

MODENA 25 MAGGIO 2016

GIORNATA DI STUDIO SUI MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA

“I GRUPPI DI RICERCA DELLE UNIVERSITÀ ITALIANE INCONTRANO LE IMPRESE”

MODELLI 1D FINALIZZATI ALLA CALIBRAZIONE NUMERICA OTTIMALE DI MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA AD ACCENSIONE COMANDATA

Fabio Bozza, Vincenzo De Bellis, Luigi Teodosio
Dipartimento di Ingegneria Industriale
Università di Napoli «Federico II»



DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA
INDUSTRIALE



Il Gruppo di Ricerca (MCI ad Acc. Comandata)

FEV

ifp
Innovation
Energie
Environnement

AVL



Istituto Motori CNR

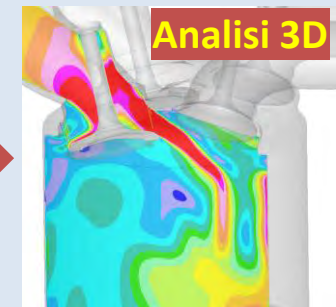
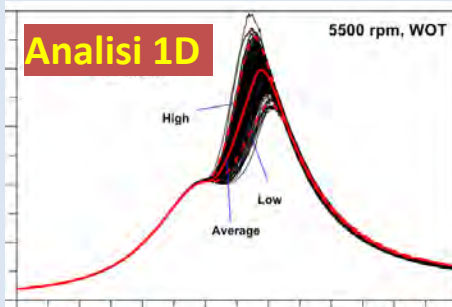
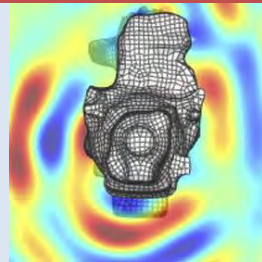


Univ. di Napoli



Univ. di
Modena

Sperimentazione Vibro-Acustica



G. Valentino, D. Siano

F. Bozza, V. De Bellis, L. Teodosio

S. Fontanesi, E. Severi, et. al.

FCA

FIAT CHRYSLER AUTOMOBILES



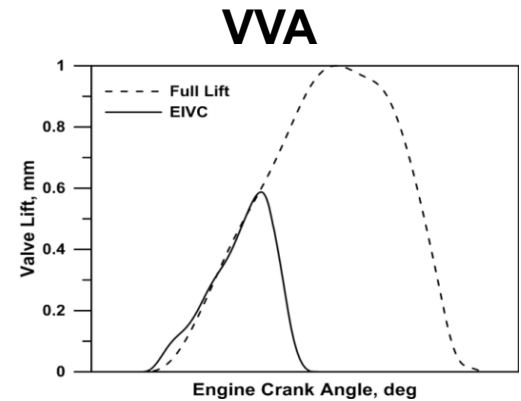
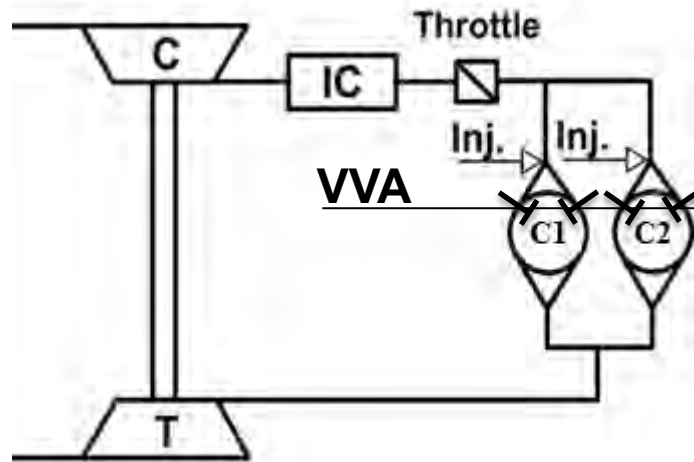
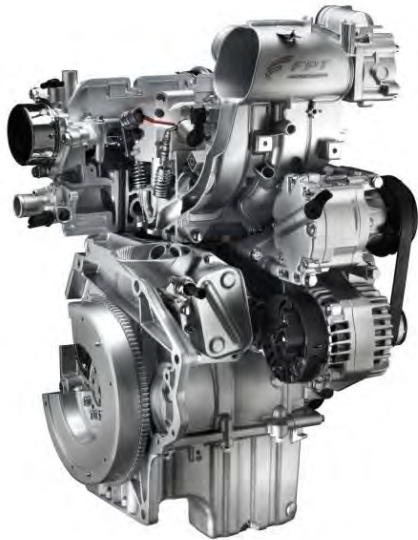
Introduzione

- ❑ Il Gruppo di ricerca dell'Università di Napoli «Federico II» svolge da anni attività modellistiche (prevalentemente 1D), finalizzate all'analisi e al progetto di MCI ad accensione comandata;
- ❑ In collaborazione con enti di ricerca ed aziende si sono messe a punto accurate metodologie per la previsione della velocità di combustione, della turbolenza, della dispersione ciclica e del knock;
- ❑ Applicazioni:
 - ❑ Analisi di strategie di regolazione ottimale di MCI
 - ❑ Calibrazione numerica di MCI a pieno carico e ai carichi parziali
 - ❑ Studio di soluzioni per incrementare la resistenza al knock



Oggetto di questa presentazione

Applicazione al Motore TwinAir



Modello	Bi-cilindrico, 8 valvole, VVA, PFI Turboalimentato con Intercooler
Cilindrata	875 cm ³
Corsa / Alesaggio	86 mm / 80.5 mm
Lunghezza Biella	136.85 mm
Rapporto Compres.	9.9
Max Potenza	64.6 kW @ 5500 rpm
Max Coppia	146.1 Nm @ 2500 rpm

□ Parametri di regolazione e controllo:

- α Rapporto Aria/Combustibile (A/F);
- β Apertura Farfalla;
- θ Anticipo all'Accensione;
- ~~φ_1 Apertura Valvola di Aspirazione;~~
- φ_2 Chiusura Valvola di Aspirazione;
- WG Apertura Waste-Gate

Sommario

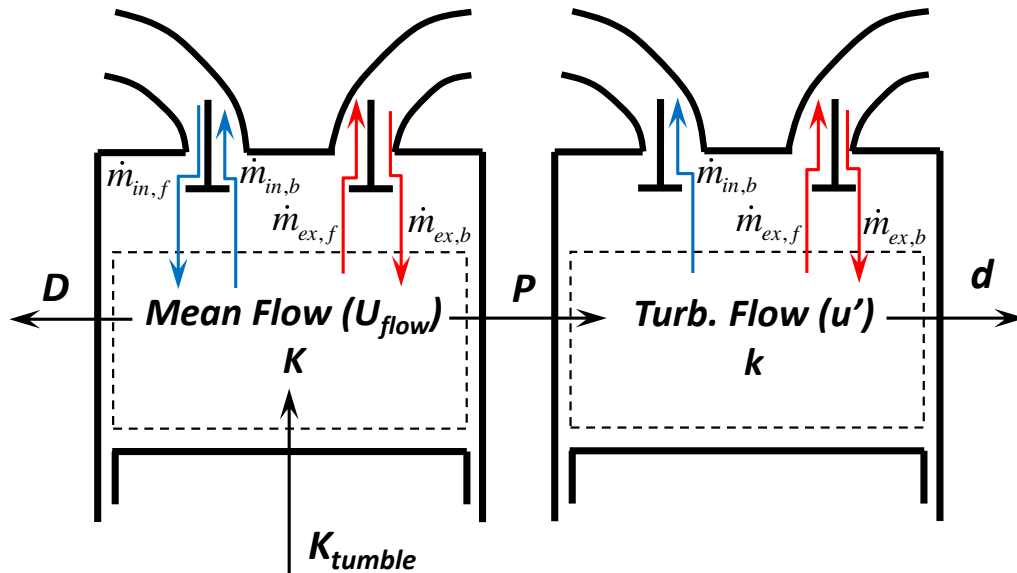
- ❑ Background modelli turbolenza/combustione/knock
 - ❑ Confronti con dati sperimentali e validazione

- ❑ Calibrazione virtuale TwinAir
 - ❑ Regolazione con sola farfalla (assenza di modulo VVA)
 - ❑ Regolazione con farfalla e ϕ_2 (presenza di modulo VVA)

- ❑ Analisi di configurazioni alternative
 - ❑ Low-Pressure EGR
 - ❑ Water Injection

