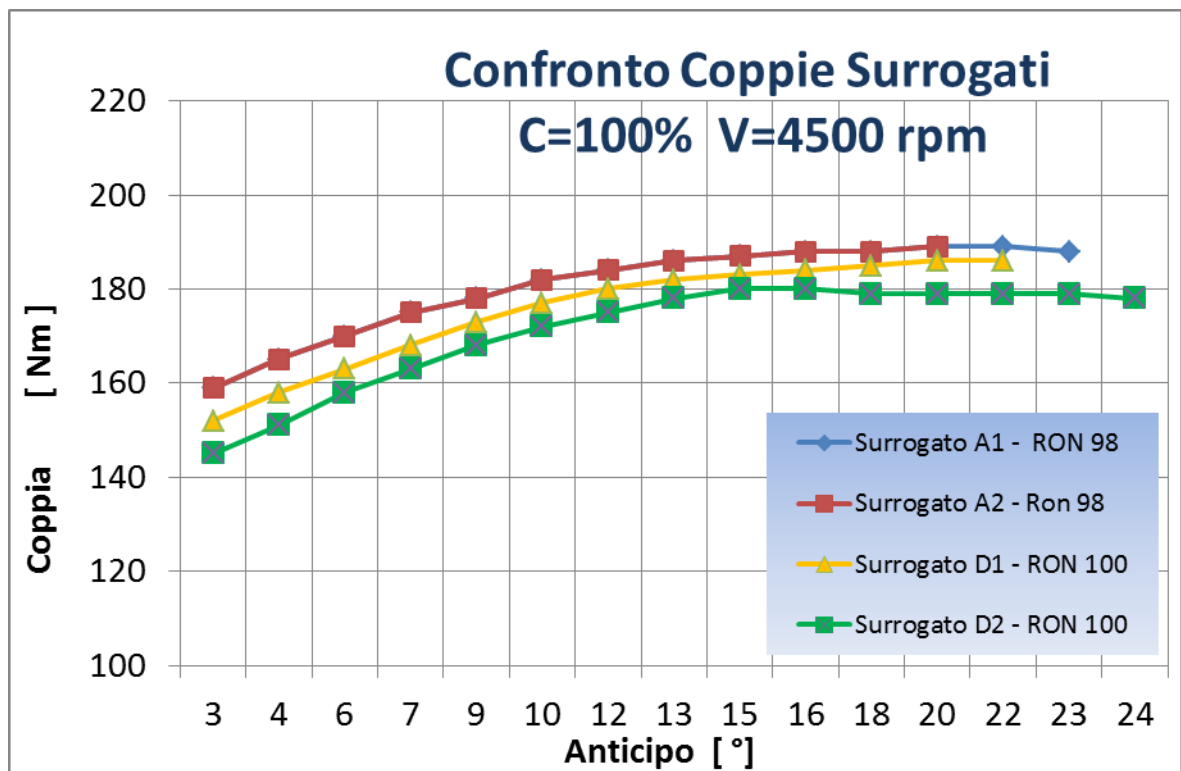


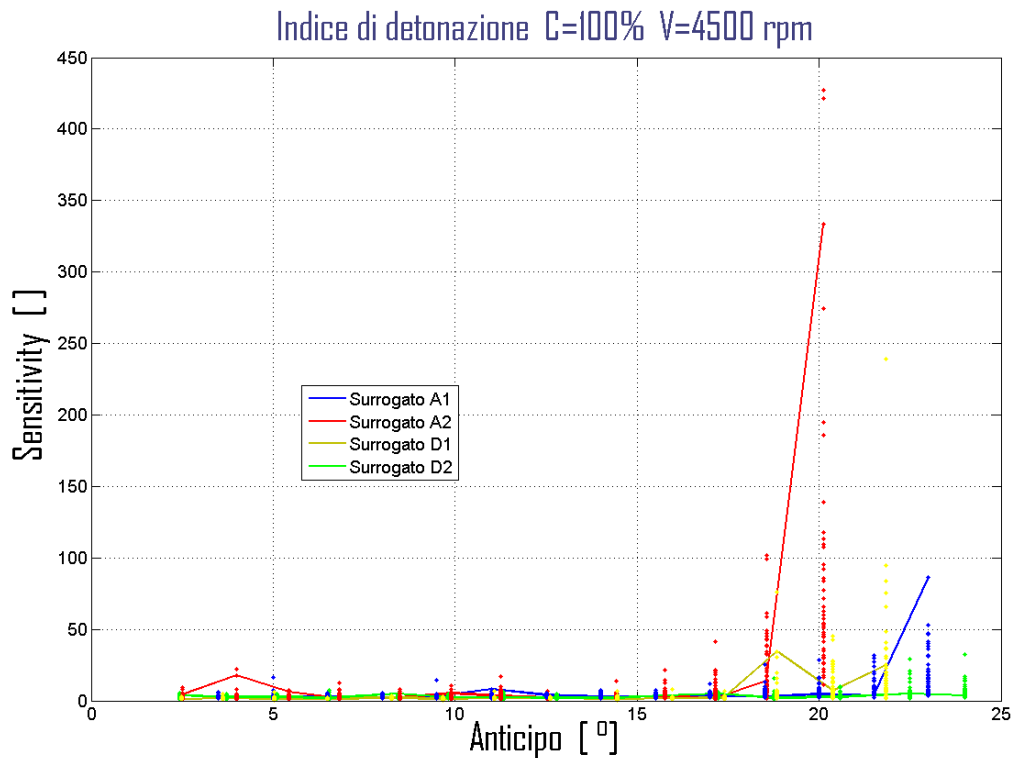
Fig. 6.30 : Grafico rappresentante il confronto della coppia motore al variare dell'anticipo d'accensione per i quattro surrogati a disposizione. Per eseguire tale prova ci si è dovuti servire di una centralina aperta la quale rendesse possibile la regolazione dell'anticipo d'accensione del motore. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 4500 rpm.

