



---

# **“Combustione, Knock e Scambio Termico: Sviluppo di Modelli CFD per l'analisi di Motori ad Alte Prestazioni”**

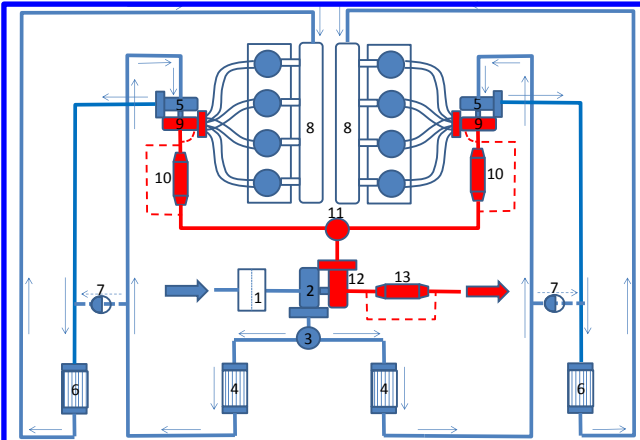
---

G. Cantore, S. Fontanesi, E. Mattarelli, A. d'Adamo et Al.

- **Introduzione: downsizing, downspeeding, boosting, knock, scambio termico**
- **PARTE 1: Detonazione**
- UniMORE-PDF Knock Model
  - Modellazione CFD del fenomeno della detonazione
  - Motivazioni per lo sviluppo del modello UniMORE-PDF
  - Descrizione del modello
  - Distribuzione statistica della reattività della miscela
  - Stima dell'incidenza dei cicli detonanti
- **PARTE 2: Scambio Termico**
- UniMORE Wall Function
  - Metodologia integrata In-cylinder / CHT
  - Bilancio termico motore e stima dei flussi termici
  - Modelli in letteratura
  - Origine della UniMORE Wall Function
- **Conclusioni**

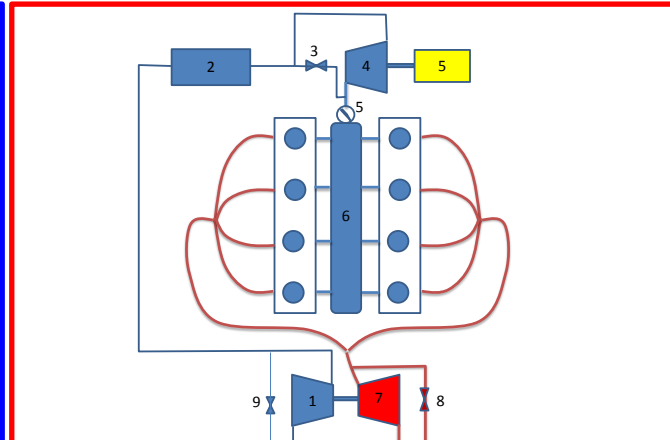
- **Introduzione: downsizing, downspeeding, boosting, detonazione, scambio termico**
- **PARTE 1: Detonazione**
- UniMORE-PDF Knock Model
  - Modellazione CFD del fenomeno della detonazione
  - Motivazioni per lo sviluppo del modello UniMORE-PDF
  - Descrizione del modello
  - Distribuzione statistica della reattività della miscela
  - Stima dell'incidenza dei cicli detonanti
- **PARTE 2: Scambio Termico**
- UniMORE Wall Function
  - Metodologia integrata In-cylinder / CHT
  - Bilancio termico motore e stima dei flussi termici
  - Modelli in letteratura
  - Origine della UniMORE Wall Function
- **Conclusioni**

Downsizing, downspeeding, turbocharging e/o boosting  
Aumento delle prestazioni specifiche



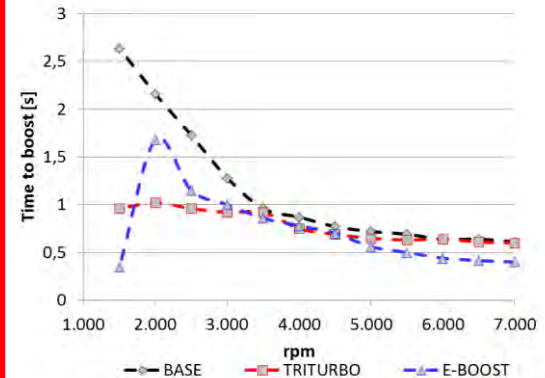
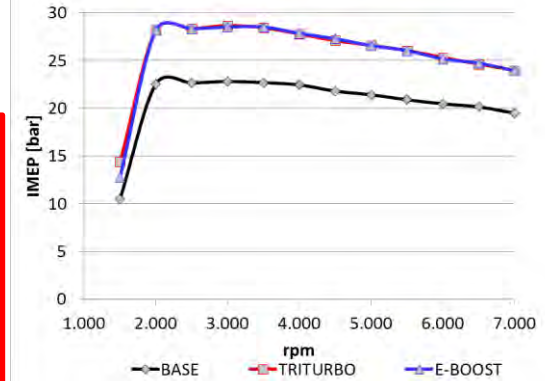
**Sistemi di turbo-sovralimentazione multi-stadio.**

- 2: Compressore di bassa pressione (LPC);
- 3: flow split;
- 4: Air cooler di bassa pressione (LP\_CAC);
- 5: Compressore di alta pressione (HPC);
- 6: Air Cooler di alta pressione (HP\_CAC);
- 7: By-Pass compressore di alta (HPC\_BP);
- 9: Turbina di alta pressione (HPT);
- 12: Turbina di bassa pressione (LPT)



**Turbo-sovralimentazione a gas di scarico e E-booster volumetrico.**

- 1: Compressore dinamico;
- 2: Air Cooler;
- 3: By-pass E-booster;
- 4: E-booster;
- 5: Motore elettrico (5 kW);
- 7: Turbina a gas di scarico;
- 9: By-pass dynamic compressor by-pass



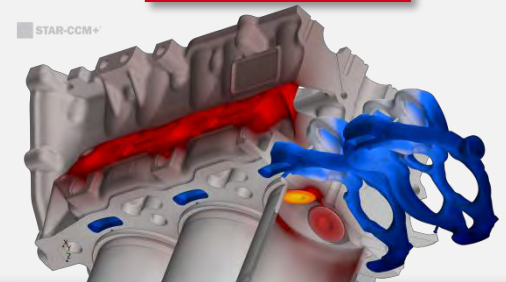
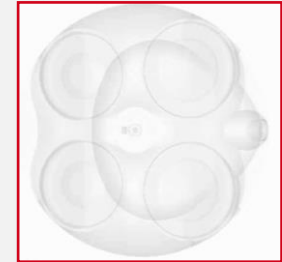
Downsizing, downspeeding, turbocharging e/o boosting  
Aumento delle prestazioni specifiche

**Limiti per insorgenza detonazione e  
rotture termo-meccaniche**



**La modellazione CFD può  
fornire indicazioni utili  
per lo sviluppo motore?**

**Previsione insorgenza knock e campo  
termico puntuale nel motore**



- Introduzione: downsizing, downspeeding, boosting, detonazione, scambio termico
- **PARTE 1: Detonazione**
- UniMORE-PDF Knock Model
  - Modellazione CFD del fenomeno della detonazione
  - Motivazioni per lo sviluppo del modello UniMORE-PDF
  - Descrizione del modello
  - Distribuzione statistica della reattività della miscela
  - Stima dell'incidenza dei cicli detonanti
- **PARTE 2: Scambio Termico**
- UniMORE Wall Function
  - Metodologia integrata In-cylinder / CHT
  - Bilancio termico motore e stima dei flussi termici
  - Modelli in letteratura
  - Origine della UniMORE Wall Function
- **Conclusioni**

Nel corso degli anni sono stati proposti diversi approcci alla modellazione del knock in ambiente RANS:

## Modello knock UniMORE<sup>[1]</sup>

### Costo computazionale

**Soluzione delle equazioni di trasporto delle specie**

PRO: massima accuratezza, generalità d'uso

CONTRO: costi inaccettabili

**Interpolazione multi-lineare dei tempi di autoaccensione mediante Look-Up Table**

PRO: basso costo computazionale, fedele ricostruzione della storia chimica degli incombusti

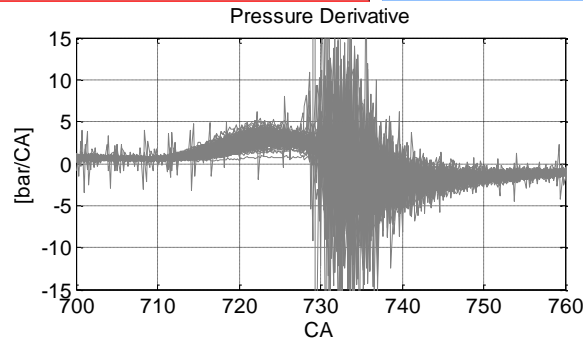
CONTRO: -

### Semplificazione del fenomeno

**Correlazioni per i ritardi all'accensione**

PRO: basso costo computazionale, facile implementazione

CONTRO: serve una correlazione



... resta però da chiedersi...

***...ha senso parlare di (e simulare un) "knock medio"?!?!***

## Variabilità ciclica del Knock

La Large-Eddy Simulation (LES) è oggi applicabile/applicata per simulare la variabilità del knock [2] in motori di produzione.