- ❑ Conclusioni

Background



$$K = 1/2 m U_{flow}^2 \quad k = 3/2 m u'^2$$

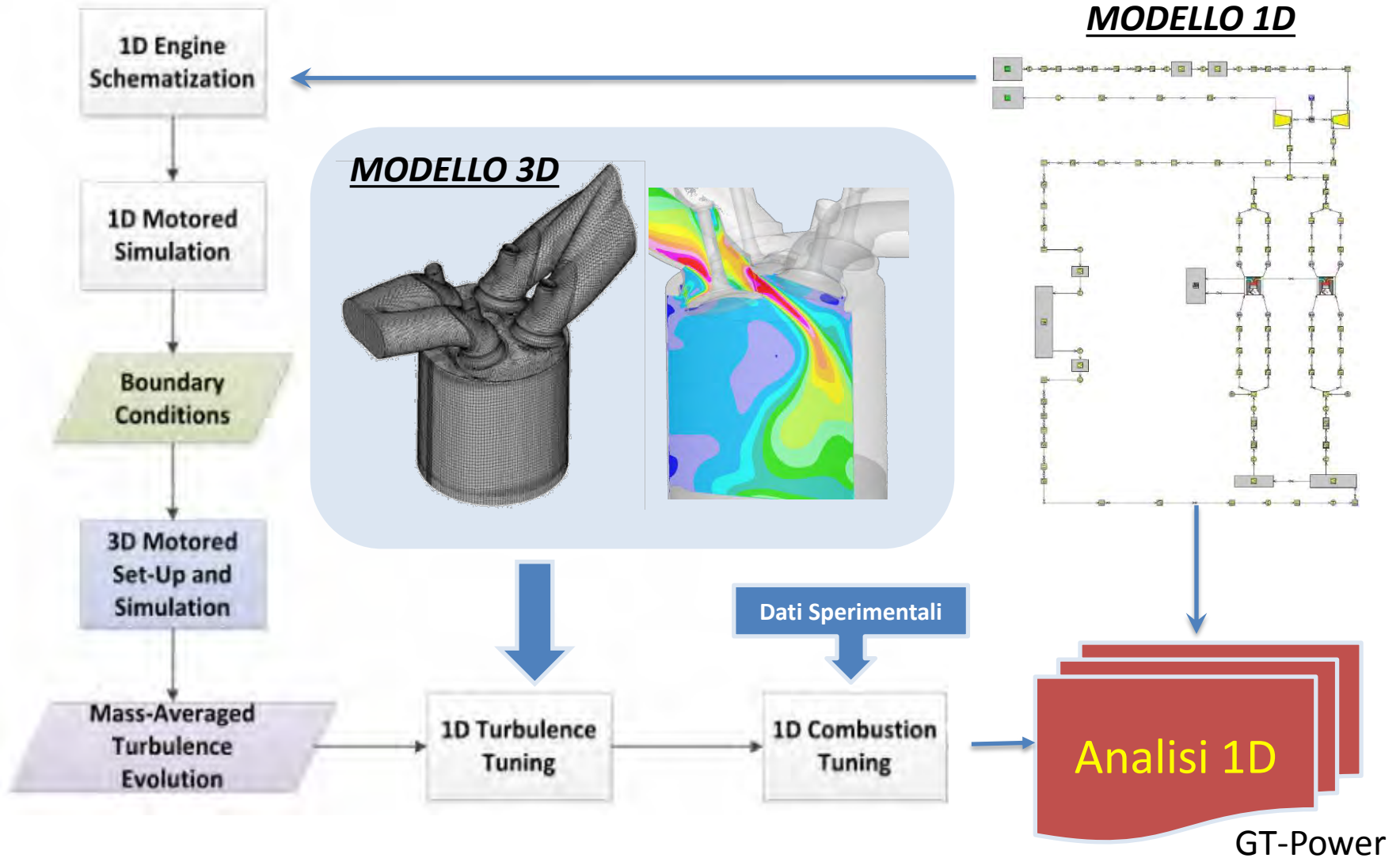
Equazioni di bilancio K - k

$$\frac{dK}{dt} = \dot{K}_{in} - \dot{K}_{ex} + \dot{K}_{tum} - P - D$$

$$\frac{dk}{dt} = \dot{k}_{in} - \dot{k}_{ex} + P - d$$



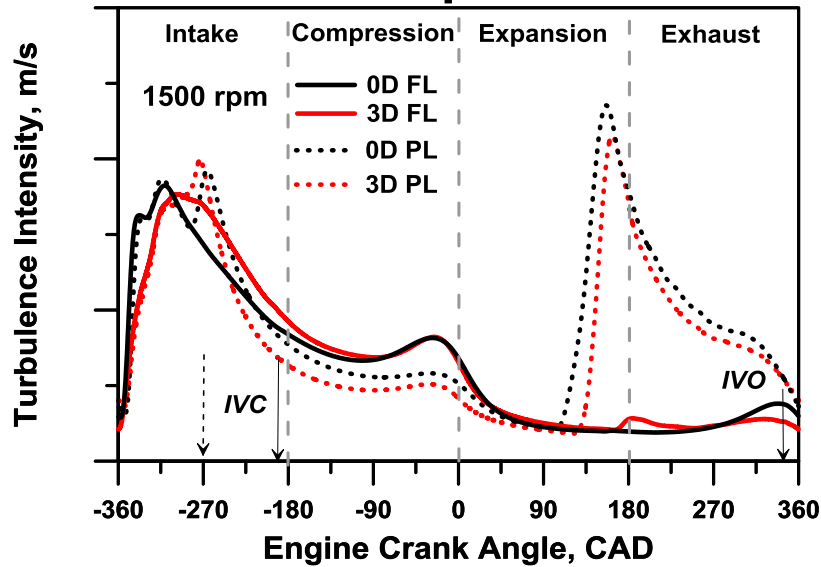
Approccio Gerarchico 1D/3D



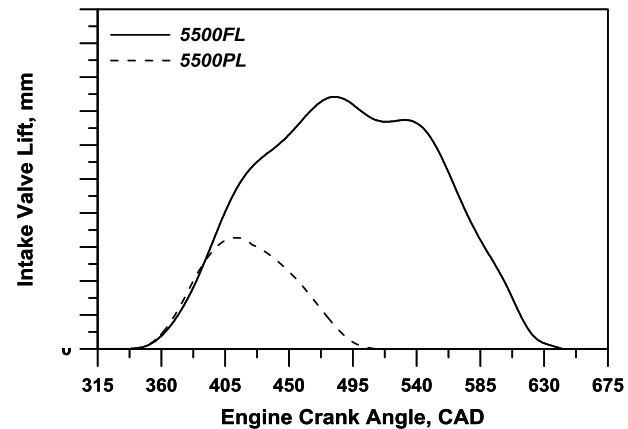
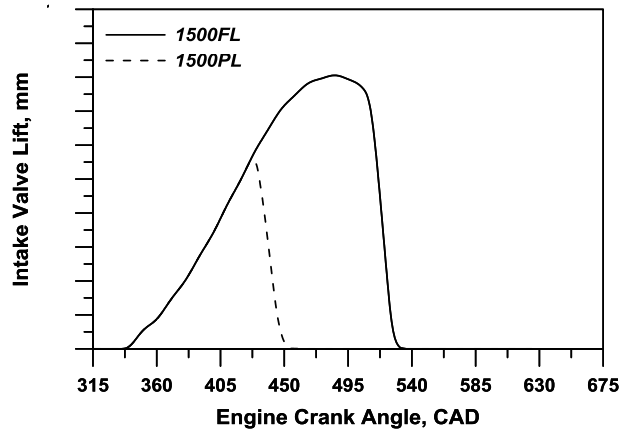
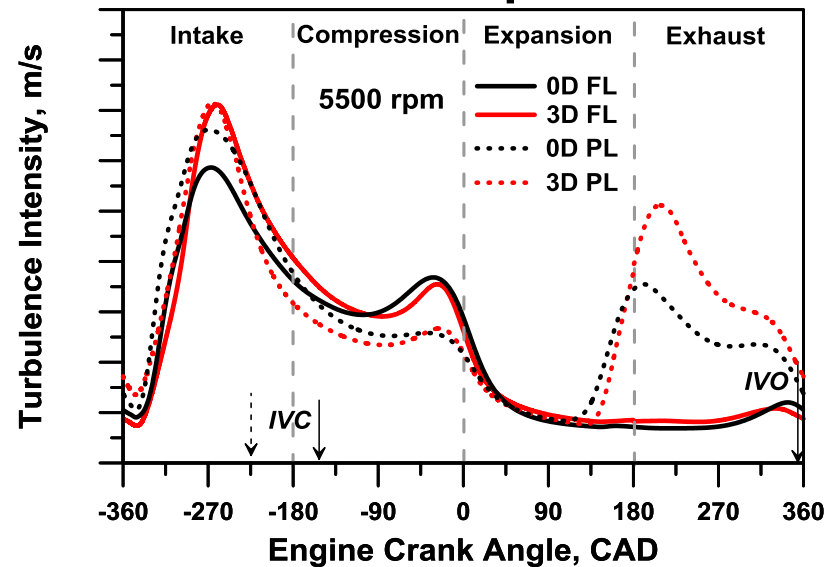
Validazione Modello di Turbolenza

Intensità di Turbolenza

1500 rpm

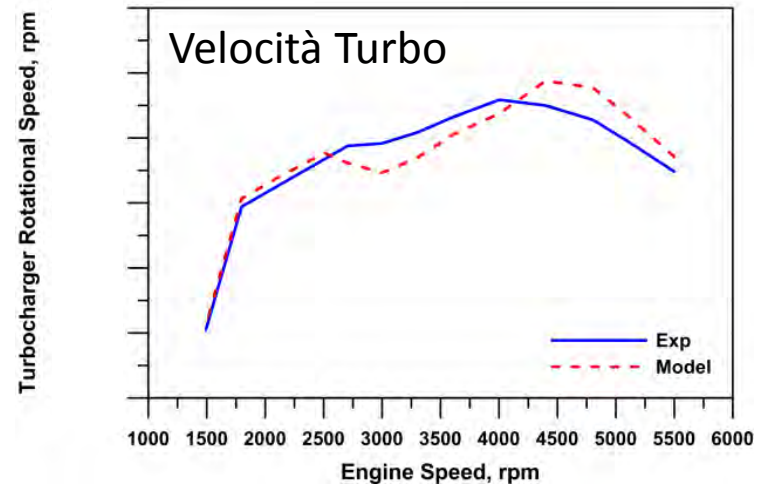
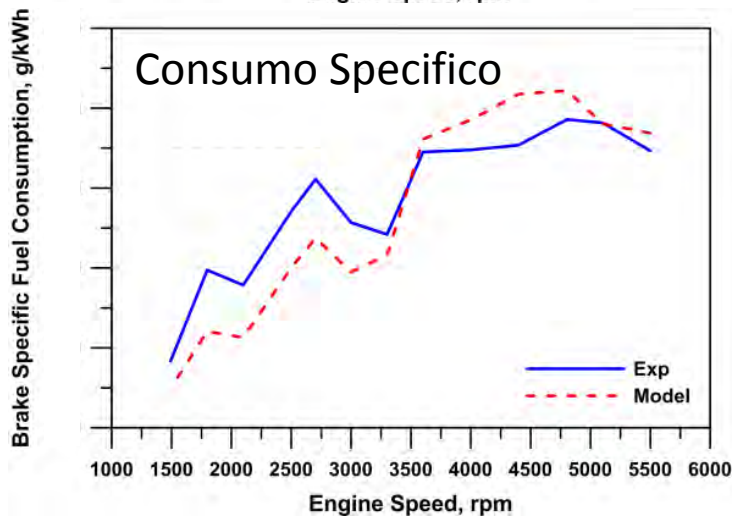
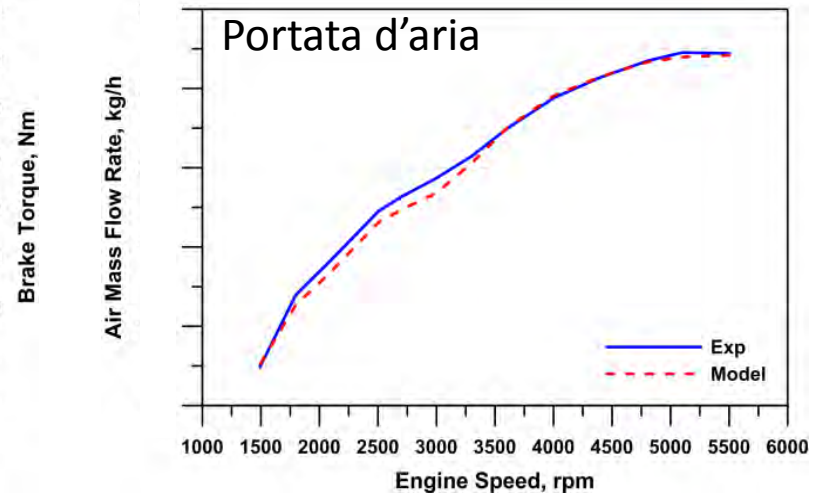
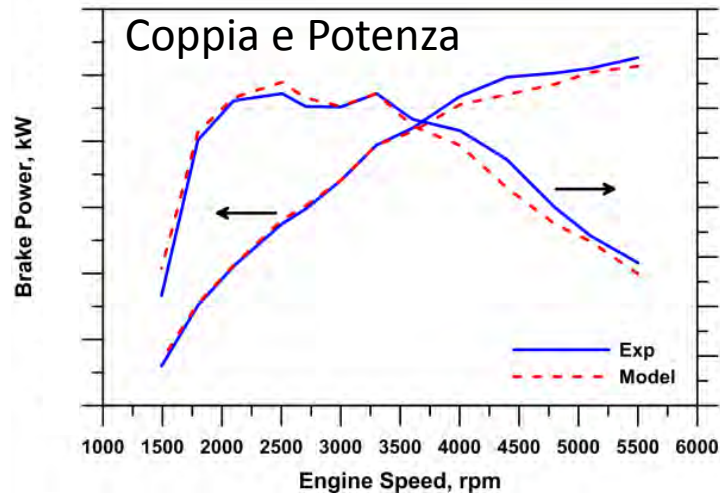


5500 rpm



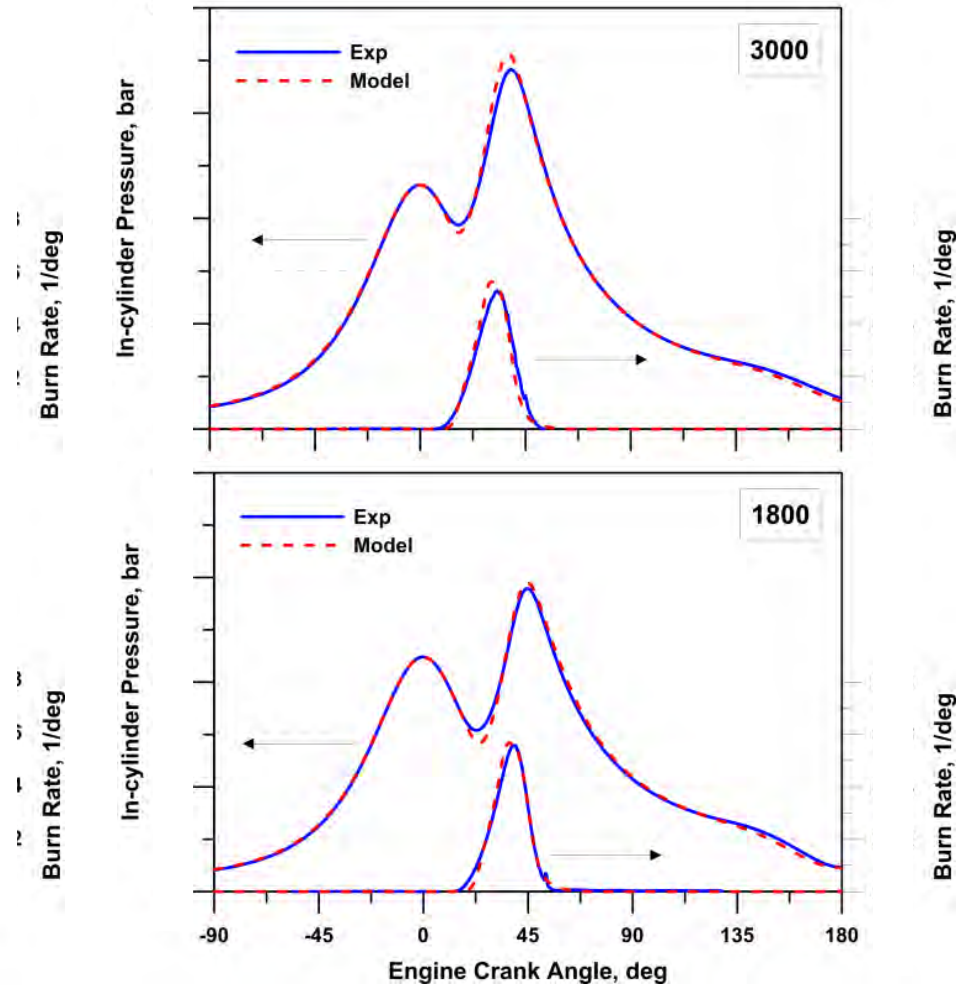
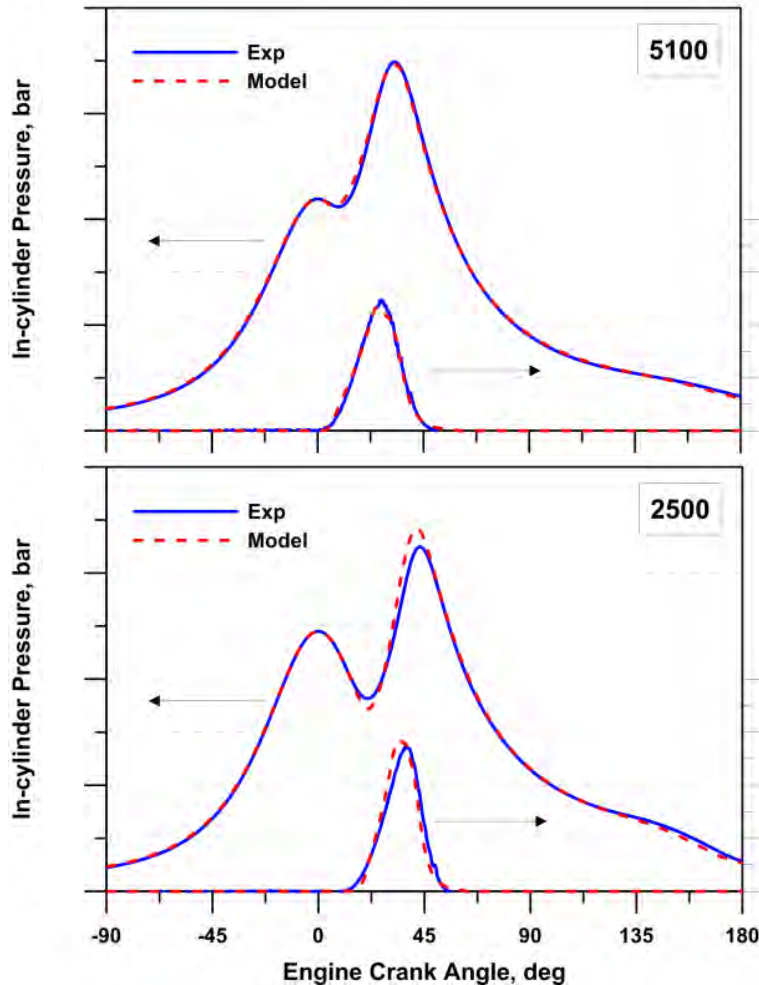
Validazione Modello a WOT