Da tale confronto è possibile carpire lo stesso trend prestazionale per tutti i campioni. I valori risultano leggermente differenti, in modo più marcato quelli che riguardano il surrogato D2. Questa discrepanza può essere imputata alle diverse condizioni di temperatura e pressione a cui le prove sono state eseguite.

A differenza dei regimi analizzati finora, durante questa prova ci si è dovuti fermare ad anticipi inferiori rispetto ai massimi decisi a priori anche per il surrogato D1, pur avendo RON 100. Questo è accaduto anche per i due surrogati identificati con la lettera A. Non si sono avvertite forti detonazioni, invece, analizzando il surrogato D2. Questo si può notare meglio analizzando gli indici di detonazione successivamente.

Come già notato in precedenza, il surrogato D2 risulta avere prestazioni inferiori agli altri per una sfortunata condizione atmosferica che ne ha penalizzato leggermente l'efficienza motoristica.

Dopo aver saggiato l'aspetto prestazionale, si è passato a studiare gli indici di detonazione denominati " sensitivity ". Essi descrivono la caratteristica antidetonante dei diversi surrogati al variare dell'anticipo d'accensione. Nel seguente grafico (Fig. 6.31) sono riportati i valori degli indici di detonazione per le intere prove di tutti i campioni di surrogati a disposizione, dove le prefissate condizioni di funzionamento del motore risultano essere pieno carico e regime di 4500 rpm.



**Fig. 6.31** : Il presente grafico mostra gli indici di detonazione “sensitivity” al variare dell’anticipo d’accensione ottenuti per le intere prove dei 4 campioni di surrogati a disposizione. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 1500 rpm.

A questo regime è già possibile notare una più alta attività detonante ad alti anticipi per i surrogati della famiglia A. Per tali campioni si è scelto di interrompere la prova ad anticipi prematuri rispetto a quanto fosse previsto, per non incorrere nella rottura motore dovuto alle armoniche caratterizzanti il fenomeno della detonazione. Da tale grafico non si possono trarre a priori altre considerazioni, ma è utile valutare i successivi due , che, oltre a validare le supposizioni appena fatte, riescono a studiare e rappresentare meglio il fenomeno.

Il seguente grafico (Fig. 6.32) mostra, per il regime in esame, la mediana degli indici di detonazione al variare dell’anticipo d’accensione per i campioni di surrogati a disposizione. Tale parametro riesce a rappresentare l’andamento del fenomeno della detonazione durante la prova.

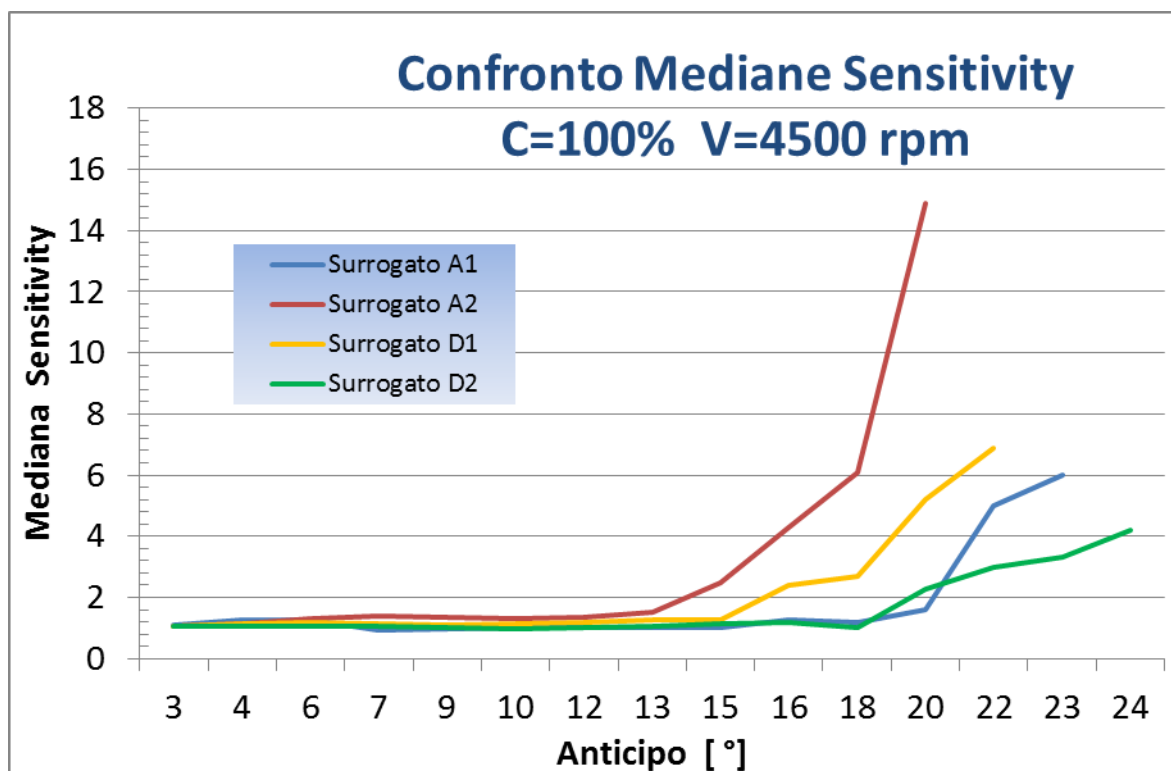


Fig. 6.32 : Grafico rappresentante l'andamento della mediana degli indici di detonazione acquisiti per i vari surrogati, al variare degli anticipi d'accensione. Dal grafico si riesce a capire il trend del fenomeno della detonazione durante la prova sperimentale ad anticipo crescente. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 4500 rpm

Su questo grafico si riesce a carpire il reale comportamento dei differenti surrogati, cosa che dal plottaggio della totalità dei valori ottenuti per l'intera prova veniva difficile definire. Appare palese l'alta ed anticipata tendenza detonante del campione A2.