**PRO:** simulazione delle instabilità tipiche della combustione turbolenta;

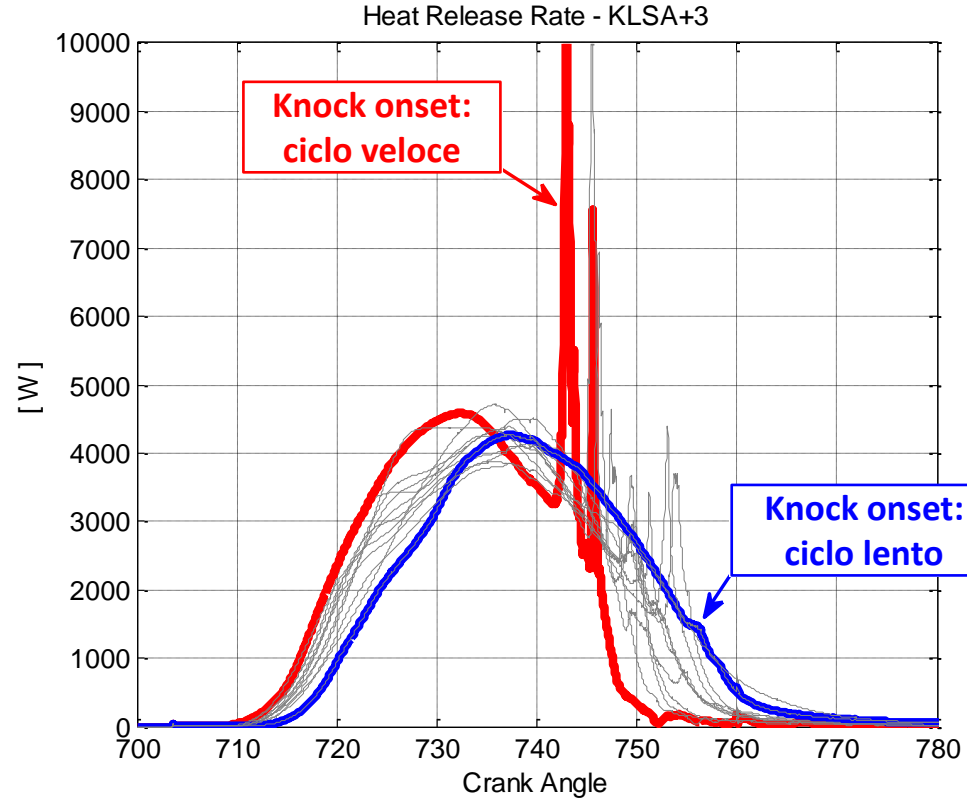
**CONTRO:** il costo computazionale è ancora eccessivo per un suo utilizzo a livello di R&D industriale.

### Motivazioni alla base del modello

#### UniMORE-PDF Knock<sup>[3]</sup>

Nel tentativo di unire i due mondi, è stato sviluppato un modello di knock per simulazioni RANS basato sul trasporto di equazioni della varianza dello stato chimico/fisico della miscela.

Obiettivo del modello è la ricostruzione di una variabilità presunta di knock.



## Modello knock "standard"

Il ritardo all'autoaccensione dipende dai valori locali mediati sulla cella:

- Pressione;
- Temperatura;
- Rapporto A/F;
- Diluizione EGR.

$$\left. \begin{array}{l} \text{▪ Pressione;} \\ \text{▪ Temperatura;} \\ \text{▪ Rapporto A/F;} \\ \text{▪ Diluizione EGR.} \end{array} \right\} \tau = \tau(\tilde{p}, \tilde{T}_u, \tilde{\Phi}, \tilde{Y}_{EGR})$$

## Modello knock UniMORE-PDF : Equazioni per la varianza

- **Varianza Mixture Fraction**

$$\frac{\partial \bar{\rho} h'}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{v} h') = \nabla \cdot (\bar{\rho} (D + D_T) \nabla h') + 2\bar{\rho} D_T |\nabla h'|^2 - \bar{\rho} \frac{h'}{\tau_Z(Re_{l_0})}$$

- **Varianza Entalpia**

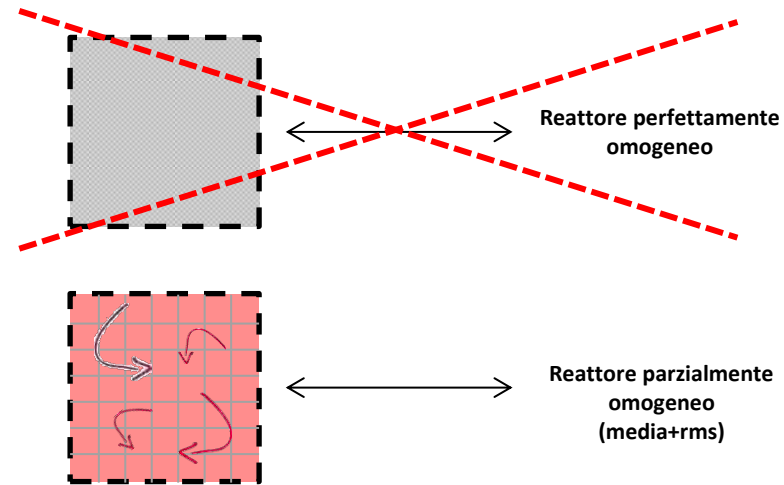
$$\frac{\partial \bar{\rho} Z'}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{v} Z') = \nabla \cdot (\bar{\rho} (D + D_T) \nabla Z') + 2\bar{\rho} D_T |\nabla Z'|^2 - \bar{\rho} \frac{Z'}{\tau_Z(Re_{l_0})}$$

### Significato fisico

**Termini sorgente** derivati dal local turbulent relaxation time-scale model (rif. Fox <sup>[4]</sup>, Linse <sup>[5]</sup>).

Deviazione locale di T e  $\Phi$  per tenere conto della dispersione attorno al valor medio.

La dispersione turbolenta nella cella influenza la reattività locale.



# DISTRIBUZIONE STATISTICA DELLA REATTIVITA'

Il modello di knock UniMORE-PDF considera, per ogni cella, la varianza di:

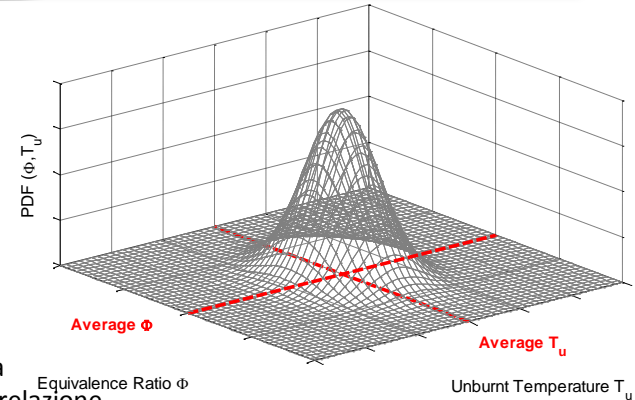
- **Temperatura;**
- **Composizione miscela.**

Ogni cella è rappresentata da una distribuzione Gaussiana bivariata troncata.

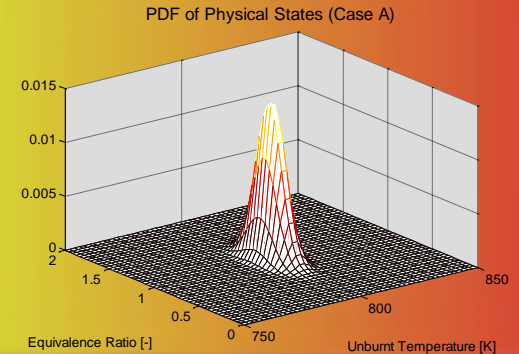
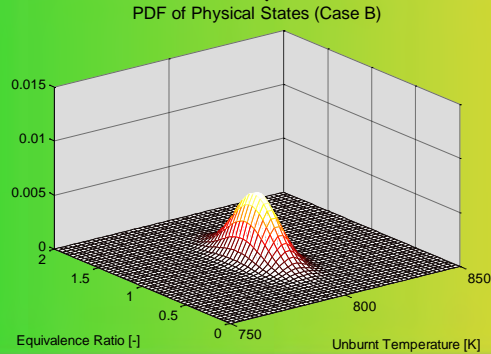
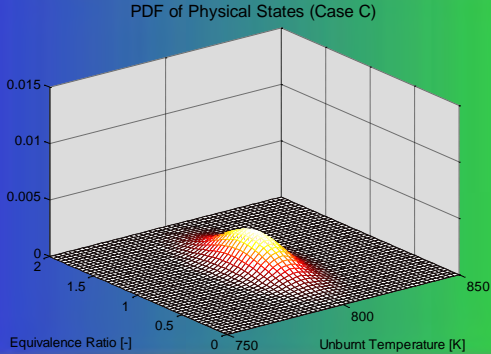
Il modello si basa sul trasporto del 1° e 2° momento di  $\Phi$  e  $T_u^{[5]}$ . Tiene conto dell'interazione chimica/turbolenza.

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \cdot \left(\frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-\mu_y)^2}{\sigma_y^2} - \frac{2\rho(x-\mu_x)(y-\mu_y)}{\sigma_x\sigma_y}\right)\right]$$

$x = \Phi$   
 $y = \text{Temperatura}$   
 $\rho = \text{Coeff. di Correlazione}$



## Bassa Turbolenza → Alta Turbolenza



## Implementazione della PDF ( $\Phi, T$ ) discreta

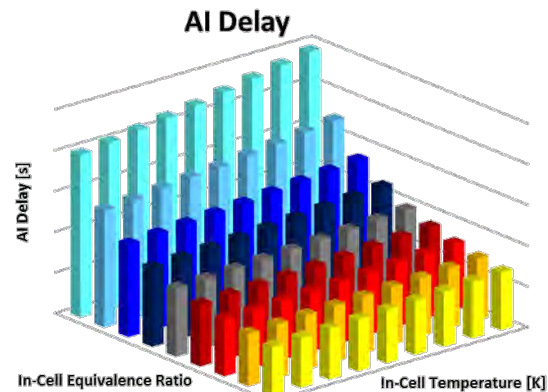
La PDF ( $\Phi, T$ ) continua viene discretizzata in un numero finito di stati e poi normalizzata. Le due variabili  $\Phi$  e  $T$  vengono discretizzate in modo indipendente.

**Step 1.**  $n$  stati per cella  $\rightarrow n$  AI delays da cinetica chimica (look-up table).

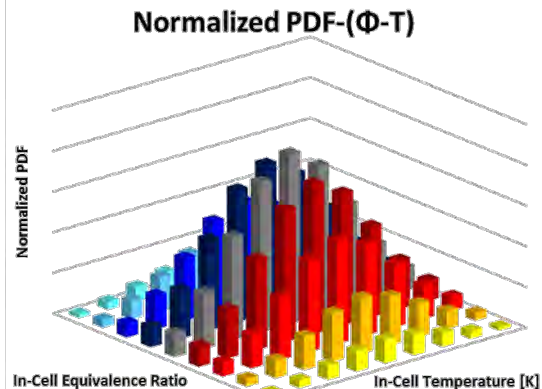
**Step 2.** AI delays mediati usando la PDF ( $\Phi, T$ ) come peso rappresentativo.