Prestazioni Globali



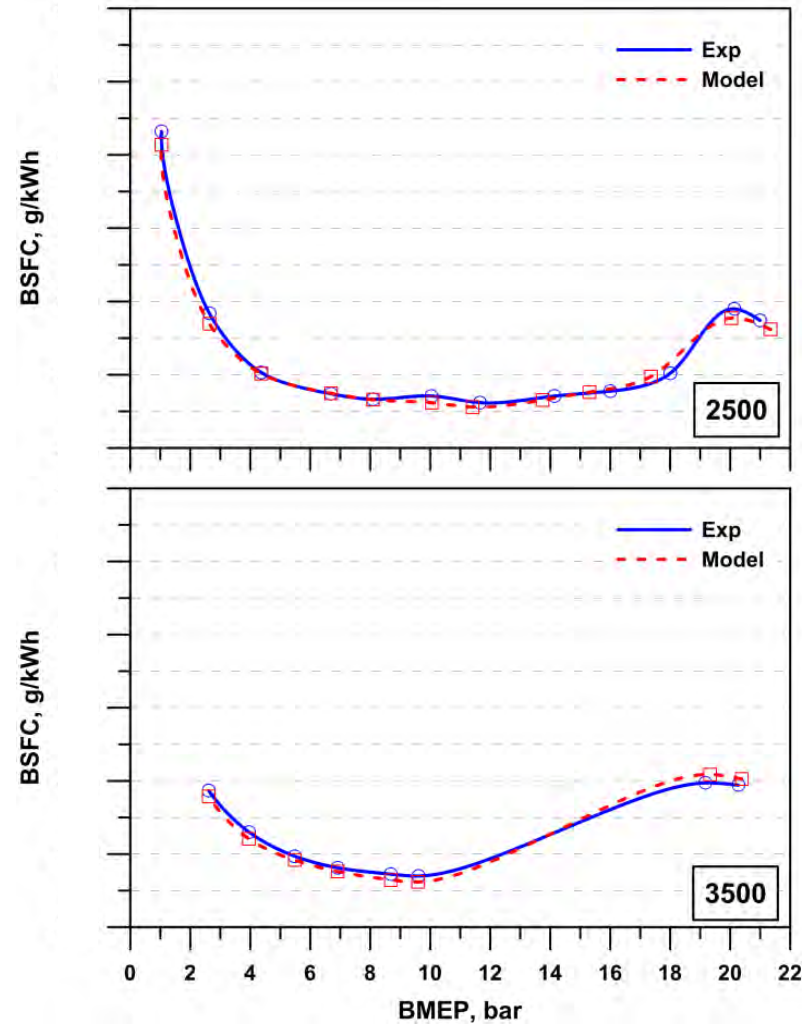
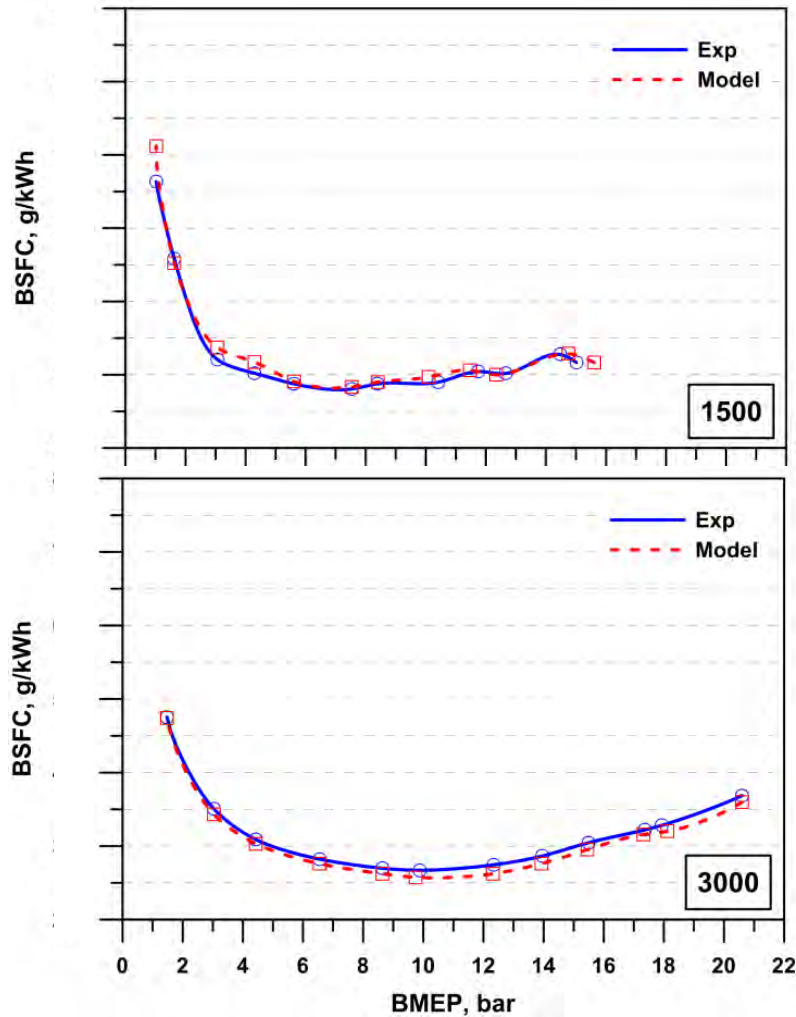
Validazione Modello a WOT

Cicli di Pressione (Media Ensemble) e Burn Rate



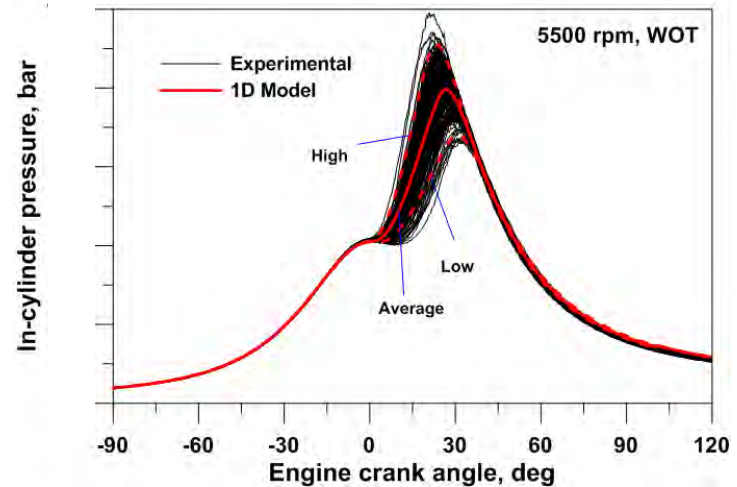
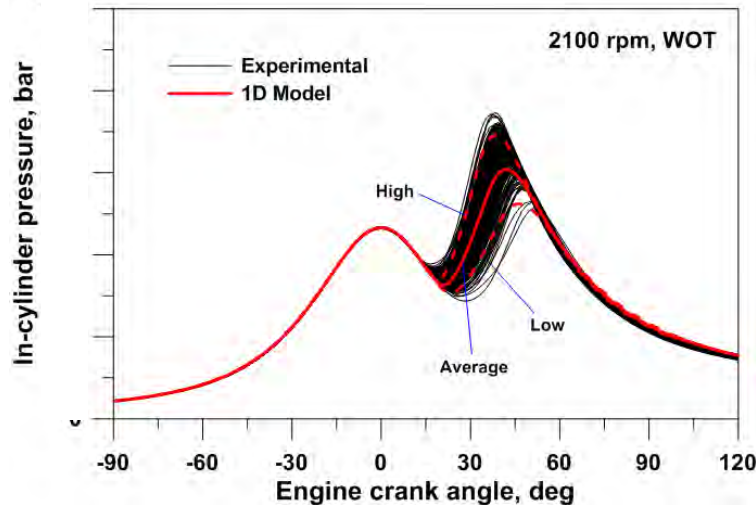
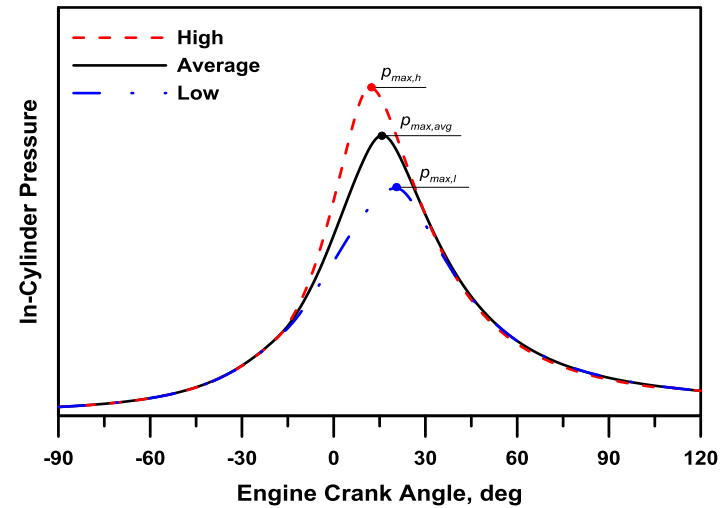
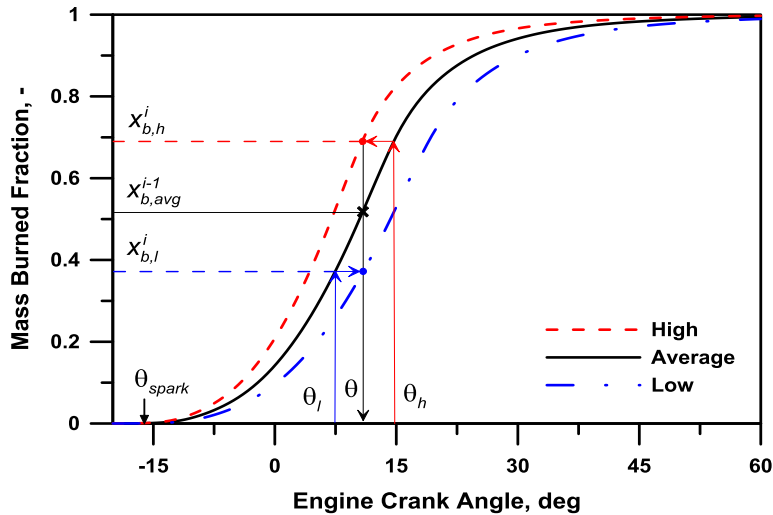
Validazione Modello ai Carichi Parziali