Cosa meno ovvia è l'alta detonazione ad anticipi non del tutto spinti del surrogato D1, caratterizzato da un RON 100. Pur se portato a detonazione, il surrogato A1 riesce quasi a permettere il termine completo della prova, spingendosi con anticipi di poco inferiori a quelli ottenuti utilizzando il surrogato D2, che risulta di gran lunga essere il più prestante per quanto riguarda le sue caratteristiche antidetonanti.

Dal seguente grafico (Fig. 6.33) è possibile osservare la tendenza della dispersione degli indici di detonazione al variare dell'anticipo di accensione per le prove effettuate a pieno carico e regime di 4500 rpm.

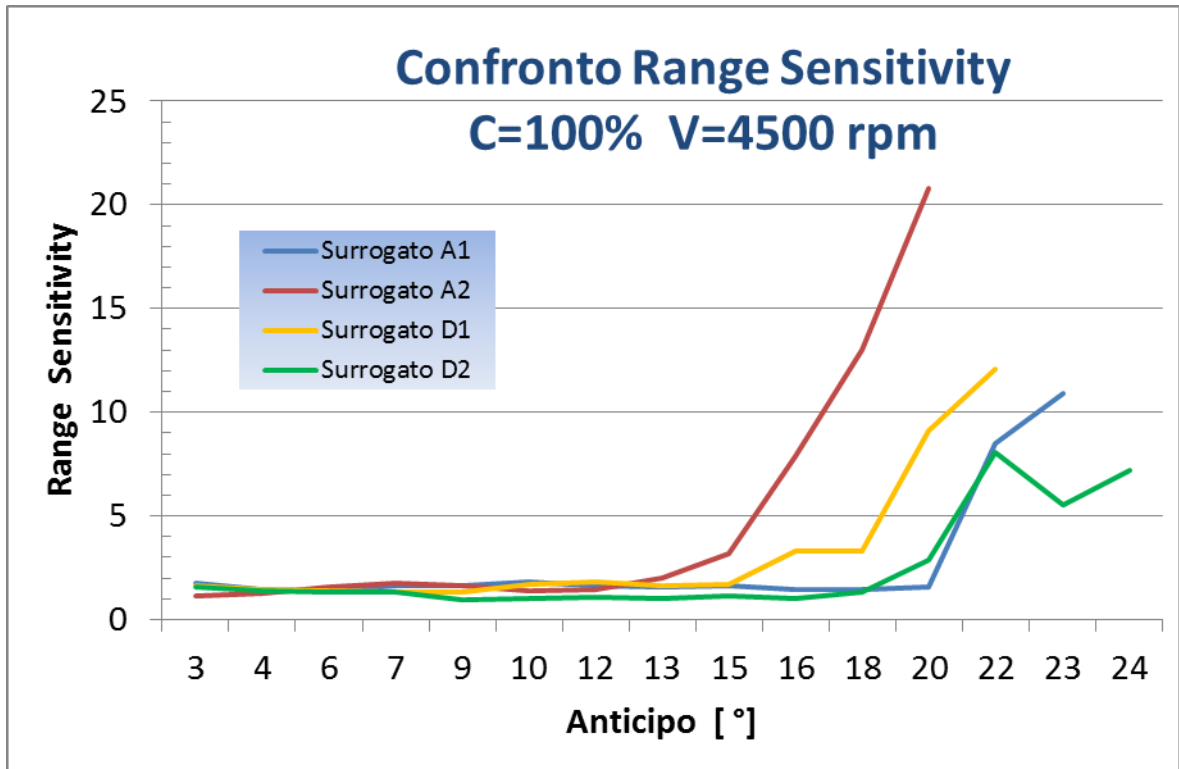


Fig. 6.33 : Grafico rappresentante l'andamento del range interquartile delle distribuzioni degli indici di detonazione acquisiti per i vari surrogati, al variare degli anticipi d'accensione. Dal grafico si riesce a capire la dispersione del fenomeno della detonazione durante la prova sperimentale ad anticipo crescente. Le prove sono state eseguite a pieno carico ed al regime di 4500 rpm.

Da tale grafico è possibile notare come, in entrambi i campioni A, ci sia un andamento crescente della variabilità degli indici di detonazione andando verso gli alti anticipi. Tra questi due campioni, il surrogato A2 ha dimostrato una tendenza ancor più grande a tale dispersione. Questo è valido, in modo anche molto marcato, per il surrogato D1. Il comportamento del surrogato risulta più costante, pur facendo notare un innalzamento finale.

## 6.4 Determinazione della responsabilità di detonazione

A causa della gran parte di composti chimici che compongono le benzine, risulta alquanto complicato asseguire ai singoli componenti la responsabilità della tendenza alla detonazione. Questo tipo di operazione risulta però agevole operando sui surrogati, visto proprio il basso numero di composti al loro interno. I composti tenuti in considerazione da questa analisi sono :

- La percentuale volumetrica di Toluene
- La percentuale volumetrica di Isoottano
- La percentuale volumetrica di N-eptano
- La percentuale volumetrica di Diisobutilene (Olefina)

Tramite l'organizzazione di una tabella di combinazioni richiamante il metodo sperimentale DOE ( Design of Experiments ), è stato possibile asseguire ai singoli composti chimici la giusta responsabilità detonante rilevata dalle prove sperimentali eseguite. Come parametro osservato, infatti, ci si è riferiti al massimo valore delle mediane degli indici di detonazione rilevati durante l'intera prova. Operando in questo modo non è possibile valutare in quale fase della prova questi valori sono stati raggiunti. Queste considerazioni sono comunque state completamente esaurite nei paragrafi precedenti di questo capitolo.

Come fattore da tenere in considerazione, oltre che le specie chimiche, si è aggiunto il regime del motore. Questo si è ritenuto opportuno visto il differente comportamento che i surrogati possono avere alle varie condizioni di funzionamento del motore.