Eventuali disomogeneità a livello della singola cella dovute al trasporto e al mixing vengono ora prese in considerazione.

### Step 1



### Step 2



# DISTRIBUZIONE STATISTICA DELLA REATTIVITA'

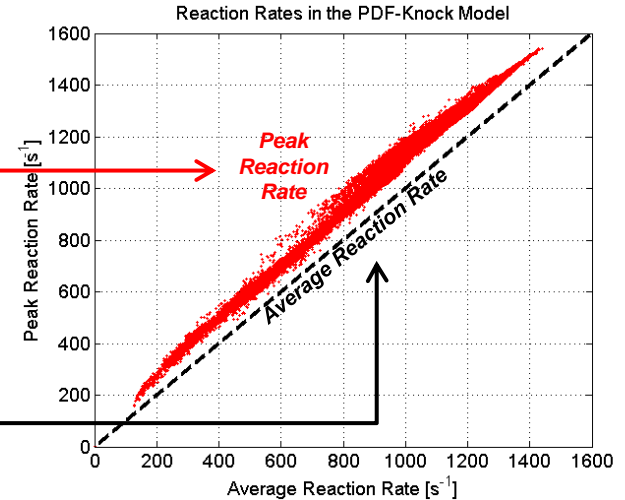
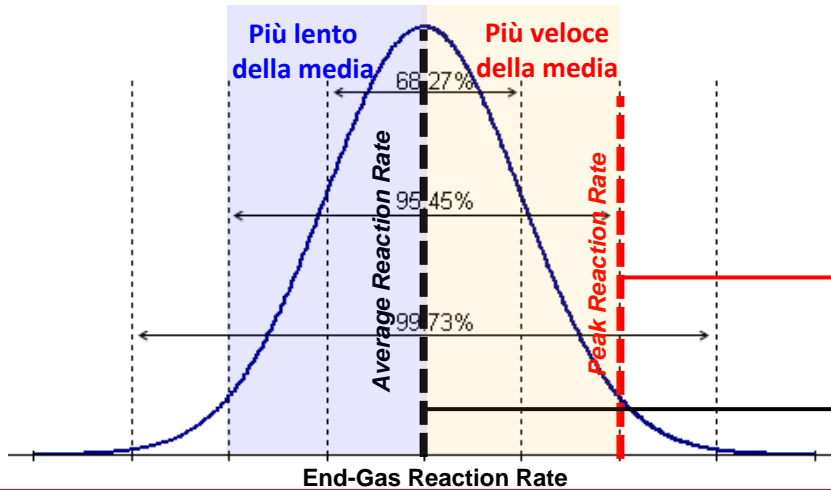
- La dispersione della reattività all'interno della singola cella viene ora calcolata.
- Una distribuzione presumed-PDF Gaussiana viene ricostruita per ogni cella nei gas incombusti.

## Reattività media

$$\omega_{PDF,aver} = \sum_{i=1}^{\Phi_{tot}} \sum_{j=1}^{T_{tot}} P(\Phi_i, T_j) \cdot \frac{1}{\tau(\Phi_i, T_j)} d\Phi dT$$

## Deviazione della reattività

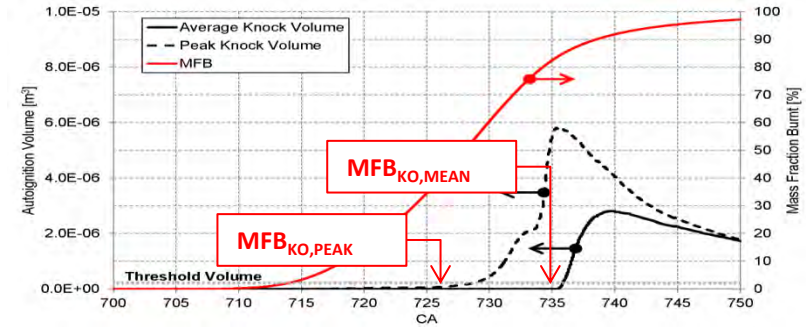
$$\omega_{rms} = \frac{\tau|_{PDF,aver} \cdot \tau|_{-2\sigma}}{\tau|_{PDF,aver} - \tau|_{-2\sigma}}$$



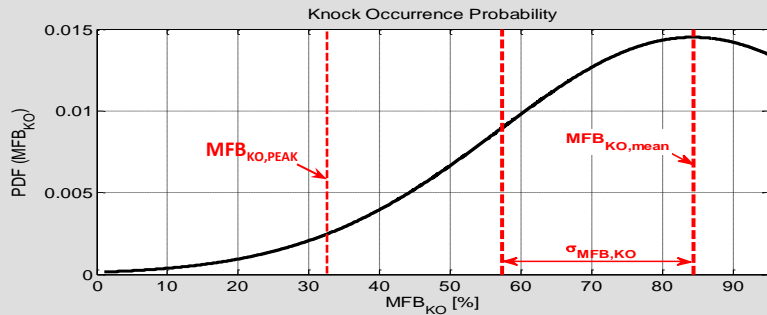
Come ultimo passaggio, si ricostruisce una presumed-PDF del knock:

- $MFB_{KO,MEAN}$ : la MFB all'insorgenza della "detonazione media";
- $MFB_{KO,PEAK}$ : la MFB all'insorgenza del knock nel 2.5% di end gas più reattivi (2 deviazioni standard oltre la media).

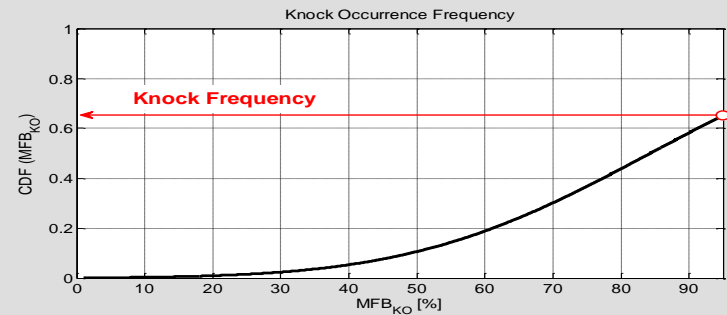
L'insorgenza del knock viene descritta da una distribuzione gaussiana:



## Probabilità di MFB @ Knock Onset



## Probabilità cumulativa di MFB @ Knock Onset



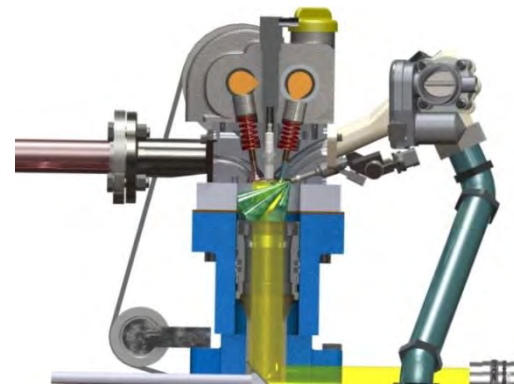
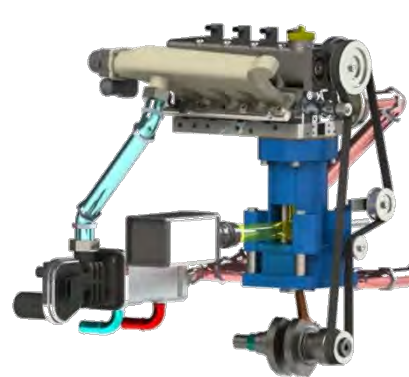
# VALIDAZIONE 1: MOTORE AD ACCESSO OTTICO

- ✓ Motore da ricerca AVL adattato all'IM-CNR con testa FIAT.
- ✓ GDI ad accesso ottico.

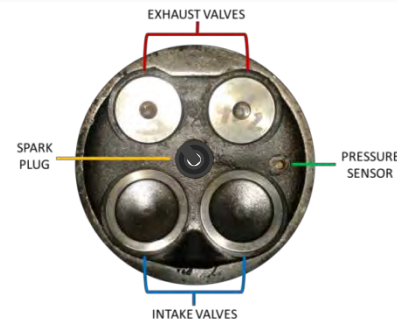
## Sistema di acquisizione

- ✓ Visualizzazione cycle resolved, CMOS camera
- ✓ UV-visible chemiluminescence, risoluzione 1°CA
- ✓ ICCD camera

Specifiche	
Cilindrata	399 cm <sup>3</sup>
Alesaggio	79 mm
Corsa	81.3 mm
Rc	10
Sistema di iniezione	Diretta, wall guided, 100 bar
Condizioni operative	
Velocità di rotazione	2000 rpm
Boost Pressure	0.5 bar
Anticipo	15 CA bTDC