Consumo Specifico ai carichi parziali



Modello di Dispersione Ciclica e Validazione

“Stretching” della burn rate del ciclo medio

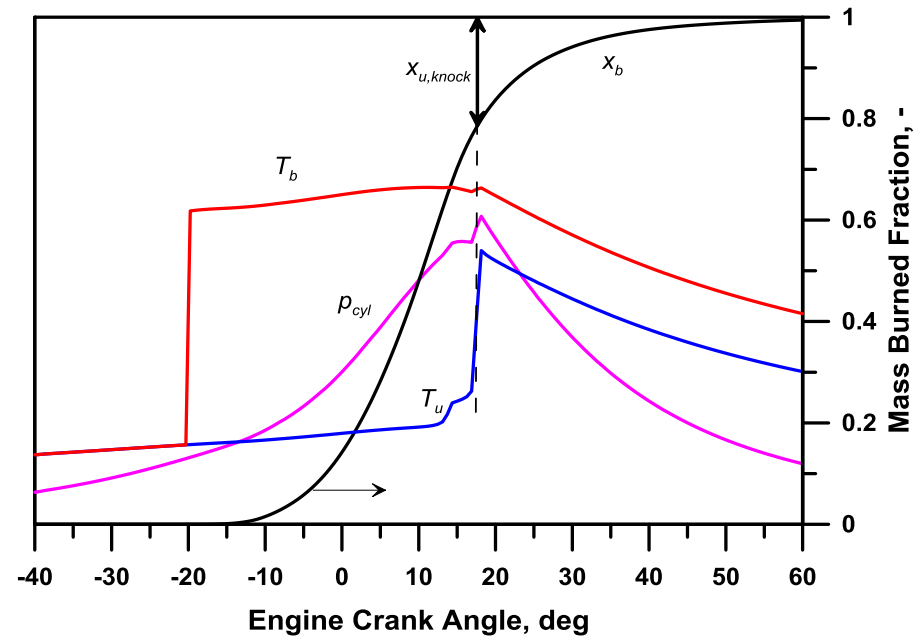
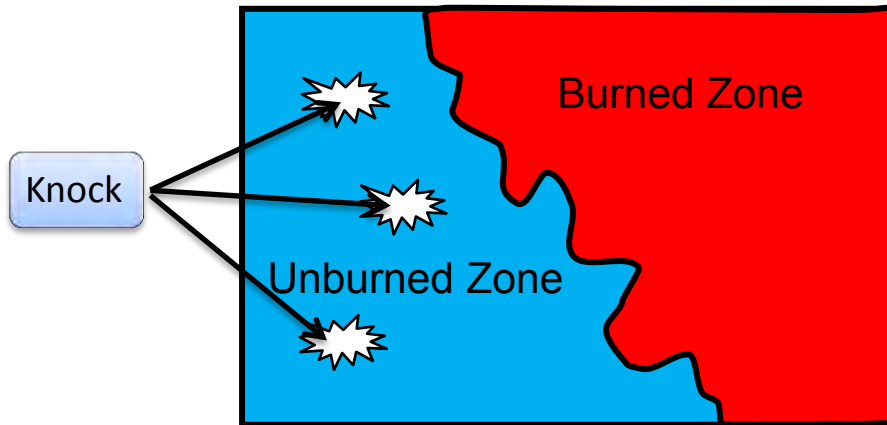


Modello di Detonazione

Accoppiamento con Chemkin:

- ❑ Risoluzione di uno schema cinetico semi-dettagliato (56 specie, 168 reazioni) negli end-gas: Combustibile: Miscela di Isottano, n-Eptano e Toluene;
- ❑ Salto di temperatura nella zona incombusta e calcolo di un corrispondente salto di pressione.

$$\Delta p_{knock} = \frac{R}{c_v} \frac{x_{u,knock} m_f LHV}{V_{knock}}$$

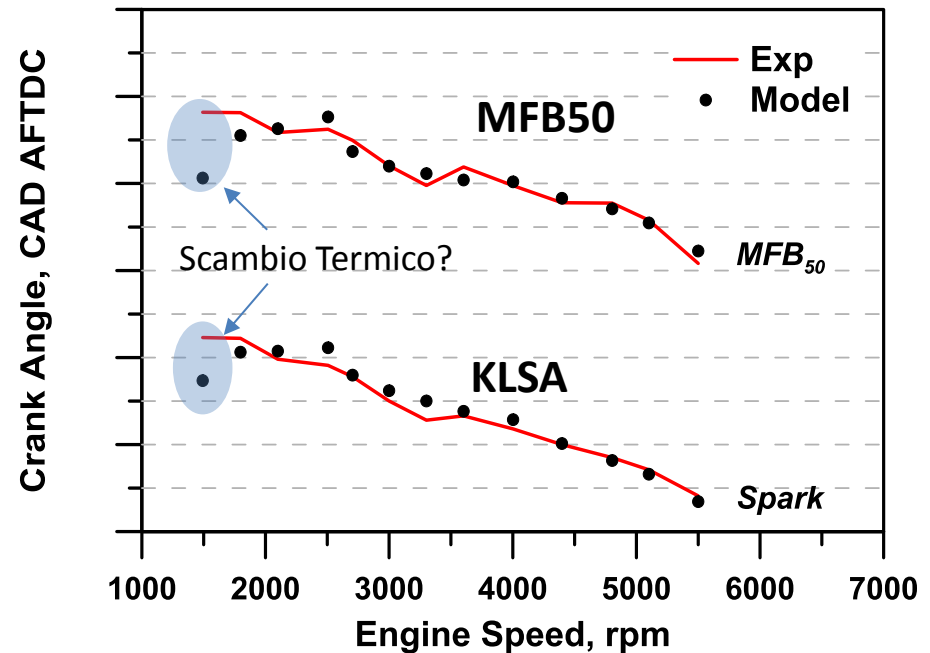
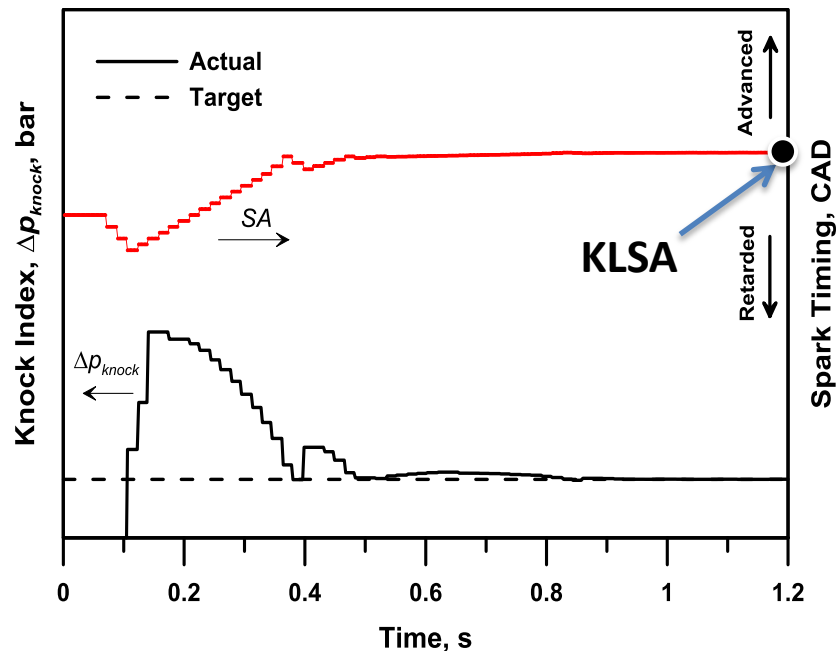


Validazione Modello di Detonazione in WOT

Calcolo Anticipo al limite di detonazione

Knock-Limited-Spark-Avance (KLSA):

- Introduzione di un controllore PID nel modello e definizione di un Threshold;
- Calcoli di Knock effettuati con riferimento al «*faster-than-average cycle*».



Applicazione: Calibrazione Virtuale

Accoppiamento con modeFRONTIER:

- ❑ Ottimizzazione Multi-Obiettivo: (min BSFC ad ogni BMEP)
vincolata: (max Boost, max Giri Turbo, max TIT, max Pmax)
Algoritmo Genetico: (MOGA II)