**Tabella 6.1 : Tabella rappresentate le tipologie e quantità volumetriche di specie chimiche nei surrogati**

	Surrogato			
	A1	A2	D1	D2
	% v	% v	% v	% v
Toluene	31.71	25.50	25.95	31.71
Isoottano	42.02	23.72	27.70	44.95
N-eptano	13.02	19.32	15.54	10.35
Diisobutilene	0.00	17	17	0.00



Dalla precedente tabella (Tabella 6.1) che mostra le composizioni dei quattro surrogati a disposizione si riesce ad ottenere i seguenti due grafici. Essi rivelano sia i principali effetti della presenza delle specie chimiche sulla proprietà antidetonante dei surrogati, e sia quella scaturita dalle loro interazioni.

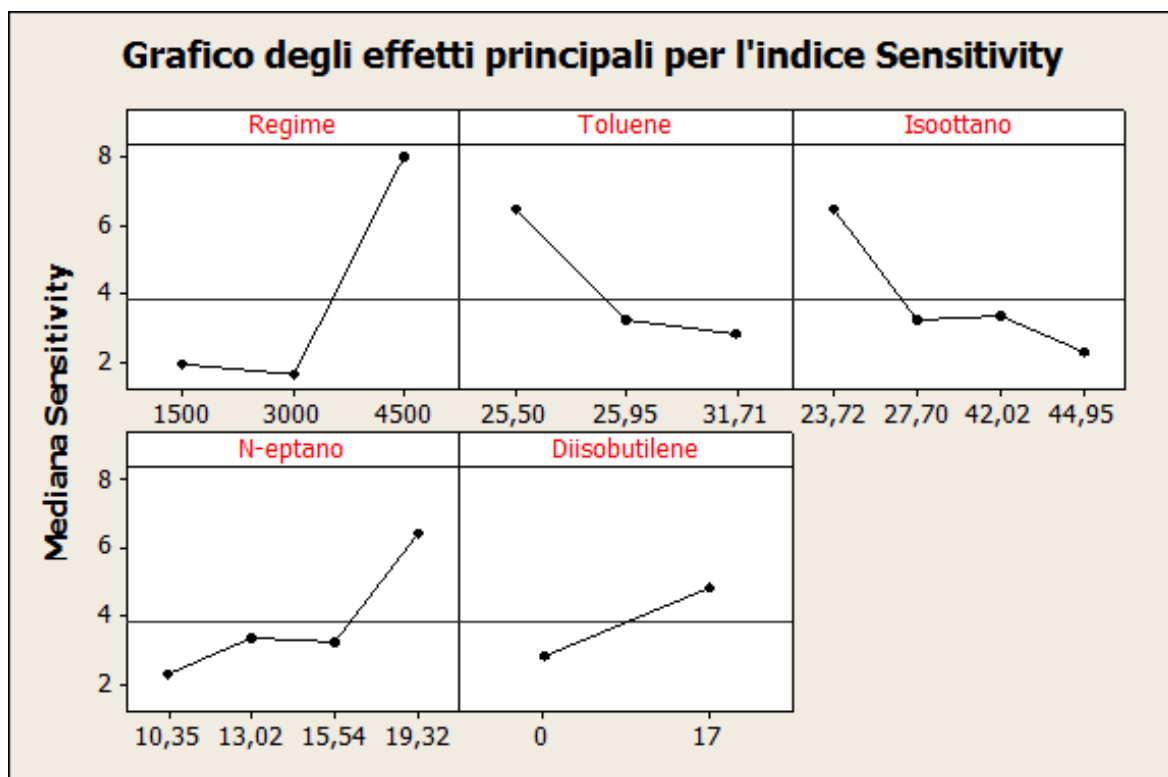


Fig. 6.34 : Grafico riportante gli effetti sulla detonazione da parte dei diretti composti chimici presenti all'interno dei quattro campioni di surrogati a nostra disposizione, e dei regimi a cui sono state eseguite le prove. Come indice di detonazione viene utilizzata la mediana della Sensitivity, che viene plottata in base ai differenti livelli dei fattori chimici tenuti in considerazione.

Come era facile intuire, dal precedente grafico si nota come la presenza della detonazione si faccia insistente agli alti regimi (4500 rpm). La presenza di olefina all'interno del surrogato tende ad abbassare leggermente la caratteristica antidetonante del surrogato, mentre ha effetto opposto l'aumento in percentuale volumetrica di Toluene ed Isoottano. Un ulteriore peggioramento nell'incorrere nel così discusso fenomeno viene apportato anche dall'aumento in quantità del N-eptano. L'effetto inverso del comportamento di quest'ultimo rispetto all'Isoottano è largamente giustificato anche dalla definizione della scala del numero di ottano. Infatti convenzionalmente ci si riferisce al valore zero nel caso dell'N-eptano puro, ed al 100 per l'Isoottano.