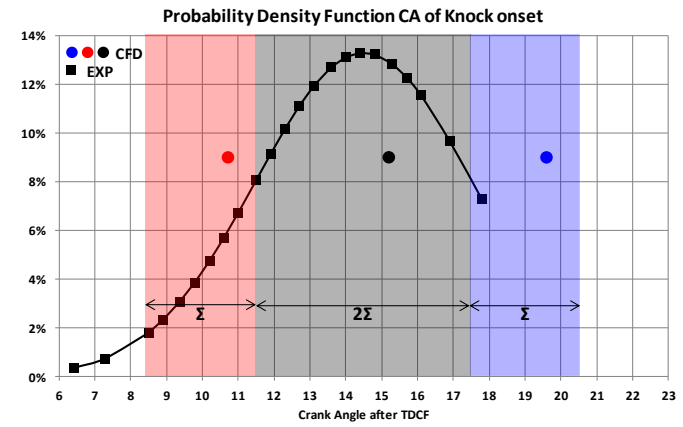
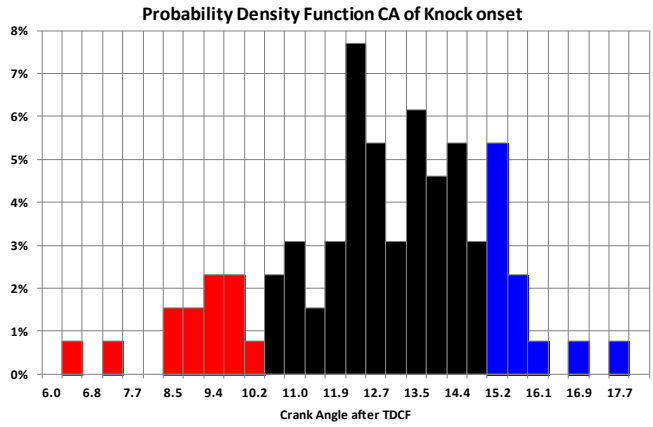
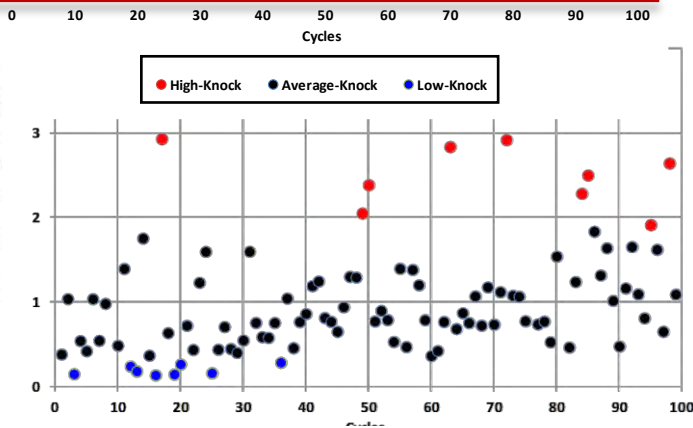
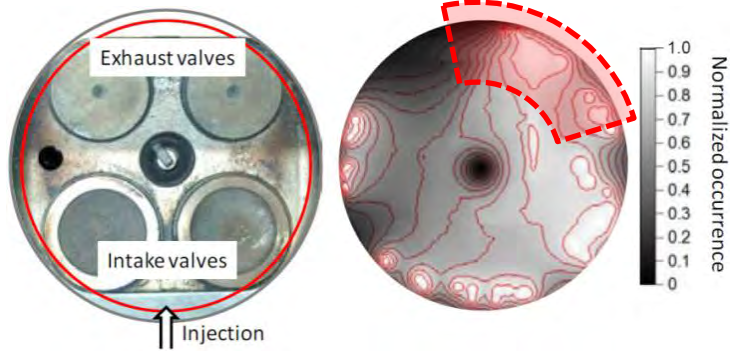
Anelli Bronzo-Teflon per lubrificazione pistone "oil-less"



Camera di combustione

# VALIDAZIONE 1: MOTORE AD ACCESSO OTTICO

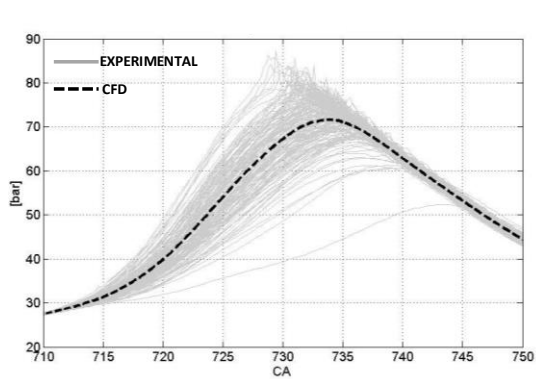
- ✓ Si analizza l'intensità di knock per ciclo (MAPO);
- ✓ Si monitora l'angolo motore di insorgenza knock;
- ✓ Il lato scarico sembra leggermente più favorevole al knock



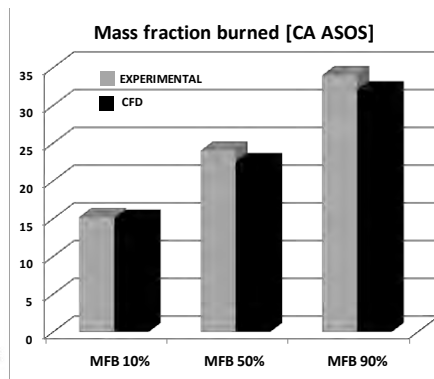
**Distribuzione quasi-gaussiana del knock onset.**

# VALIDAZIONE 1: MOTORE AD ACCESSO OTTICO

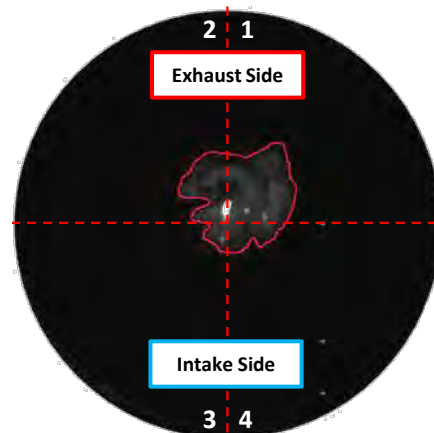
- ✓ Si analizzano 200 cicli consecutivi
- ✓ Si stabilisce una soglia del knock tramite un valore del gradiente di pressione di 5 bar/CA e si determina una frazione di cicli detonanti pari al **63%**;
- ✓ Grazie alla visualizzazione dello sviluppo di fiamma, si osserva uno sviluppo preferenziale della stessa verso il lato scarico, correttamente predetto dalle simulazioni.



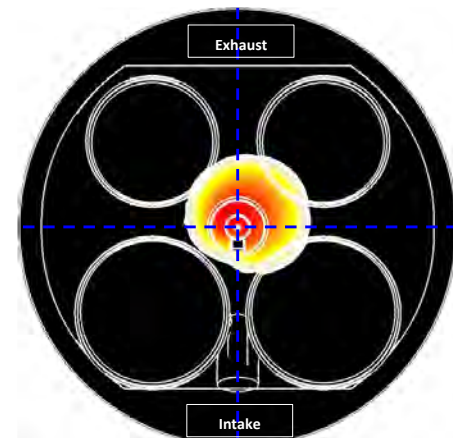
Pressione interno cilindro



Frazione di combustibile bruciato



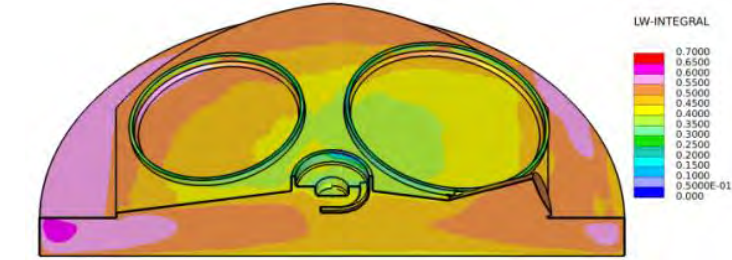
Media sperimentale dello sviluppo di fiamma (dall'accesso ottico)



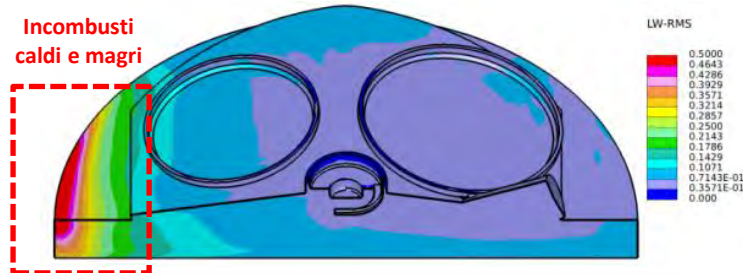
Media di insieme RANS dello sviluppo di fiamma predetto da Star-CD

# VALIDAZIONE 1: MOTORE AD ACCESSO OTTICO

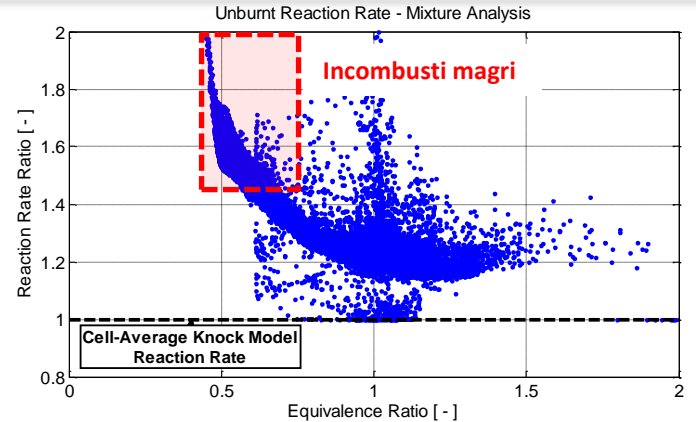
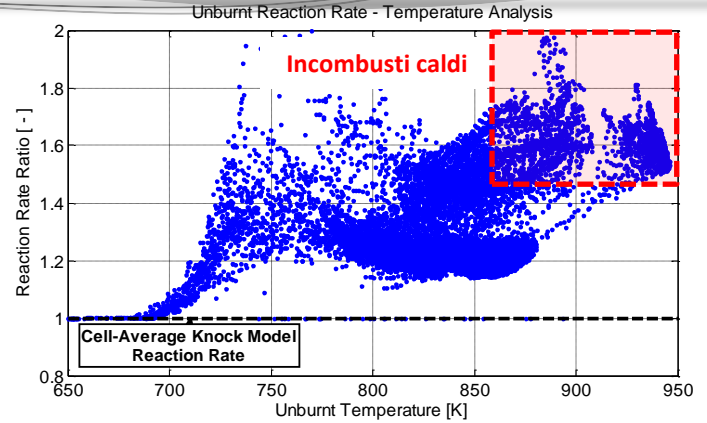
- ✓ Il precursore medio del knock vede il lato scarico come quello preferenzialmente soggetto a detonazione.
- ✓ Ma il lato scarico è anche quello che presenta la varianza di AI delay più alta, che a sua volta determina un picco locale di precursore del knock.