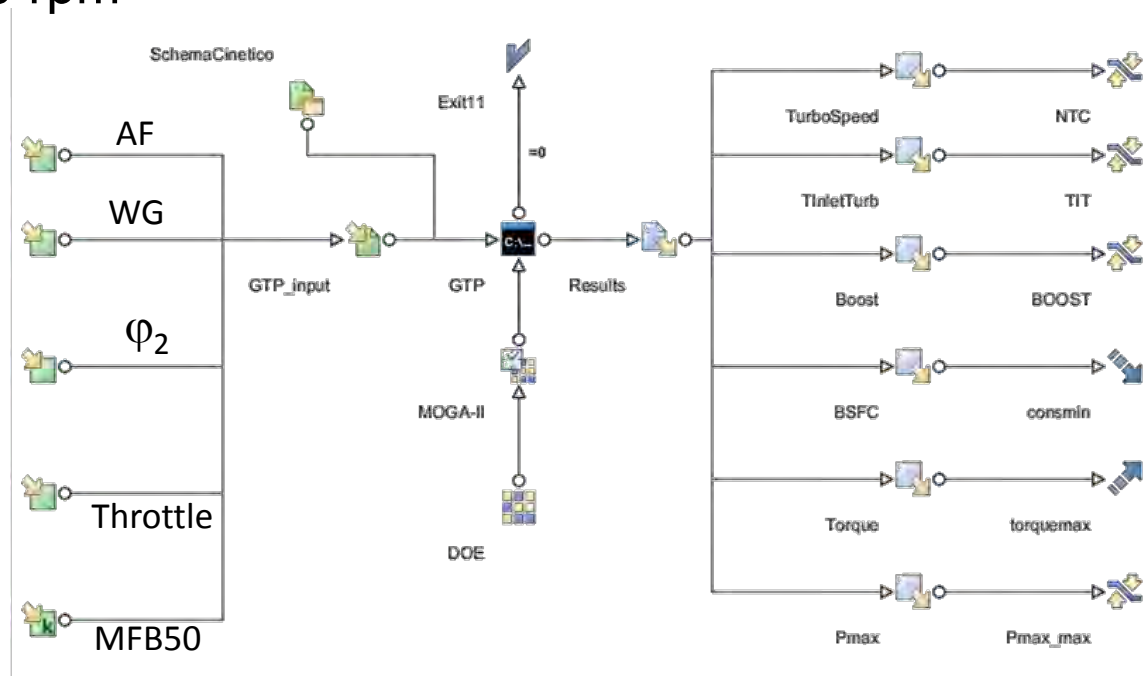
- ❑ Condizioni operative: 3000 rpm

- ❑ Variabili di regolazione:
A/F, WG, φ_2 , Farfalla

- ❑ In assenza di knock:
 - ❑ MFB50=8°

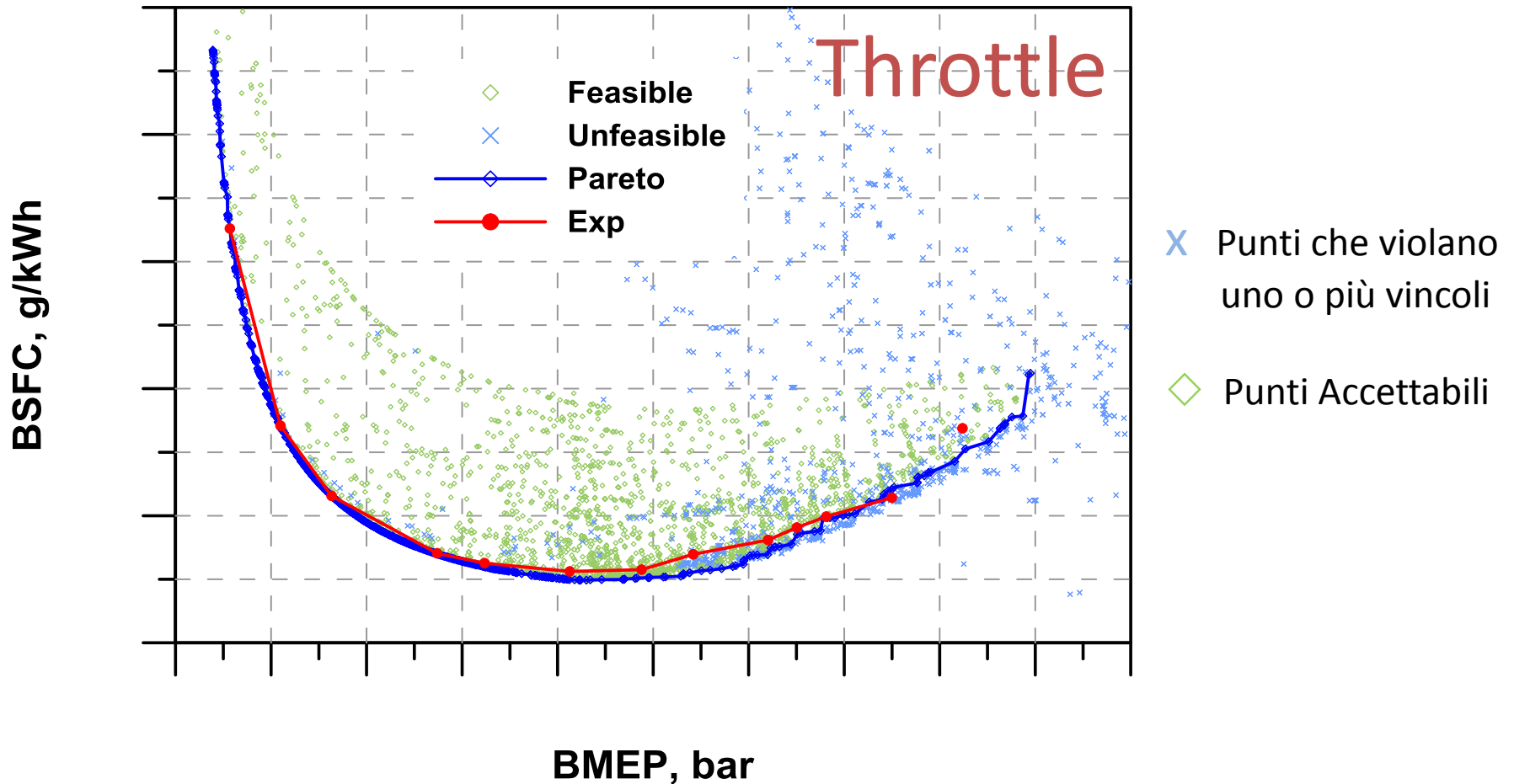
- ❑ In presenza di knock:
 - ❑ KLSA

modeFRONTIER Flowchart



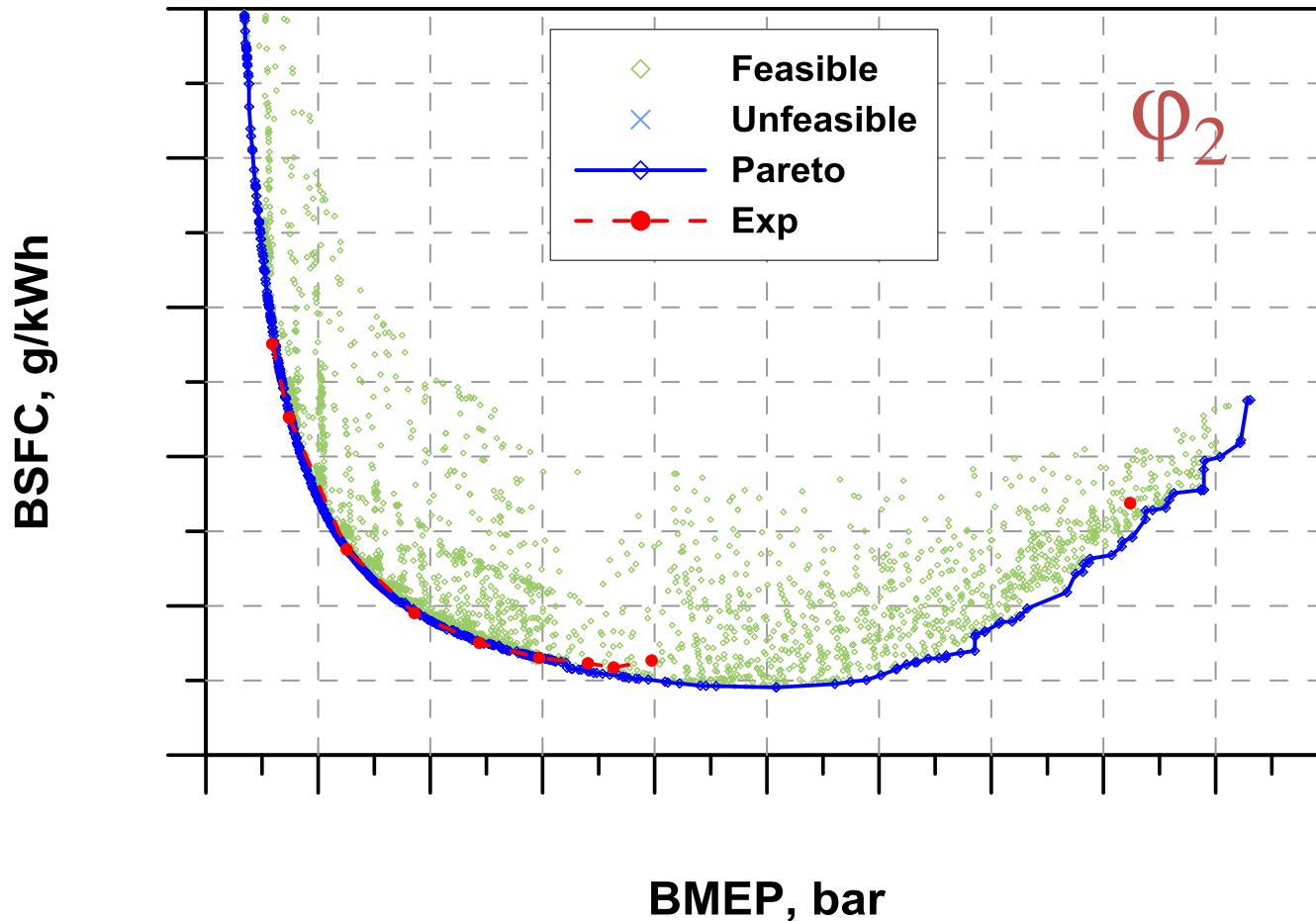
Risultati Calibrazione Virtuale

La Frontiera di Pareto, sul piano BMEP-BSFC, rappresenta la calibrazione ottimale completa



Risultati Calibrazione Virtuale

La Frontiera di Pareto, sul piano BMEP-BSFC, rappresenta la calibrazione ottimale completa