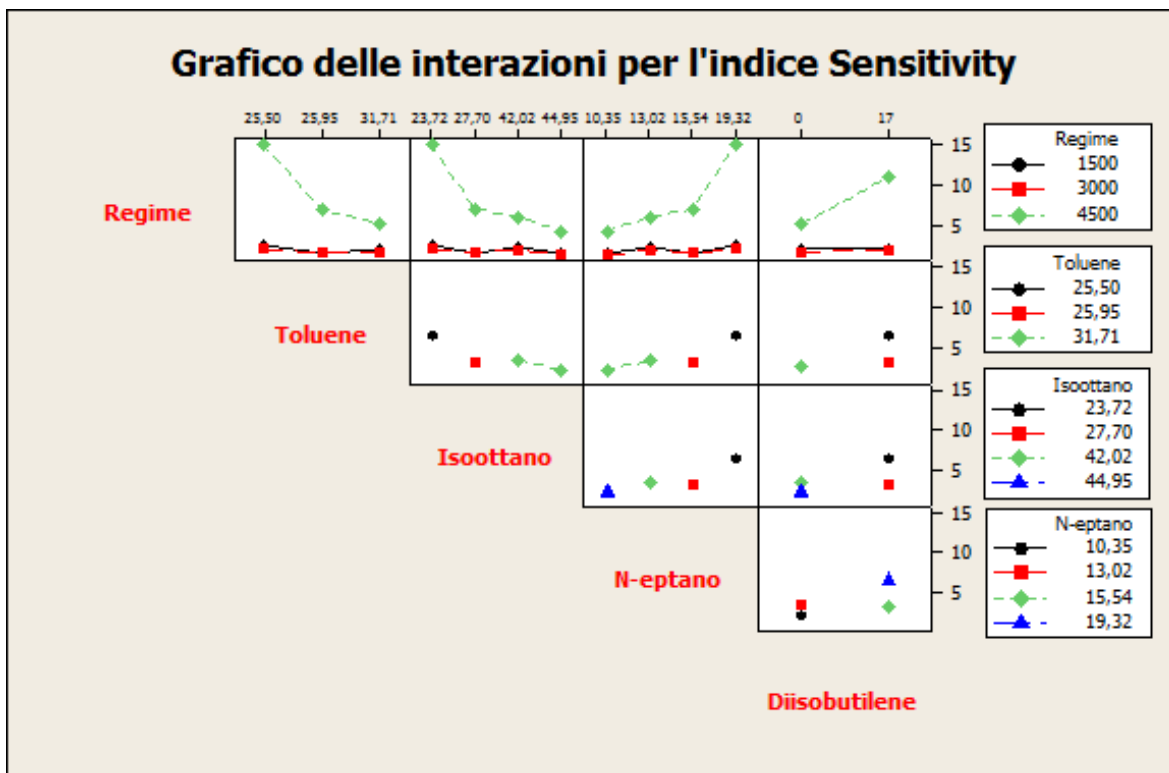


Fig. 6.35 : Grafico riportante gli effetti sulla detonazione da parte delle interazioni dei composti chimici presenti all'interno dei quattro campioni di surrogati a nostra disposizione, e dei regimi a cui sono state eseguite le prove. Come indice di detonazione viene utilizzata la mediana della Sensitivity, che viene plottata in base ai differenti livelli dei fattori chimici tenuti in considerazione.

Tale grafico, oltre che confermare le valutazioni appena sostenute, fa notare come gli effetti di ogni composto siano largamente più vistosi al regime di 4500 rpm rispetto gli altri. Alcuni sotto-grafici risultano di scarso interesse visto che i pochi campioni a disposizione fanno collassare le tendenze delle interazioni in singoli punti. Questo fattore non riesce a far imputare il trend del fenomeno al solo fattore sotto esame, pur comunque restituendo semplici informazioni sulle prove stesse.



## 7 Osservazioni Conclusive

---

Dalla visione generale dei risultati ottenuti nel precedente capitolo è possibile attribuire ai vari combustibili una determinata capacità antidetonante, sia in visione oggettiva osservando gli indici di detonazione ai differenti regimi di funzionamento del motore, e sia in visione relativa comparando tra loro i risultati ottenuti per le benzine e per i surrogati.

Non sono invece attribuibili alle capacità intrinseche dei vari combustibili le variazioni di prestazione in condizioni di funzionamento a centralina standard. Questo è un risultato prevedibile visto il loro uguale potere calorifico inferiore in grado di sviluppare. Le differenze osservate sono attribuibili esclusivamente alle variabilità sperimentali, dovute alle differenti giornate in cui le prove sono state eseguite e, di conseguenza, alle pressioni e temperature esterne in giuoco.

Dalle prove sperimentali eseguite sulle diverse benzine risulta palese la bassa proprietà antidetonante della benzina commerciale ( campione E ) in rapporto alle altre benzine caratterizzate da numeri di ottano più alti. Questo quadro che emerge ad ogni regime di funzionamento del motore osservato, viene amplificato al più alto regime studiato (4500 rpm). Osservando le scale degli anticipi è possibile accorgersi di quando le prove si sono dovute interrompere per l'alto rumore indotto dal fenomeno della detonazione. Infatti, oltre a tener conto dei valori dell'indice Sensitivity, per un'analisi completa bisogna riferirsi anche a che anticipi essi ricorrono.

Dal seguente grafico riassuntivo (Fig. 7.1) si sono tratte delle generiche considerazioni sulle proprietà antidetonanti delle benzine in funzione del loro numero di ottano. Non si sono quindi relazionati i valori degli indici ottenuti ai relativi anticipi, ma ci si è soffermati esclusivamente sul massimo valore di detonazione ottenuta in ogni prova.