Cell-Average Knock Precursor Field (+10 CA aTDC)



Knock Precursor Variance Field (+10 CA aTDC)

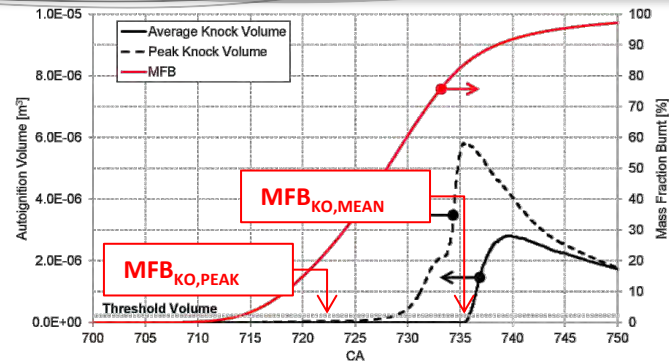


# VALIDAZIONE 1: FRAZIONE DI CICLI DETONANTI

Come ultimo passaggio, si ricostruisce la presumed-PDF del knock:

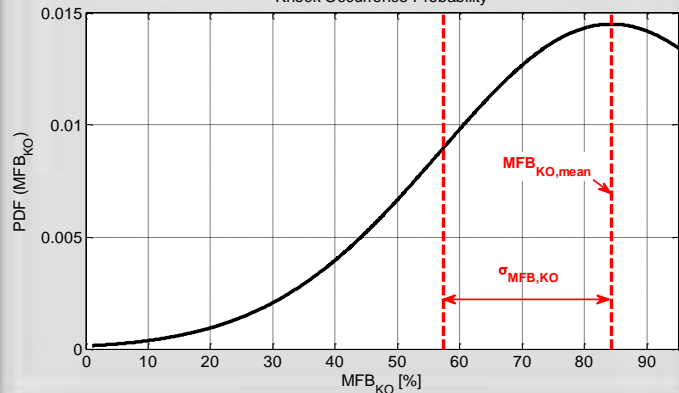
- $MFB_{KO,MEAN}$ : MFB all'insorgenza della "detonazione media";
- $MFB_{KO,PEAK}$ : MFB all'insorgenza del knock negli end gas più reattivi.

L'insorgenza del knock viene ricostruita mediante una gaussiana:



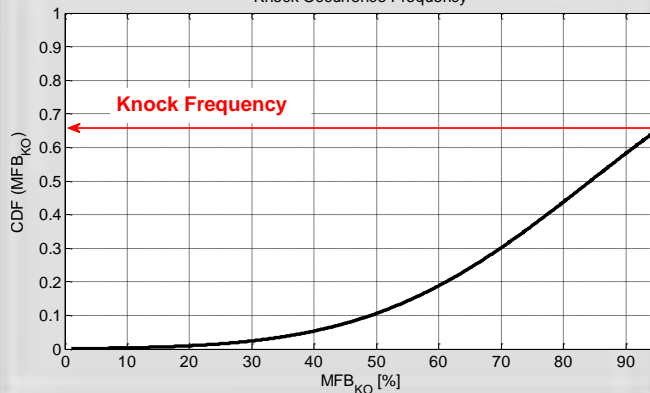
**Probabilità di MFB @ Knock Onset**

Knock Occurrence Probability



**Probabilità cumulativa di MFB @ Knock Onset**

Knock Occurrence Frequency



**Sperimentale**

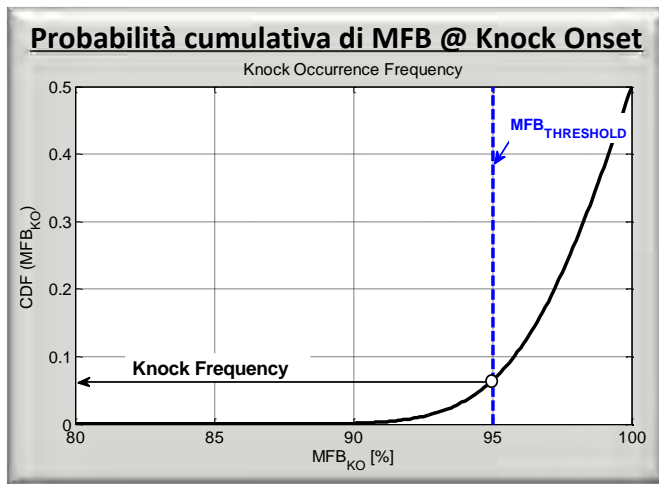
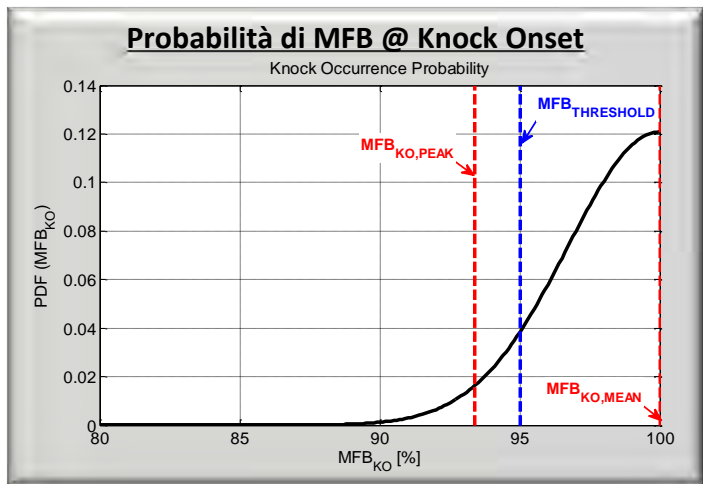
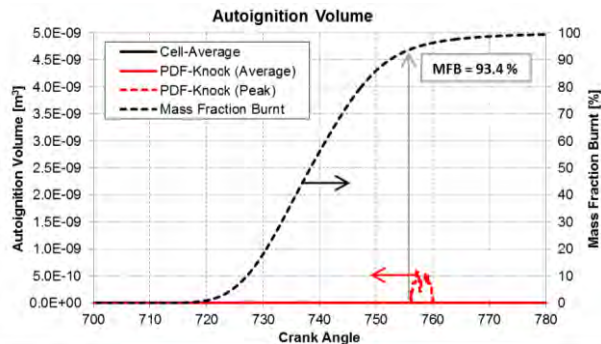
63% di cicli  
detonanti

**Modello di knock  
UniMORE-PDF**

65% di cicli  
detonanti

# VALIDAZIONE 2: MOTORE DI PRODUZIONE, FRAZIONE DI CICLI DETONANTI

La presumed-PDF del knock viene ricostruita in maniera del tutto analoga per un motore di produzione, che opera in condizioni di limite di detonazione.



**Sperimentale:**  
**2% di cicli detonanti**

**Modello knock**  
**UniMORE-PDF:**  
**6% di cicli detonanti**

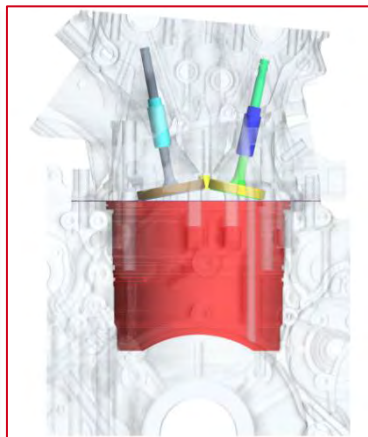
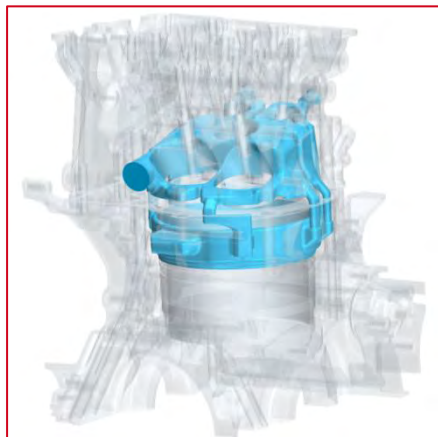
- Introduzione: downsizing, downspeeding, boosting, detonazione, scambio termico
- **PARTE 1: Detonazione**
- UniMORE-PDF Knock Model
  - Modellazione CFD del fenomeno della detonazione
  - Motivazioni per lo sviluppo del modello UniMORE-PDF
  - Descrizione del modello
  - Distribuzione statistica della reattività della miscela
  - Stima dell'incidenza dei cicli detonanti
- **PARTE 2: Scambio Termico**
- UniMORE Wall Function
  - Metodologia integrata In-cylinder / CHT
  - Bilancio termico motore e stima dei flussi termici
  - Modelli in letteratura
  - Origine della UniMORE Wall Function
- **Conclusioni**

# METODOLOGIA INTEGRATA IN-CYLINDER/CHT

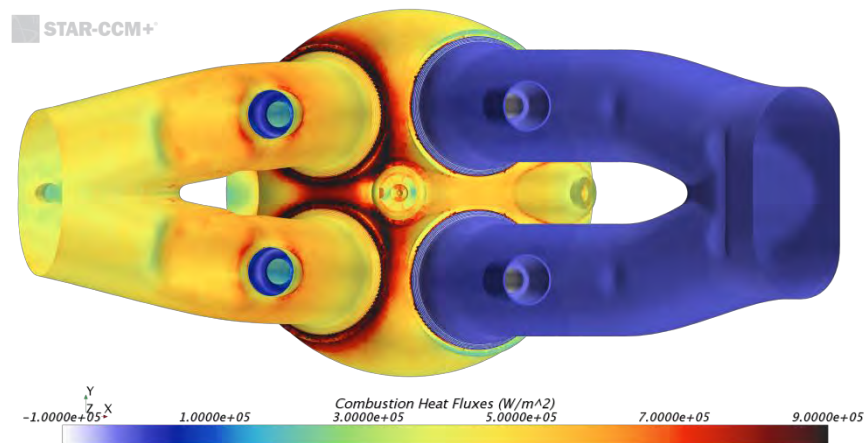
La corretta rappresentazione del campo termico nei componenti motore e la stima del bilancio termico del motopropulsore dipendono da



- la corretta modellazione CHT (Conjugate Heat Transfer) del circuito di raffreddamento e dei componenti solidi

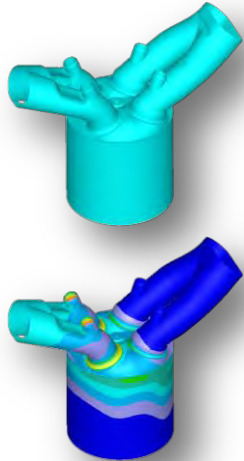


- l'applicazione di condizioni al contorno termiche corrette, in particolare sui componenti che si affacciano alla camera di combustione