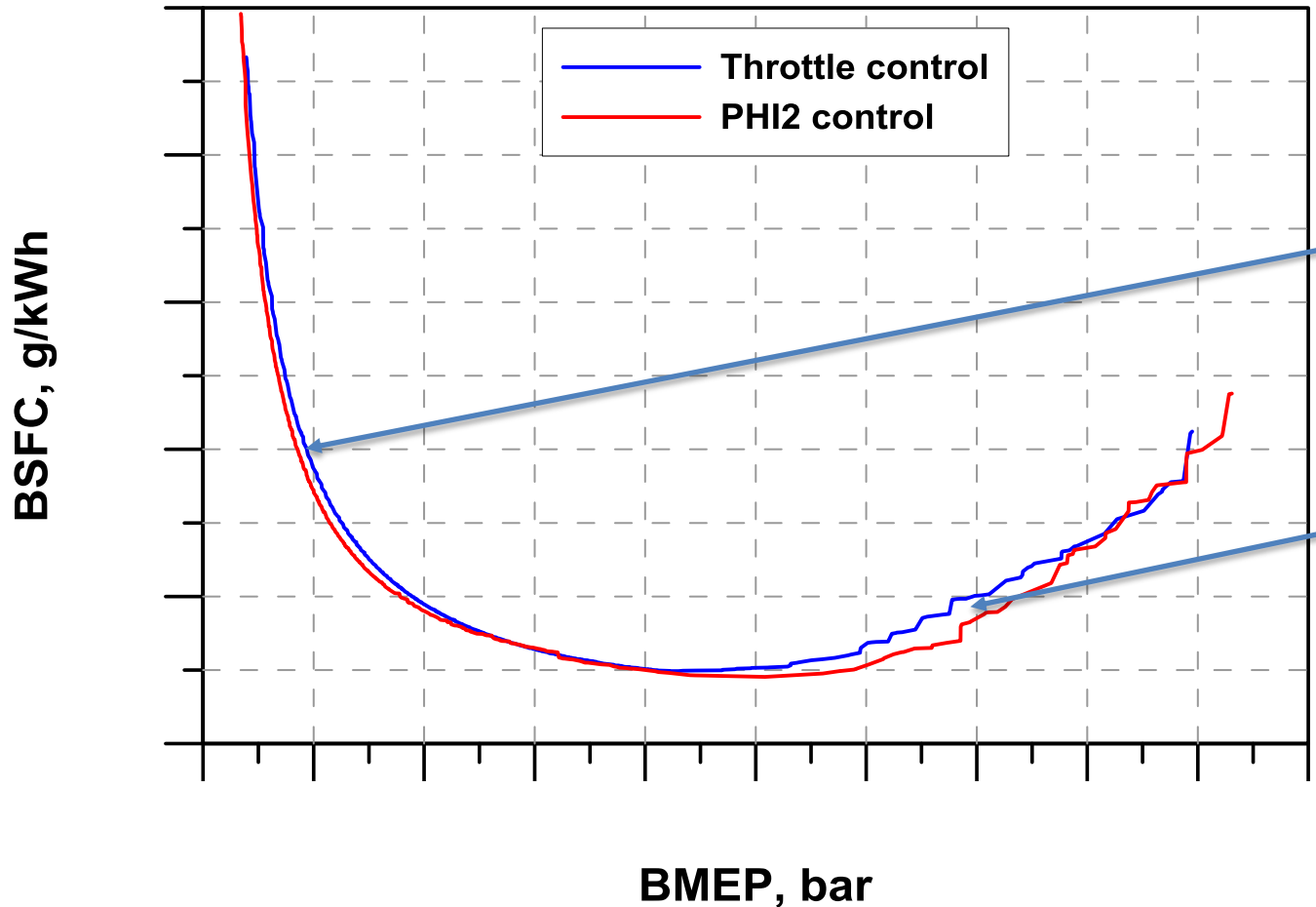


X Punti che violano uno o più vincoli

◇ Punti Accettabili

Risultati Calibrazione Virtuale

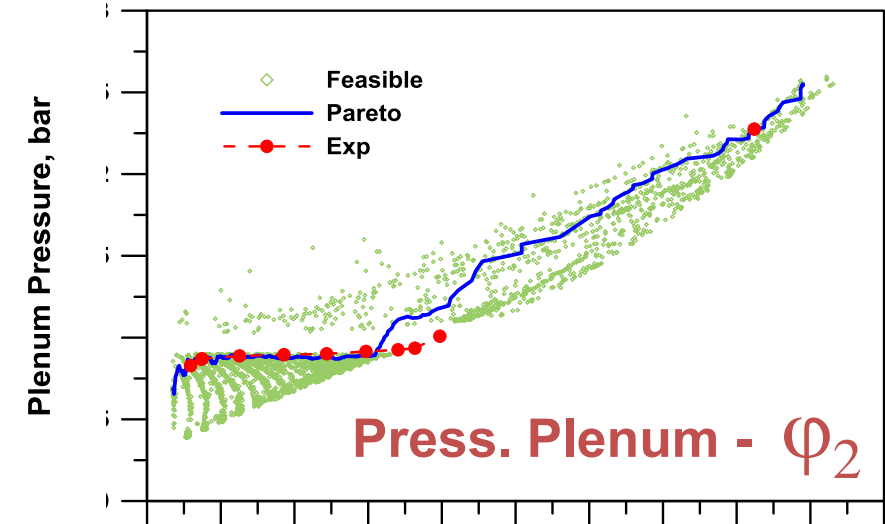
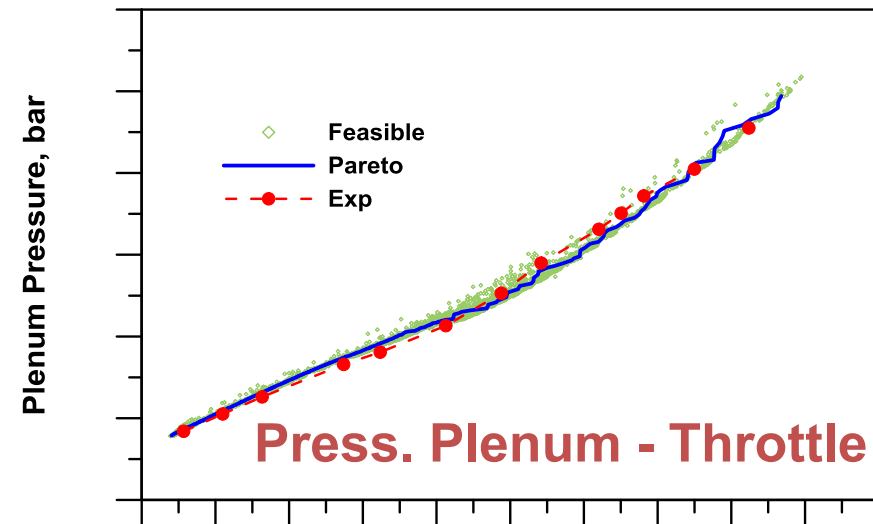
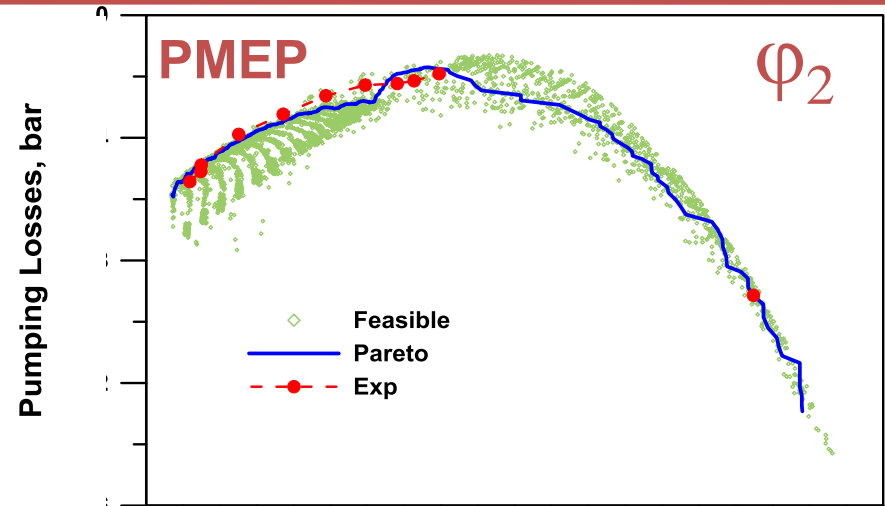
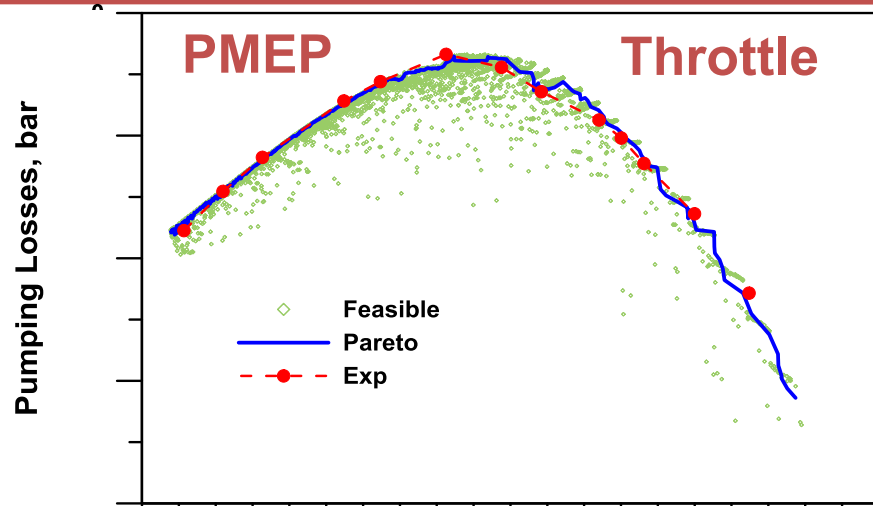
La Frontiera di Pareto, sul piano BMEP-BSFC, rappresenta la calibrazione ottimale completa



Il controllo in ϕ_2 consente vantaggi di circa il 5 % ai bassi carichi (BMEP < 10),

Vantaggi di circa il 9% si hanno ai carichi medio alti (BMEP > 10)

Perdite di Pompaggio e Pressione Plenum



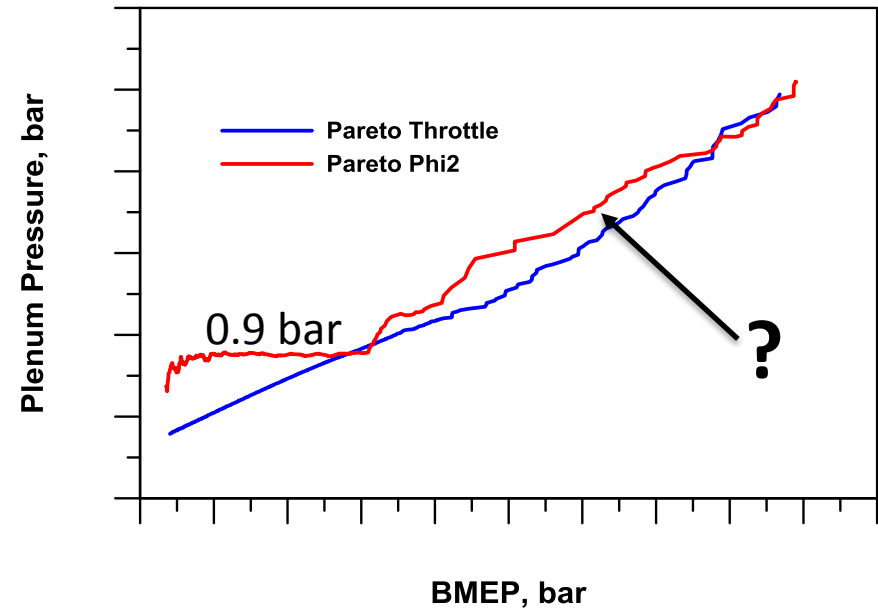
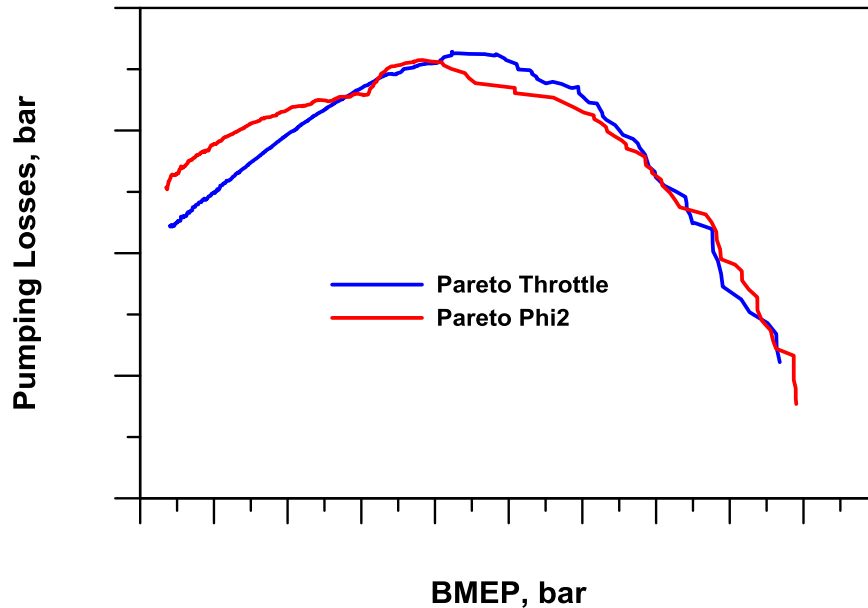
BMEP, bar

BMEP, bar

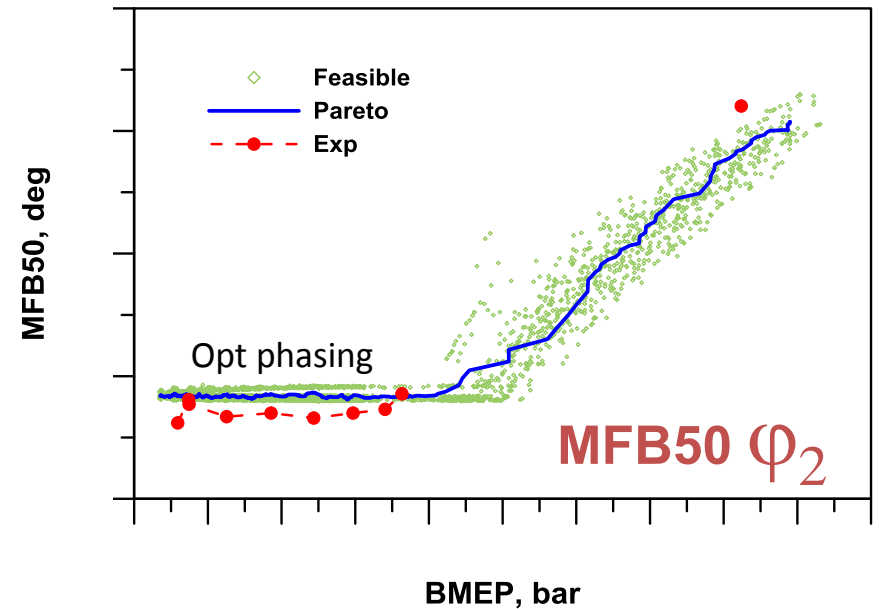
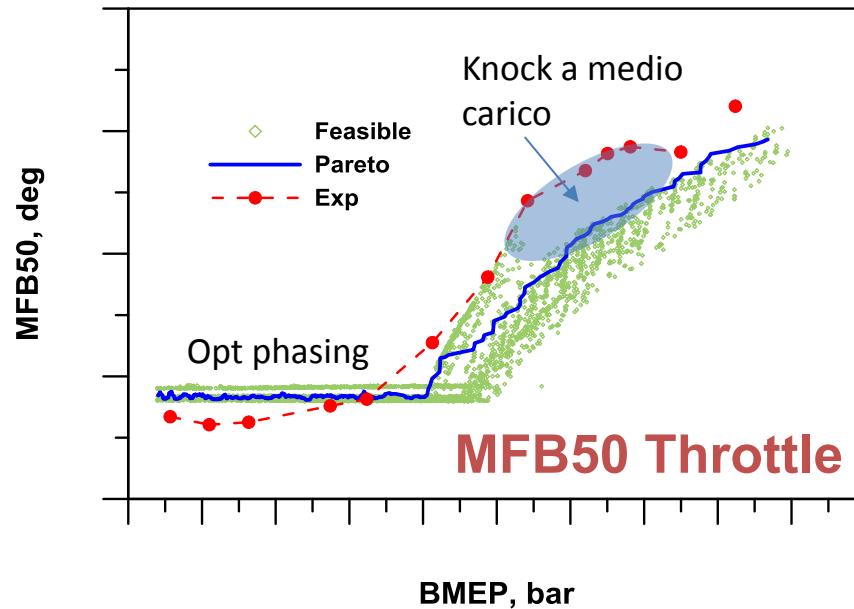
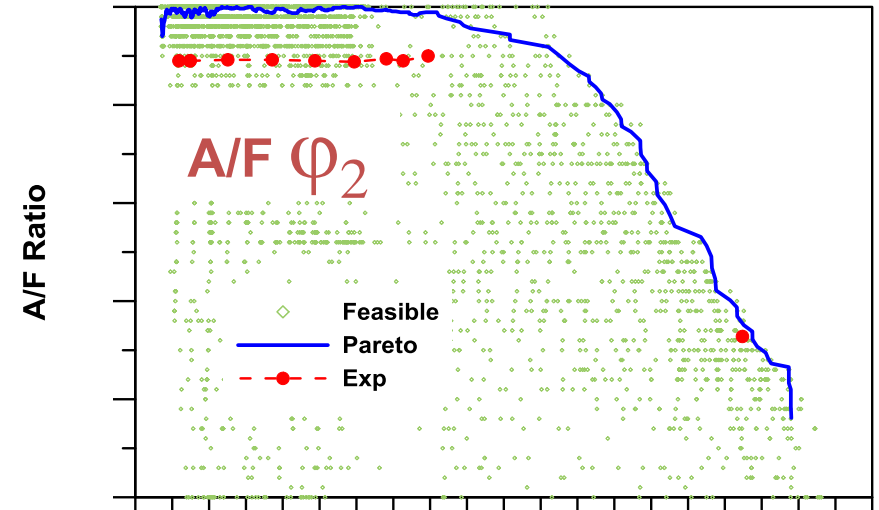
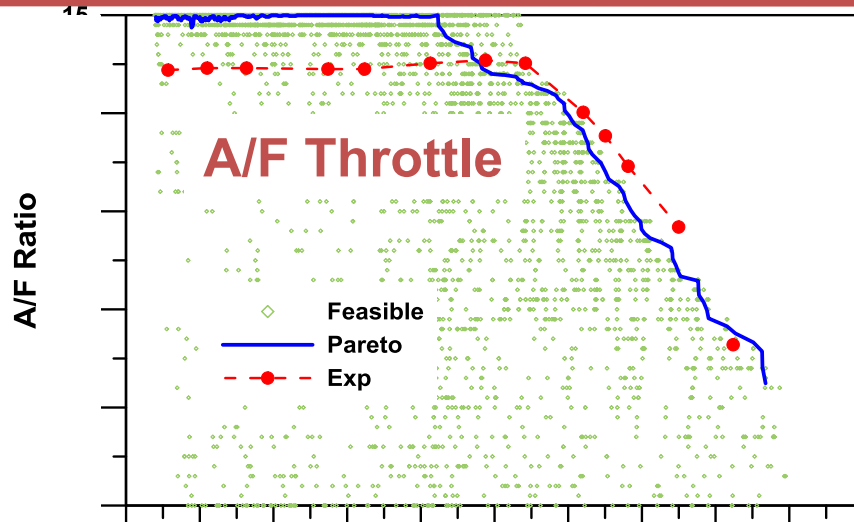
Perdite di Pompaggio e Pressione Plenum

Confronto tra le due strategie di regolazione:

- ❑ Ai bassi carichi, la farfalla introduce perdite di pompaggio maggiori (pressione plenum inferiore) e quindi maggiori consumi (circa il 5%);
- ❑ Quest'ultima (ai bassi carichi) è limitata superiormente a 0.9 bar, per ridurre il rumore gasdinamico in aspirazione;
- ❑ Come si spiega l'incremento di pressione plenum a BMEP media alta?