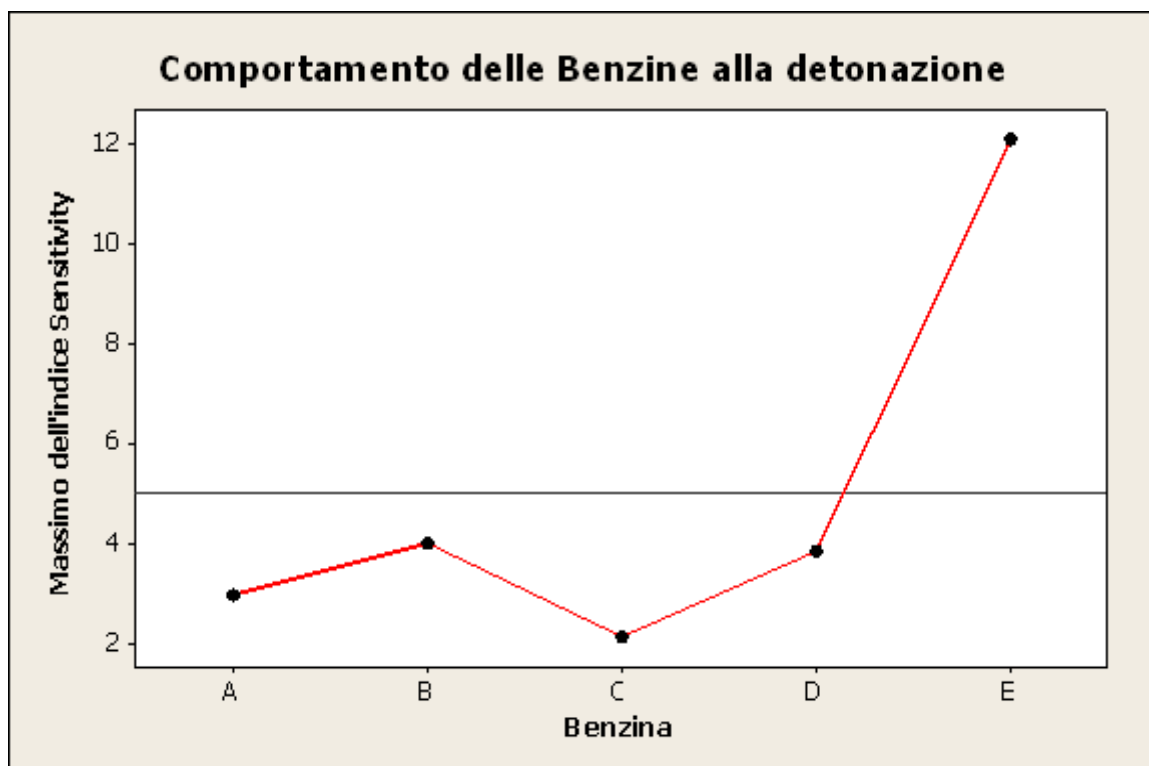


Fig. 7.1 : Grafico rappresentante il generale comportamento dei 5 campioni di benzine alla detonazione. L'asse delle ordinate indica il massimo valore dell'indice Sensitivity mediato su tutte le prove effettuate.

Dal grafico si nota la più bassa tendenza alla detonazione dei campioni a più alto numero di ottano (A,B,C e D) , rispetto agli alti valori corrispondenti alla benzina commerciale. Approfondendo tale studio, è stato possibile attribuire esclusivamente a questo indicatore il comportamento delle benzine. Si è tenuto in considerazione sia il numero RON che MON.

Tabella 7.1 : Numeri di ottano per i campioni di benzine, sia RON che MON.

	Benzina				
	A	B	C	D	E
RON	98,3	100,4	100,5	99	95,2
MON	88,2	88,6	88,2	87,5	85,2

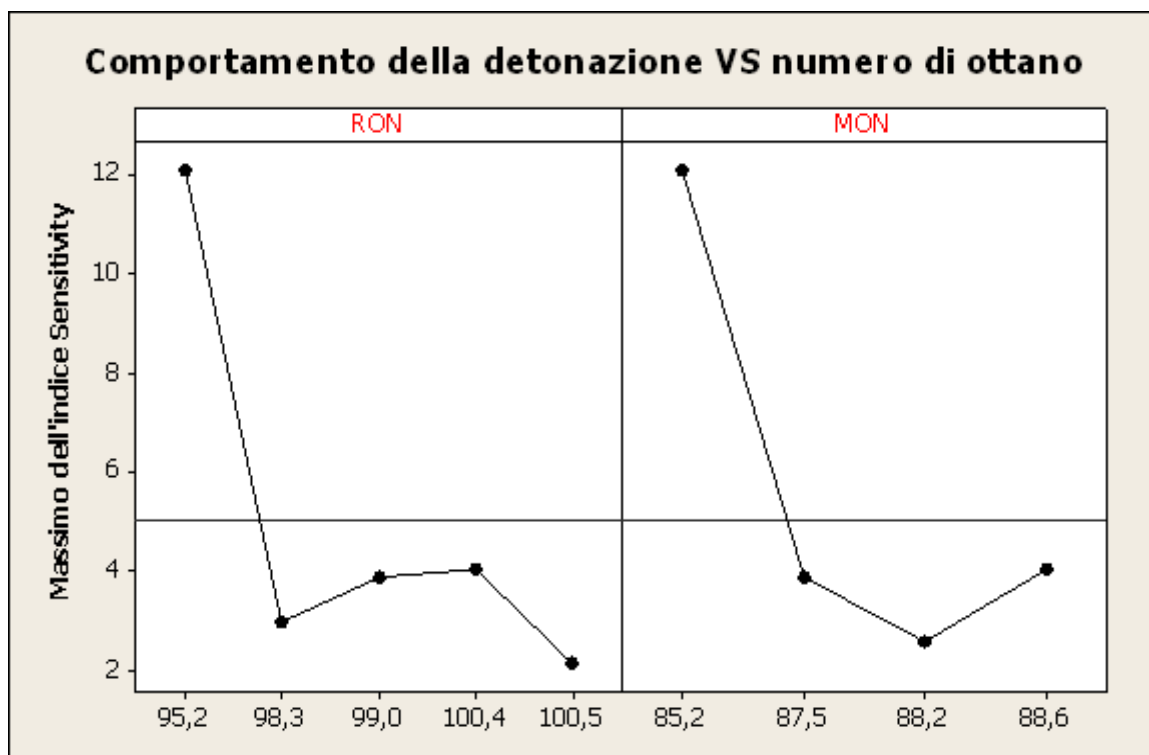


Fig. 7.2 : Rappresentazione della tendenza alla detonazione rapportata al numero di ottano dei campioni di benzine, sia RON che MON. L'asse delle ordinate indica il massimo valore dell'indice Sensitivity mediato su tutte le prove effettuate.

Da questo tipo di rappresentazione grafica (Fig. 7.2) risulta più diretta la dipendenza dell'indice di detonazione dal numero di ottano, che non alla tipologia di benzina da esso caratterizzato. Il trend non risulta completamente monotono, pur riuscendo ad evidenziare comunque il miglior comportamento che gli alti numeri di ottano riescono a trasmettere.