Gli ambienti di simulazione interno cilindro e CHT sono strettamente interconnessi: solo dalla loro integrazione è possibile calcolare correttamente sia il carico termico agente sul motore (in termini sia globale sia locale) sia l'effetto dello stesso sul campo termico dei componenti motore

## *es-ice & STAR-CD*



Simulazione preliminare con temperature di parete uniformi



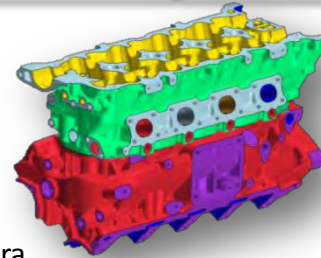
Export dei flussi termici e mappatura sul modello CHT



Nuova simulazione interno cilindro con distribuzione spaziale delle temperature



## *STAR-CCM+*



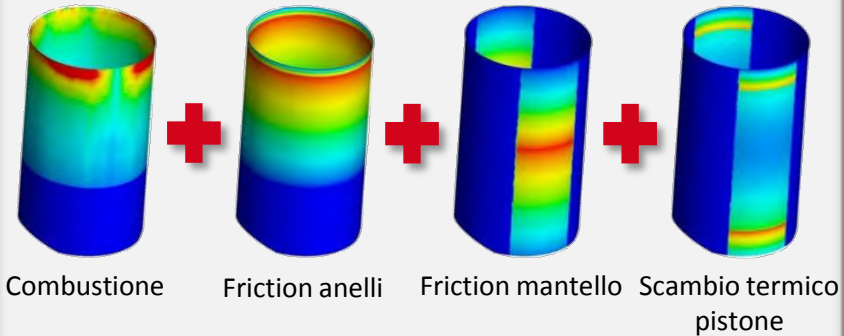
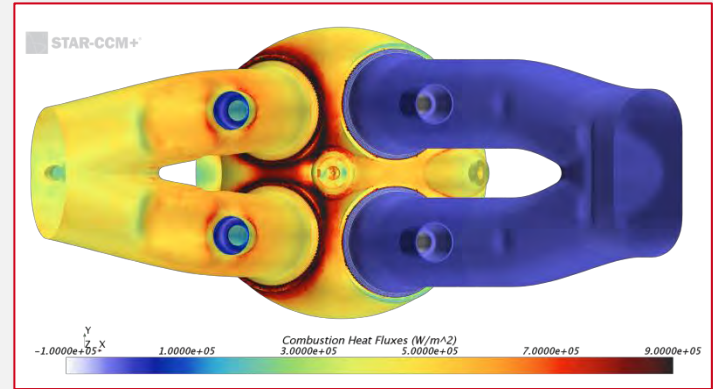
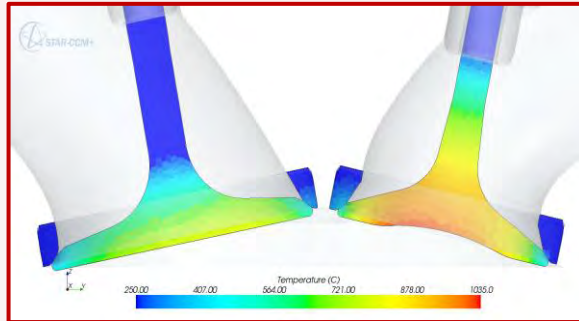
Valutazione del campo termico locale ed export della distribuzione spaziale di temperature sulle pareti della camera di combustione

In un modello CHT è necessario tenere in conto una molteplicità di fattori:

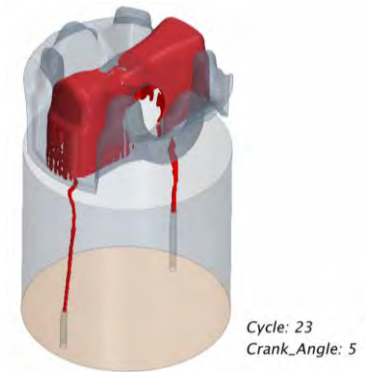
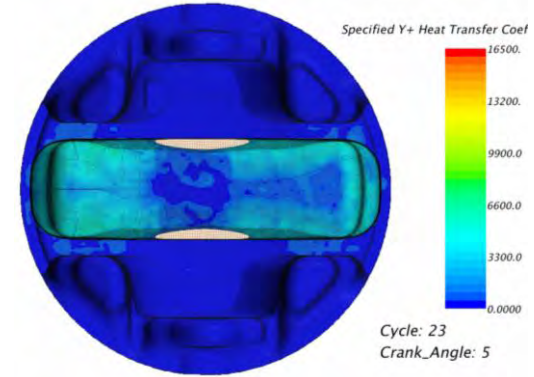
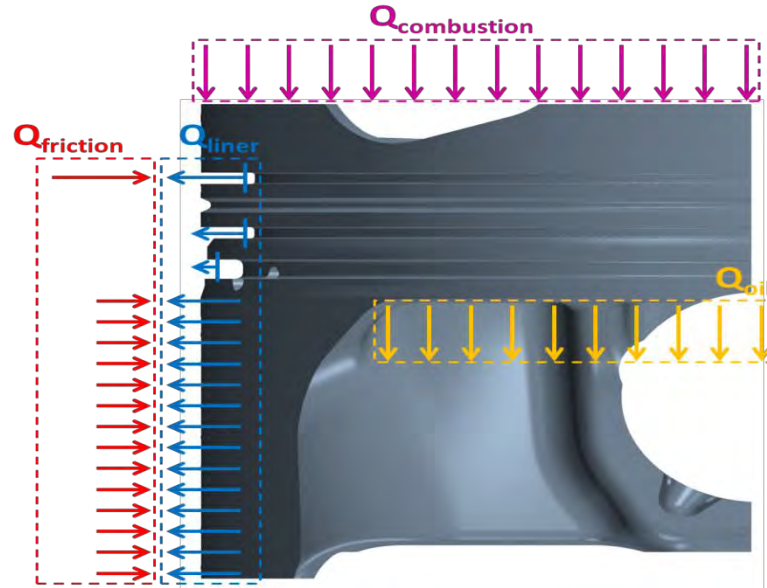
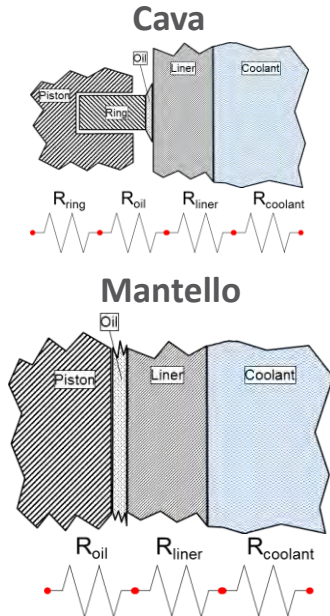
- ✓ Combustione
- ✓ Flusso di gas
- ✓ Attriti
- ✓ Effetti della lubrificazione
- ✓ Condizioni ambientali
- ✓ Adiabaticità locali
- ✓ Contatti forzati

Opportune coppie di HTC e temperature

Resistenze di contatto tra elementi adiacenti



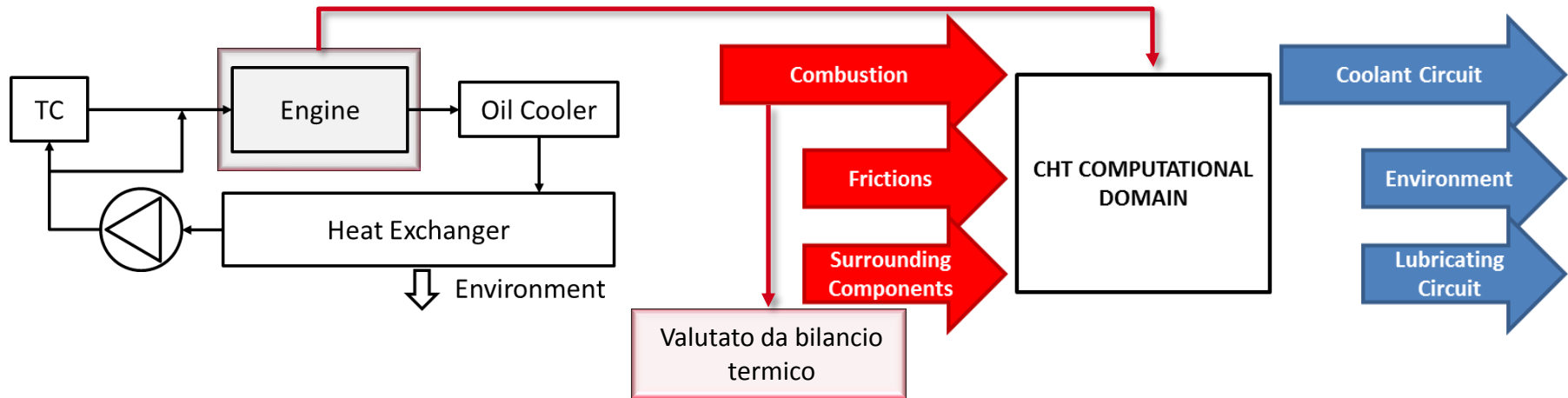
- Il pistone è analizzato separatamente
- Sul cielo si applica il flusso puntuale derivante dalle simulazioni interno cilindro
- Gli effetti dei getti olio, degli anelli, degli attriti, dei circuiti di lubrificazione e raffreddamento sono simultaneamente tenuti in conto
- Il flusso  $Q_{\text{liner}}$  risultante viene quindi applicato alla canna cilindro



# STIMA DEI FLUSSI TERMICI DA COMBUSTIONE

## Quant'è il calore ceduto dai gas alle pareti della camera di combustione?

Se è disponibile un bilancio termico di dettaglio, è noto un “flusso termico target” ed è possibile “scalare” i flussi calcolati così da farli coincidere almeno a livello integrale con quelli sperimentali, mantenendo la distribuzione puntuale calcolata.



Se il flusso termico target non è noto a priori, bisogna affidarsi a (e fidarsi di) quello predetto tramite le leggi di parete termiche disponibili.