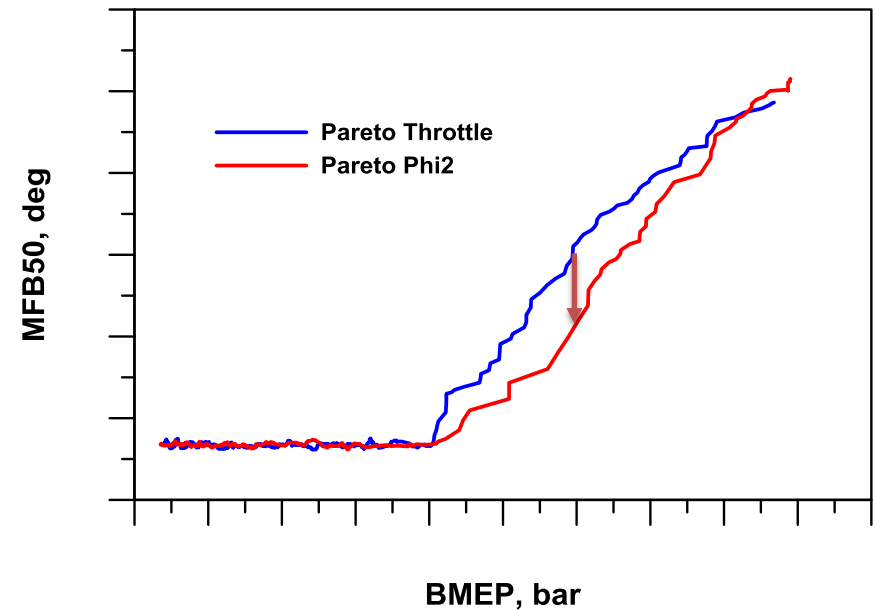
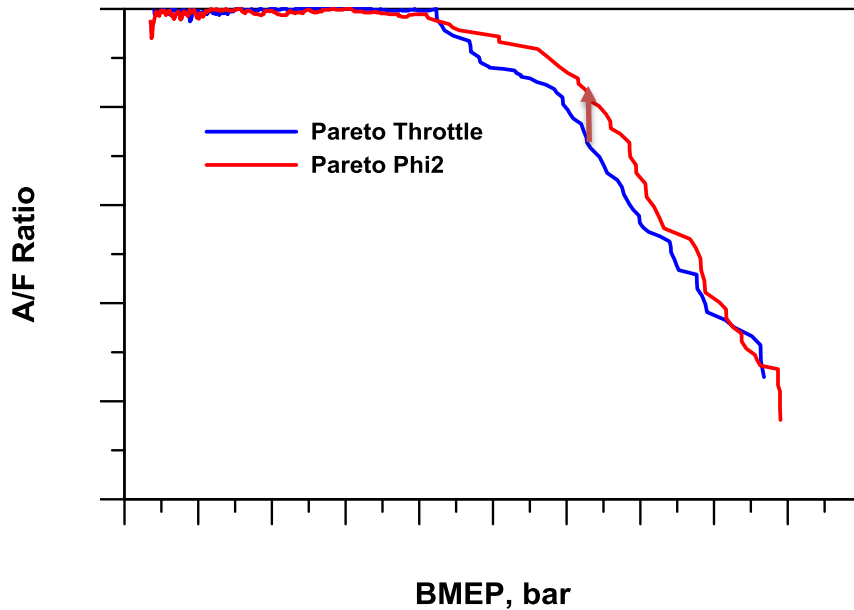
Rapporto A/F e Fasatura Combustione



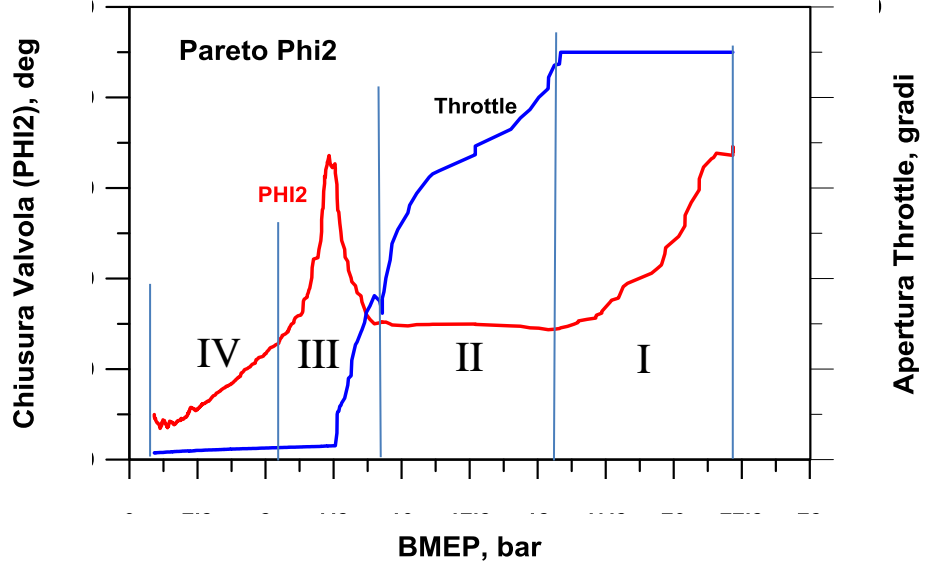
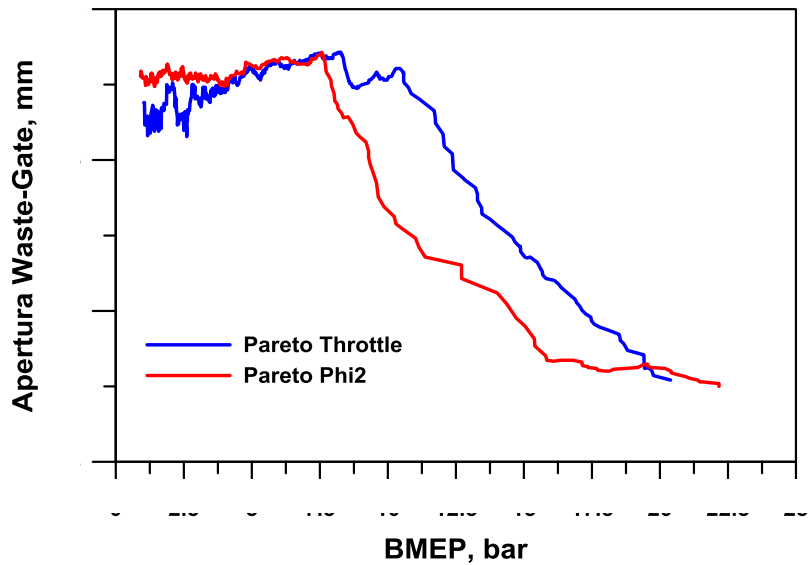
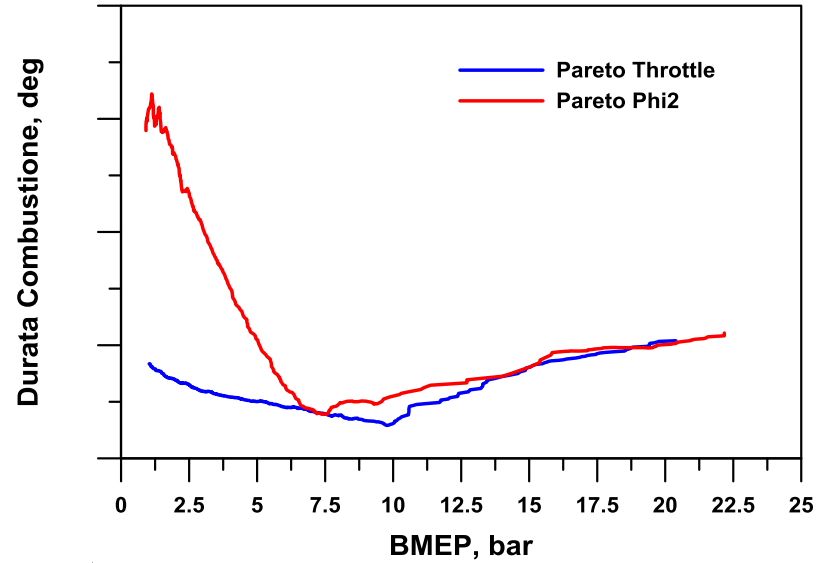
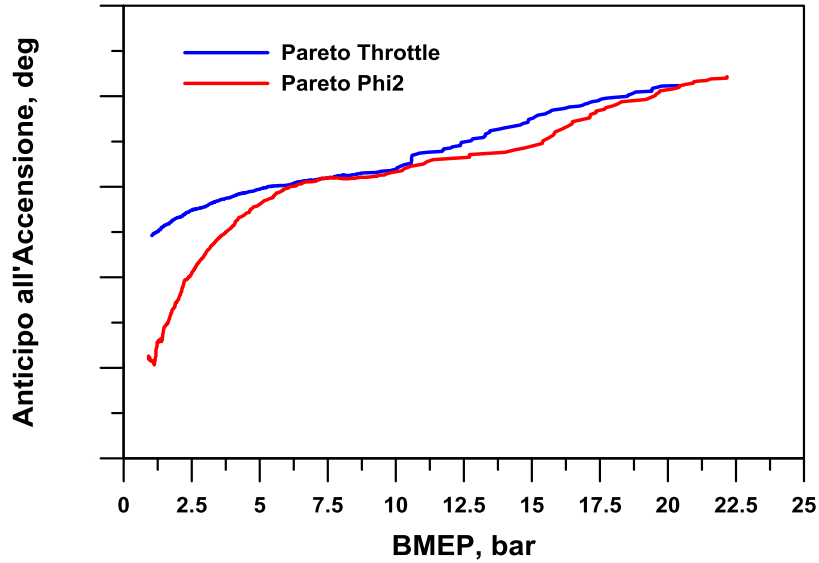
Rapporto A/F e Fasatura Combustione

Confronto tra le due strategie di regolazione:

- ❑ Agli alti carichi, la regolazione in ϕ_2 (in rosso) determina un minor rapporto di compressione effettivo (effetto siringa) e minore tendenza al knock;
- ❑ Ciò consente di ridurre l'arricchimento della miscela e anticipare la fasatura della combustione, con consumi minori (di circa il 9%).