Oltre i risultati appena mostrati, nello scorso capitolo è stato mostrato in modo più dettagliato l'andamento e la dispersione degli indici di detonazione al variare dell'anticipo d'accensione (SA). Anch'essi risultano essere di gran lunga superiori nella benzina commerciale, ribadendo così le sue basse qualità antidetonanti.

Queste identiche tipologie di considerazioni possono essere applicate anche sui quattro campioni di surrogati.

Dal seguente grafico riassuntivo (Fig. 7.3) si sono tratte le generiche considerazioni sulle proprietà antidetonanti dei surrogati in funzione del loro numero di ottano. Anche qui non si sono quindi relazionati i valori degli indici ottenuti ai relativi anticipi, ma ci si è soffermati esclusivamente sul massimo valore di detonazione ottenuta in ogni prova per le relative benzine.

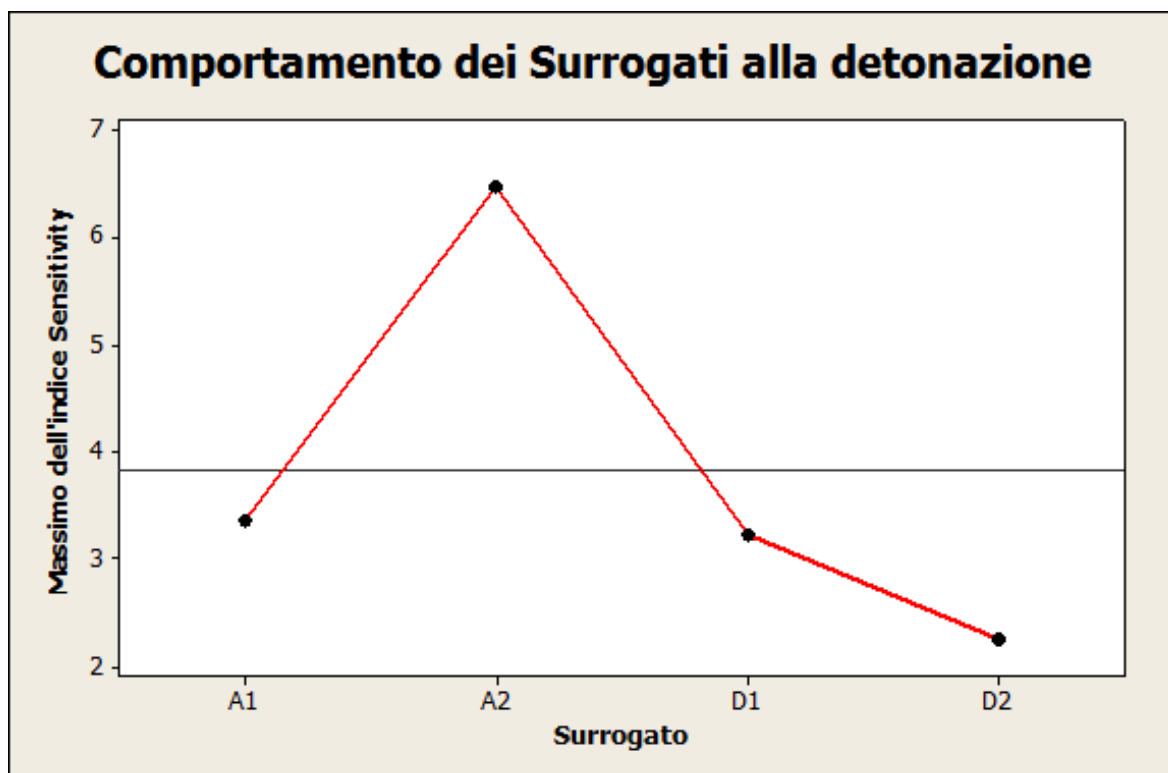


Fig. 7.3 : Grafico rappresentante il generale comportamento dei 4 campioni di surrogati alla detonazione. L'asse delle ordinate indica il massimo valore dell'indice Sensitivity mediato su tutte le prove effettuate.

Dal grafico si nota la più bassa tendenza alla detonazione del campione D2 , sia rispetto ad entrambi i campioni della famiglia A, e sia rispetto al surrogato della stessa sua famiglia D1. Come i grafici delle singole prove già dimostravano, il surrogato che dimostra una relativa più bassa proprietà antidetonante è il campione A2. Approfondendo tale studio, è stato possibile attribuire al numero di ottano caratterizzante ogni surrogato il loro comportamento alla detonazione. Si è tenuto in considerazione sia il numero RON che MON.

Tabella 7.2 : : Numeri di ottano per i campioni dei surrogati, sia RON che MON.