**Tuttavia...**

# CONDIZIONI AL CONTORNO TERMICHE

**Huh**

$$q_w = - \frac{\rho c_p u_\tau (T - T_w)}{13.2Pr + 2.195 \ln y^+ - 5.66 - S^+ (87.12Pr + 2.195y^+ - 28.98)}$$

**Nijeweme**

$$q_w = - \frac{\rho c_p u_\tau (T - T_w)}{Pr_t (u^+ + P)}$$

**Lauder & Spalding**

$$q_w = - \frac{\rho c_p u_\tau (T - T_w)}{2.075 \ln(9y^+) + 7.52 \left( \frac{Pr}{0.85} - 1 \right) \left( \frac{0.85}{Pr} \right)^{0.25}}$$

**Kader**

$$q_w = - \frac{\rho c_p u_\tau (T - T_w)}{Pr y^+ e^{-\Gamma} + [2.12 \ln(1 + y^+) + \beta(Pr)] e^{-1/\Gamma}}$$

**...ognuno dice la sua!**

**Modified Angelberger**

$$q_w = - \frac{\rho c_p u_\tau T \ln \left( \frac{T}{T_w} \right)}{Pr_t (u^+ + P)}$$

**Angelberger**

$$q_w = - \frac{\rho c_p u_\tau T \ln \left( \frac{T}{T_w} \right)}{2.075 \ln y^+ + 3.9}$$

**Han & Reitz**

$$q_w = - \frac{\rho c_p u_\tau T \ln \left( \frac{T}{T_w} \right)}{2.1 \ln y^+ + 2.5}$$

**Rakopoulos**

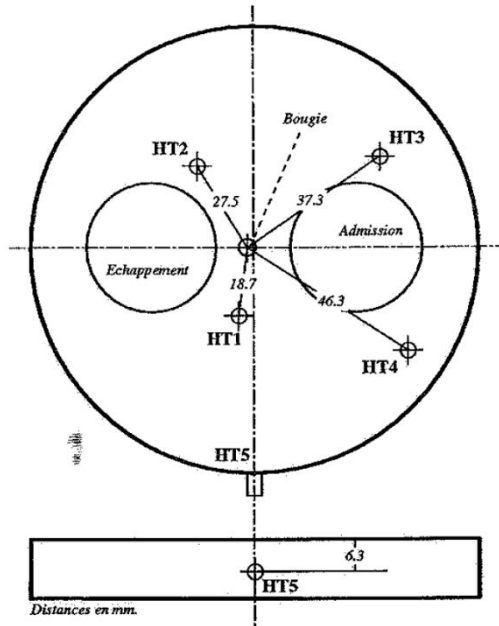
$$q_w = - \frac{\rho c_p u_\tau T \ln \left( \frac{T}{T_w} \right) - \left( \frac{dp}{dt} + Q_c \right) u_\tau \left( \frac{y^+ - 40}{0.4767 + \frac{1}{Pr}} + 117.31 \right)}{\frac{1}{0.4767} \left[ \ln \left( y^+ + \frac{1}{Pr \cdot 0.4767} \right) - \ln \left( 40 + \frac{1}{Pr \cdot 0.4767} \right) \right] + 10.2384}$$

**Saric & Basara**

$$q_w = - \frac{\rho c_p u_\tau T \ln \left( \frac{T}{T_w} \right)}{Pr y^+ e^{-\Gamma} + (2.1 \ln y^+ + 2.5) e^{-1/\Gamma}}$$

# LEGGI DI PARETE TERMICHE – APPROCCI IN LETTERATURA

La maggior parte delle wall function è stata validata usando il “GM pancake test engine”, le cui caratteristiche geometriche e operative sono molto lontane da quelle tipiche dei motori AS di corrente produzione. Qui di seguito si analizzano le formulazioni di Angelberger e Han & Reitz , tra le più diffuse nei codici CFD.



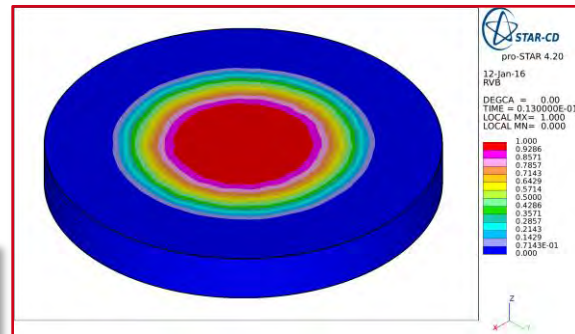
Alesaggio	105 [mm]
Corsa	95.25 [mm]
Lungh. di biella	158 [mm]
Rc	8.56
Velocità di rotazione	1500 [rpm]
Rapporto di equivalenza	0.87
Efficienza volumetrica	40 %
Anticipo	27° CA bFTDC



# LEGGI DI PARETE TERMICHE – APPROCCI IN LETTERATURA

Sono disponibili misure locali di flusso termico in quattro punti di misura sulla testa motore.

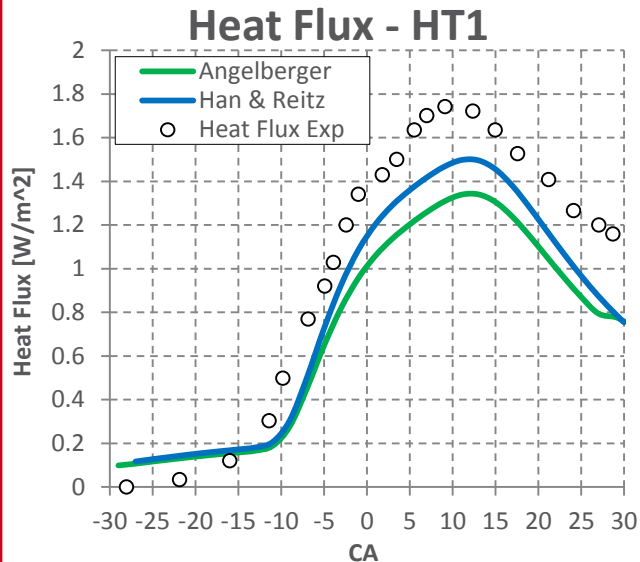
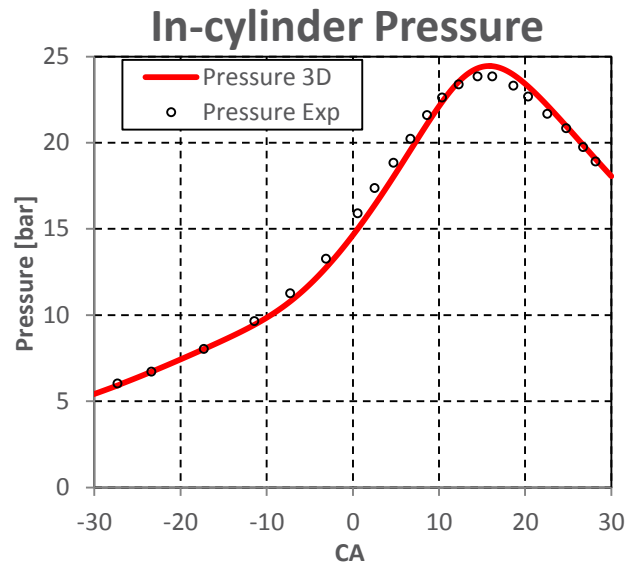
Per brevità si riporta il confronto per un solo punto di misura.



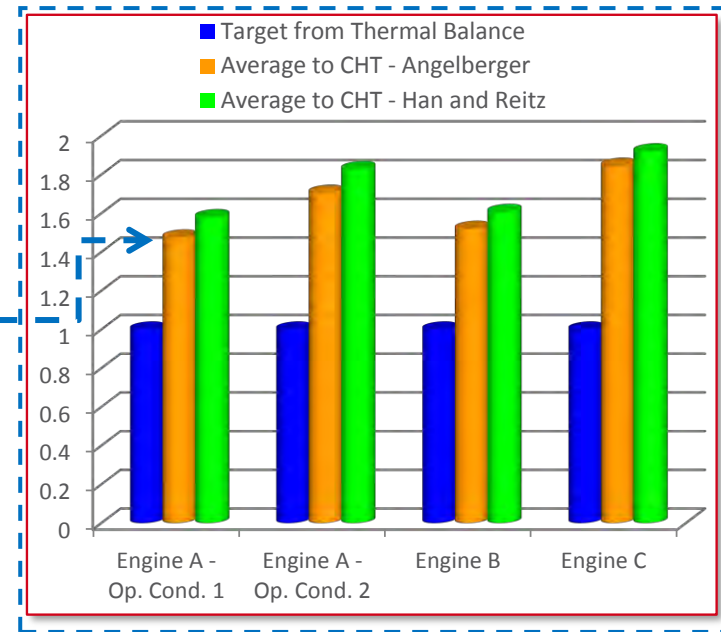
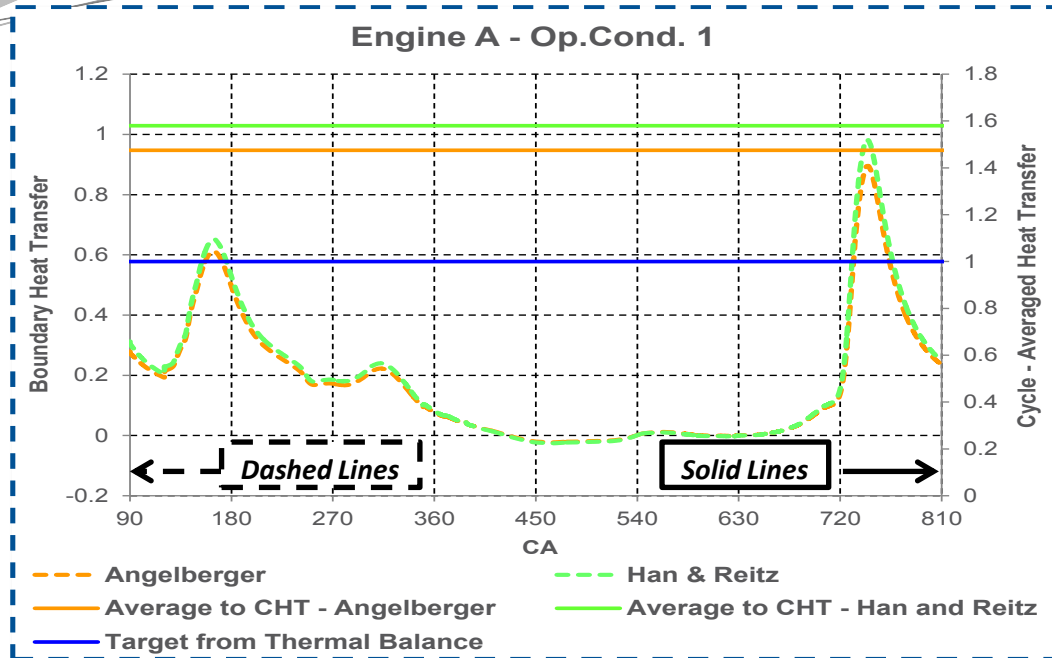
Sia il modello di Angelberger sia quello di Han & Reitz si avvicinano ragionevolmente ai valori di flusso termico misurati