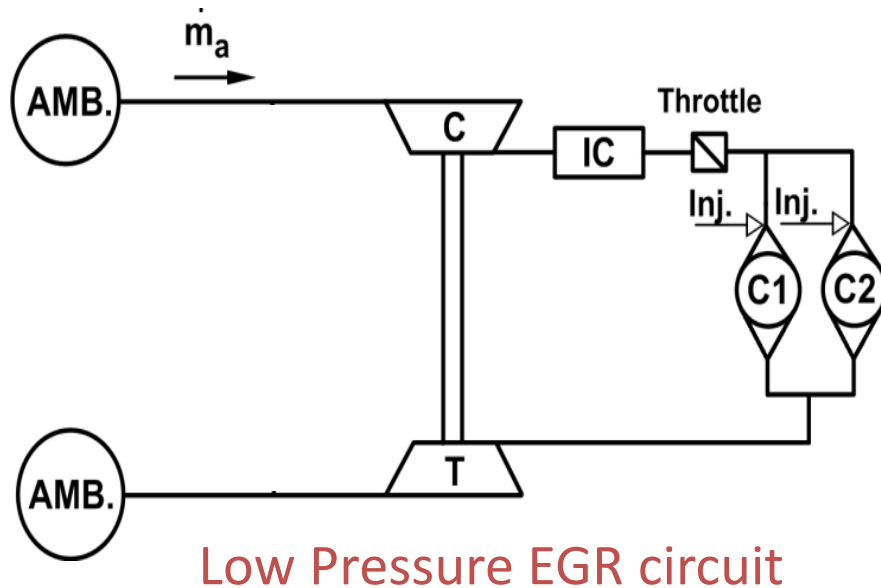


Ulteriori Risultati



Calibrazione di Configurazioni Alternative: EGR

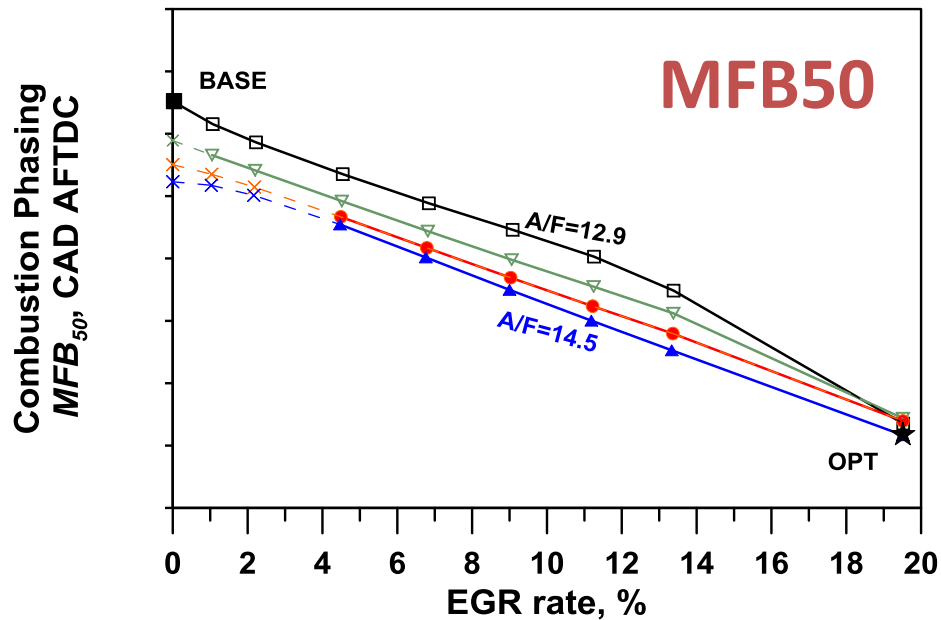
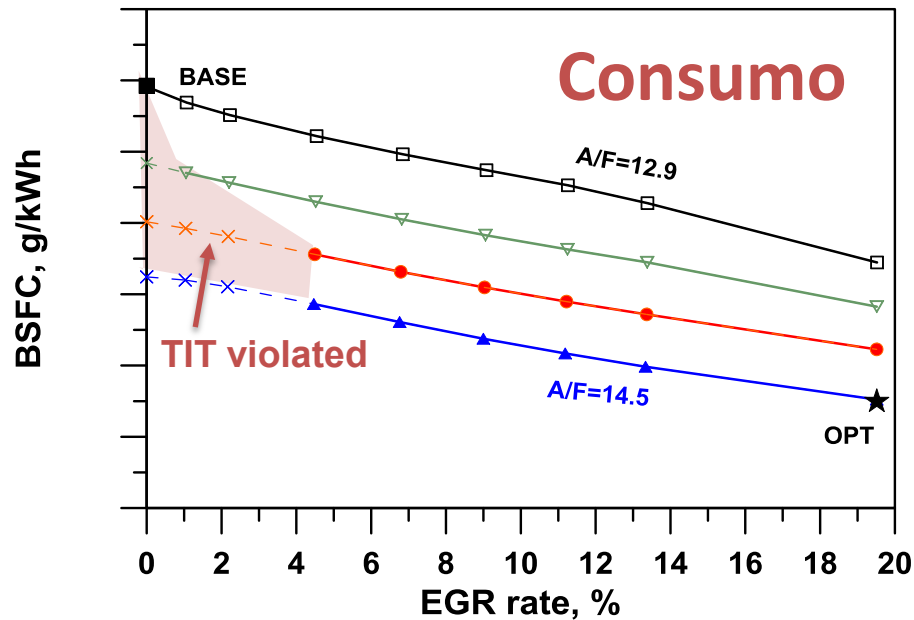
Strategie di regolazione con circuito LP-EGR:



$$EGR\ rate = \frac{\dot{m}_{EGR}}{\dot{m}_a + \dot{m}_{EGR}} \cdot 100$$

- ❑ Analisi nel punto di funzionamento 2100 rpm, WOT;
- ❑ Obiettivo: riduzione consumi con stessi vincoli precedenti;
- ❑ Metodologia: Analisi parametriche a vari A/F e livelli di EGR.

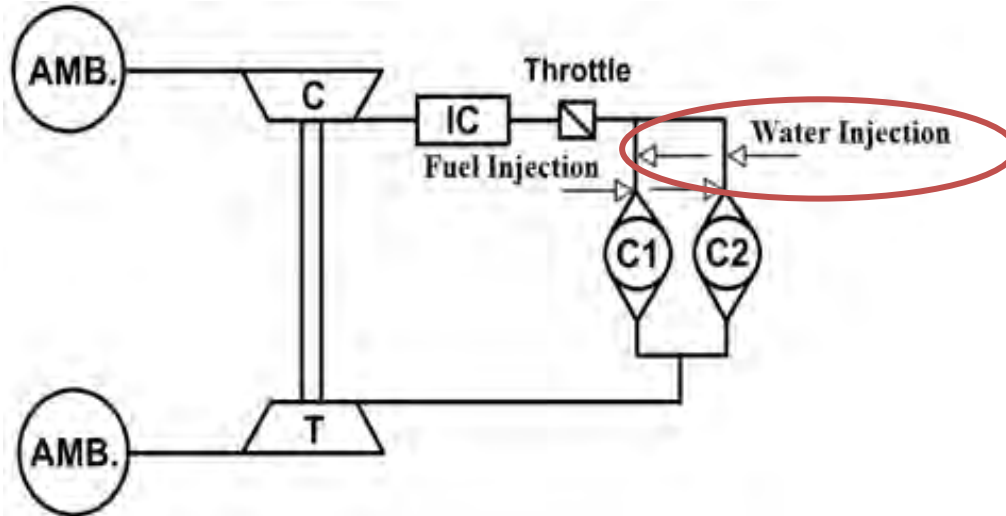
Risultati Calibrazione con LP-EGR



Operating condition		no-EGR ("Base" points)			Optimal EGR ("Best" points)				
Engine Speed, rpm	BMEP, bar	BSFC, g/kWh	MFB50%, deg	A/F,-	BSFC, g/kWh	MFB50%, deg	A/F,-	EGR, %	BSFC gain, %
1500								17.1	11.9
2100								19.3	25.9
2500								19.5	32.8
3300								18.2	30.9
4400								0	0
5500								13.1	14.9

Calibrazione di Configurazioni Alternative: WI

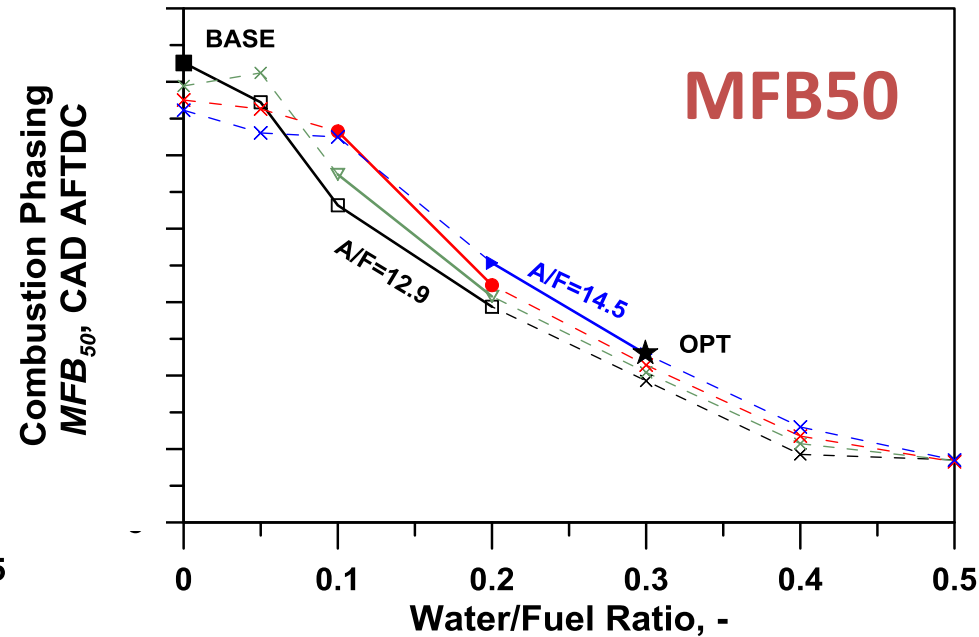
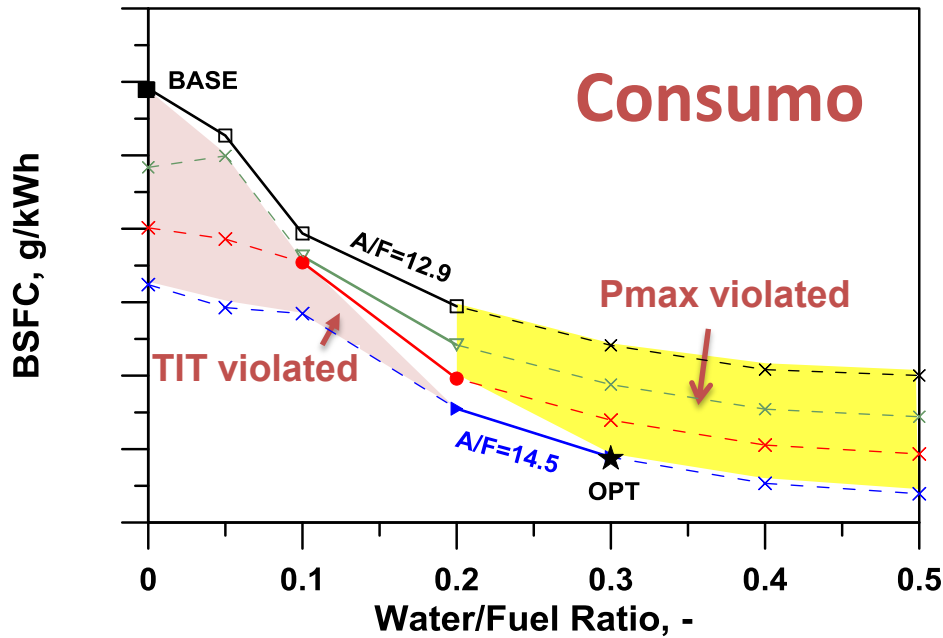
Strategie di regolazione con Iniezione d'acqua (WI) nei runner di aspirazione:



$$W/F \text{ ratio} = \frac{\dot{m}_{water}}{\dot{m}_{fuel}}$$

- ❑ Analisi nel punto di funzionamento 2100 rpm, WOT;
- ❑ Obiettivo: riduzione consumi con stessi vincoli precedenti;
- ❑ Metodologia: Analisi parametriche a vari A/F (α) e rapporto Acqua/Combustibile (W/F ratio).

Risultati Calibrazione con Iniezione d'Acqua



Operating condition		no-WI ("Base" points)			Optimal WI ("Best" points)				
Engine Speed, rpm	BMEP, bar	BSFC, g/kWh	MFB50%, deg	A/F,-	BSFC, g/kWh	MFB50%, deg	A/F,-	Water/Fuel ratio, -	BSFC gain, %
1500								0.4	17.3
2100								0.3	29.7
2500								0.2	33.8
3300								0.2	33.5
4400								0.05	11.6
5500								0.05	14.5

Conclusioni 1/2

Lo sviluppo di sofisticati modelli 1D di turbolenza, combustione, dispersione ciclica e detonazione, consente:

- ❑ di effettuare una **pre-calibrazione virtuale del propulsore**, che tenga conto di diversi obiettivi (prestazioni, consumi, rumore) e vincoli operativi (max boost, max TIT, assenza di knock, etc.);
- ❑ di **confrontare con accuratezza diverse strategie di regolazione** sull'intero campo di funzionamento del motore, comprendendo più chiaramente l'effetto combinato dei numerosi parametri di regolazione;
- ❑ di valutare gli effetti di **variazioni dell'architettura motore**, quantificando i vantaggi potenziali ottenibili sui consumi, evidenziandone pro e contro anche in termini di problematiche di calibrazione e controllo.

Conclusioni 2/2

I risultati presentati sull'architettura tradizionale, hanno mostrato:

- ❑ la capacità della metodologia sviluppata, basata sull'accoppiamento di un modello 1D con un codice di ottimizzazione, di **riprodurre fedelmente le calibrazioni del motore ottenute per via sperimentale**;
- ❑ di contribuire quindi alla **riduzione dei tempi di sviluppo (*time-to-market*)** di futuri propulsori ad accensione comandata;

I risultati presentati con circuito LP-EGR o WI, hanno evidenziato:

- ❑ **considerevoli riduzioni dei consumi a pieno carico**, talvolta pari al 30%, in un campo tuttavia **molto ristretto** dei parametri di controllo;
- ❑ Tali risultati sono attualmente in fase di **verifica sperimentale** e **approfondimento 3D** da parte dell'intero gruppo di ricerca **IM – UniNA – UniMoRe.**