	Surrogato			
	A1	A2	D1	D2
RON	97.9	97.1	99.5	100.2
MON	89.4	86.5	88.4	91.2

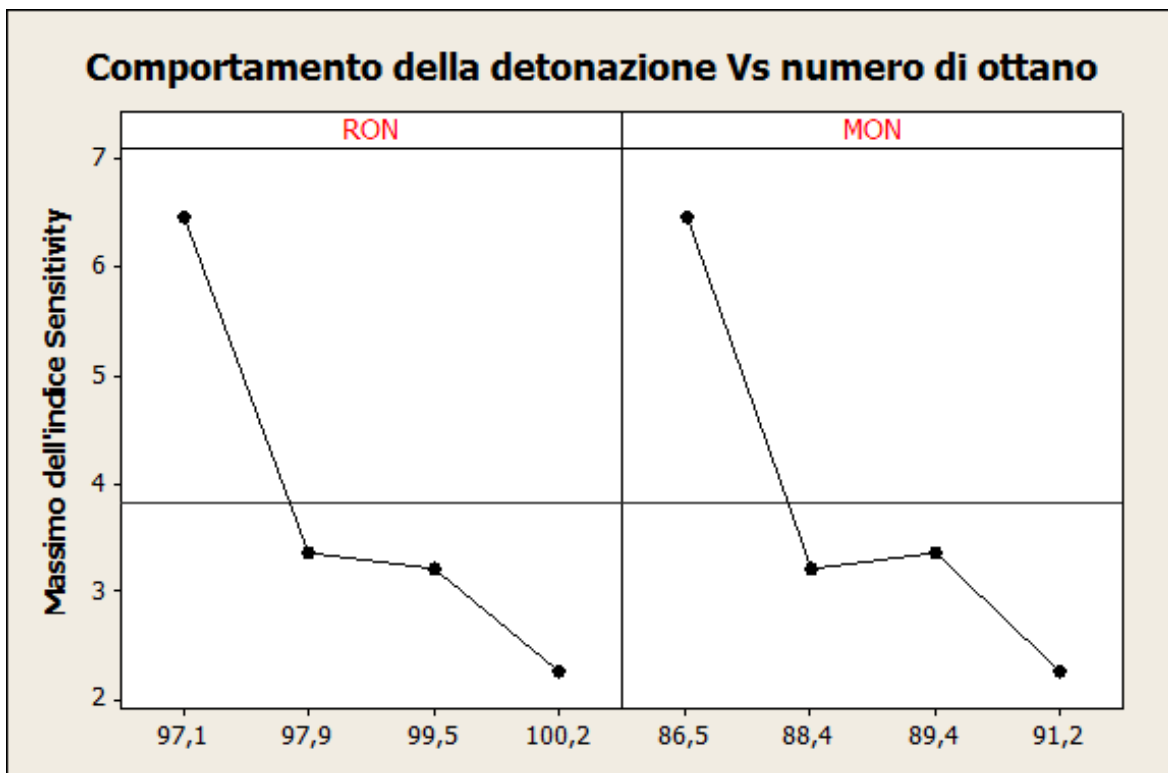


Fig. 7.4 : Rappresentazione della tendenza alla detonazione rapportata al numero di ottano dei campioni dei surrogati, sia RON che MON. L'asse delle ordinate indica il massimo valore dell'indice Sensitivity mediato su tutte le prove effettuate.

Da questo tipo di rappresentazione grafica (Fig. 7.4) risulta più diretta la dipendenza dell'indice di detonazione dal numero di ottano, che non dalla tipologia di surrogato da esso caratterizzato. Si può notare come i due numeri di ottano riescano a trasmettere la medesima informazione riguardante la propensione antidetonante dei surrogati al crescere dei due numeri. Si riesce a distinguere il peggior comportamento del surrogato A2 con estrema facilità. La stessa con la quale ci si accorge del buon comportamento dell'altro campione della famiglia A (che risultano avere minor numero di ottano rispetto alla famiglia D).





## 8 Sviluppi futuri

---

Un aspetto che questa tesi non è riuscita ad approfondire è stato l'analisi della detonazione a carichi parziali. In realtà, le prove necessarie per poter effettuare delle analisi sono state eseguite, ma l'impossibilità della regolazione ottimale della portata d'aria durante le molte prove svolte non ha permesso il confronto dei dati. Un sistema più accurato di regolazione della farfalla sull'aspirazione potrà senza dubbio aprire la strada allo studio a carichi parzializzati del motore.

Un miglioramento sul sistema di acquisizione può facilmente alzare il valore massimo del regime a cui le prove sono state eseguite, cioè i 4500 rpm. La limitazione è imposta dalla frequenza della scheda di acquisizione, che, fissato un numero di campioni da acquisire nell'intero ciclo, può non essere sufficiente per gli alti regimi del motore. Schede più prestanti avrebbero potuto aumentare il range di valutazione del fenomeno della detonazione.

Un'ulteriore indagine da approfondire, potrebbe essere l'appurare la singola responsabilità dei molteplici componenti chimici che caratterizzano i combustibili rispetto alla loro tendenza alla detonazione. Questo precluderebbe di avere un alto numero di combustibili da analizzare, così da validare un ipotetico studio statistico per tale scopo.



## 9 Bibliografia

---

- [1] G. Ferrari, Motori a Combustione Interna, Edizioni Il Capitello, Torino, Italia, 2005.
- [2] A. C. Neve, D.S.P, Digital Signal Processing, Schonenfeld & Ziegler, Milano, 2002.
- [3] A. Brunelli, Misure Industriale Fisiche & Meccaniche, I quaderni del GISI, Milano 2002.
- [4] F. Molinaro, F.Cataniè, Signal processing pattern classification techniques to improve knock detection in spark ignition engines, Paper, Université de la Reunion, Toulouse, France, 1993.
- [5] N. Cavina, E. Corti, G. Minelli, D. Moro, L. Solieri, Knock Indexes normalization methodologies, Paper, University of Bologna, Italy, 2006.
- [6]
- [7] S.Szwaja, K.R. Bhandary, J.D. Naber, Comparison of hydrogen and gasoline combustion knock in a spark ignition engine, International Journal of Hydrogen Energy, Paper, Michigan Technological University Houghton, Poland, 2007.
- [8] G. Litak, T. Kaminski, J. Czarnigowski, A.K. Sen, M. Wemdeker, Combustion process in a spark ignition engine : analysis og cyclic peak pressure and peak pressure angle oscillations, Paper, 2007.
- [9] J.D. Naber and Jason R. Blough, D. Frankowski, M. Goble, J.E. Szpytman, Analisis of combustion knock metrics in spark-ignition engines, Paper, Michigan Technological University and Motorola Inc. Automotive, SAE World Congress Detroit, Michigan, 2006.

- [10] F. Payri, A. Broatch, B. Tormos, V. Marant, New methodology for in-cylinder pressure analysis in direct injection diesel engines. Application to combustion noise, Paper, Universidad de Valencia, Valencia, Spain, 2004.
- [11] J.H. Thomas, B. Dubuisson, M.A. Dillies, Engine knock detection from vibration signals using pattern recognition, Paper, PSA Peugeot, France, 1997.
- [12] J. Green, C.S. Daw, J.S. Armfield, Time Irreversibility and comparison of cyclic-variability models, Paper, Oak Ridge National Laboratory, USA ,1998.