Entrambe le leggi di parete sono in grado di stimare correttamente I flussi termici in queste condizioni operative



# LEGGI DI PARETE TERMICHE – APPROCCI IN LETTERATURA



- La wall function di Angelberger tende a sovrastimare fortemente il flusso termico (+30%÷+50%)
- Questo comportamento è confermato per tutti i casi analizzati
- La wall function di Han & Reitz evidenzia una sovrastima ancora maggiore
- Non è possibile identificare un unico trend e/o fattore di scala

# LEGGI DI PARETE TERMICHE – APPROCCI IN LETTERATURA

Le leggi di **Angelberger** e **Han & Reitz** sono simili sia come formulazione che in come principio: considerano la variazione di densità e viscosità nel boundary layer e sono quindi una versione comprimibile delle leggi di parete tradizionali, in cui la comprimibilità non è tenuta in considerazione.

- Legge di parete termica di Angelberger:

$$\begin{cases} \theta^+ = Pr \cdot \eta^+; & \eta^+ \leq 13.2 \\ \theta^+ = 2.075 \cdot \ln(\eta^+) + 3.9; & \eta^+ > 13.2 \end{cases}$$

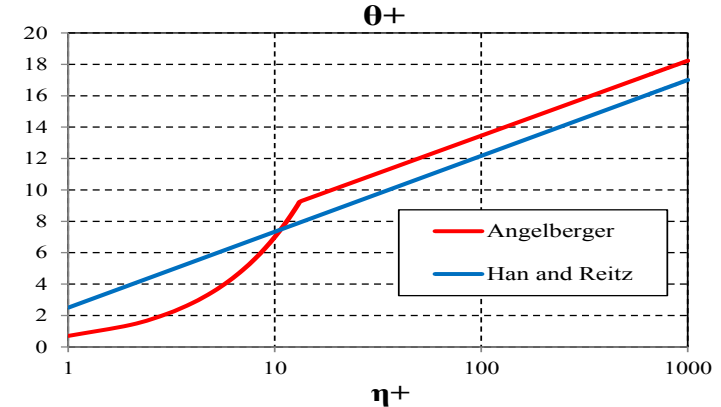
- Legge di parete termica di Han & Reitz:

$$\theta^+ = 2.1 \cdot \ln(\eta^+) + 2.5$$

Per entrambi i profili di temperatura il flusso termico è dato da:

$$q_w = - \frac{\rho_w \cdot c_p \cdot u_\tau \cdot T_w \cdot \ln\left(\frac{T}{T_w}\right)}{\theta^+}$$

dove  $\eta^+ = (v_w/v) \cdot y^+$  è la distanza adimensionale non-isoterma.



# LEGGI DI PARETE TERMICHE – GRUMo WALL FUNCTION

Un principio simile era già stato proposto da **Kays and Crawford** per flussi isotermi (o incompressibili):

$$T^+ = 2.075 \cdot \ln(y^+) + 13.2 \cdot Pr - 5.34$$

$$(T^+ = 2.075 \cdot \ln(y^+) + 3.9 \text{ per l'aria @ } Pr = 0.7)$$

e il flusso termico è definito come:

$$q_w = - \frac{\rho_w \cdot c_p \cdot u_\tau \cdot (T - T_w)}{T^+}$$

L'approccio alternativo qui proposto (di seguito chiamato GruMo Wall Function) è in qualche modo differente: si applicano anche in questo caso leggi di parete isoterme a problemi non isotermi, ma si definiscono nuove scale adimensionali di velocità, temperatura e distanza da parete per la zona più interna del boundary layer.

Paragonando l'approccio proposto a quello di Kays and Crawford, in cui tali scale erano definite come:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_w}} \quad T_\tau = \frac{q_w}{\rho_w \cdot c_p \cdot u_\tau} \quad y_\tau = \frac{v_w}{u_\tau}$$

ora si introducono nuove scale:

$$u_\tau^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad T_\tau^* = \frac{q_w}{\rho \cdot c_p \cdot u_\tau} \quad y_\tau^* = \frac{v}{u_\tau}$$



# LEGGI DI PARETE TERMICHE – GRUMo WALL FUNCTION

Tali scale vengono utilizzate per ottenere una distanza da parete e una temperatura adimensionali :

$$y^{+*} = \frac{y}{y_{\tau}^*} \quad T^{+*} = \frac{T - T_w}{T_{\tau}^*}$$

La formulazione risultante per il flusso termico diventa:

$$q_w = - \frac{H^* \cdot (T - T_w)}{T^{+*}}$$

Il cosiddetto “parametro di isotermità”  $\zeta$  può essere introdotto come una scala caratteristica del rapporto tra la temperatura dei gas nel boundary layer e la temperatura di parete e/o come una scala caratteristica del flusso termico (è, a tutti gli effetti, un flusso adimensionale) per capire il comportamento delle leggi di parete termiche.

$$\zeta = \frac{-T_{\tau}}{T_w} = \frac{-q_w}{\rho_w \cdot c_p \cdot u_{\tau} \cdot T_w}$$

$\zeta \rightarrow 0$



Flusso termico  $\sim 0$  ;  $T/T_w \sim 1$



Approccio Isotermo

$\zeta \neq 0$



Flusso termico  $\neq 0$  ;  $T/T_w > 1$

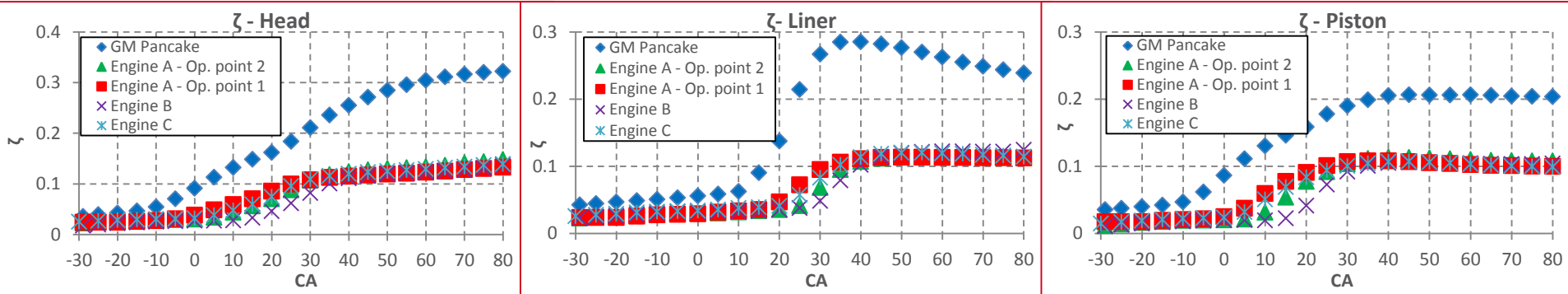


Approccio Non-Isotermo



# LEGGI DI PARETE TERMICHE – GRUMo WALL FUNCTION

Per capire perché molti dei modelli in letteratura stimano correttamente il flusso nel caso test e lo sovrastimano fortemente nei casi motoristici reali, si riporta l'evoluzione del parametro  $\zeta$  durante il ciclo



Assumendo l'idealità del gas,  $\zeta$  può essere riscritto come segue:

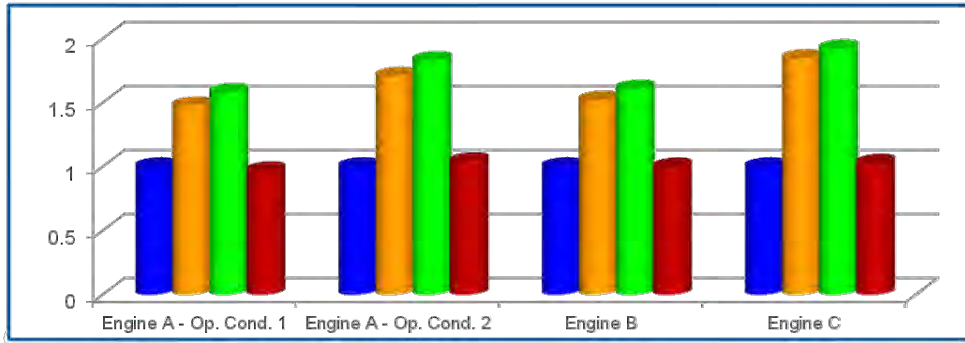
$$\zeta = \frac{-q_w}{p \cdot u_\tau \cdot \gamma / (\gamma - 1)}$$

con  $p$  la pressione nel cilindro e  $\gamma$  il rapporto tra calori specifici.

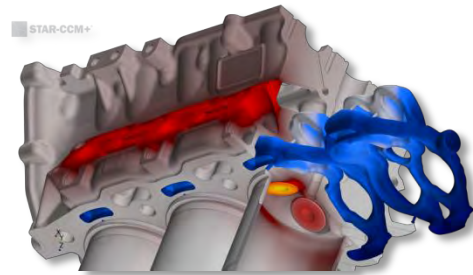
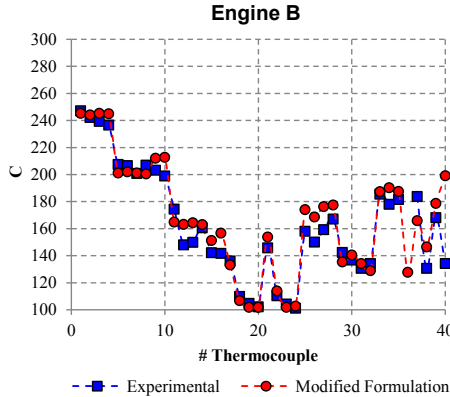
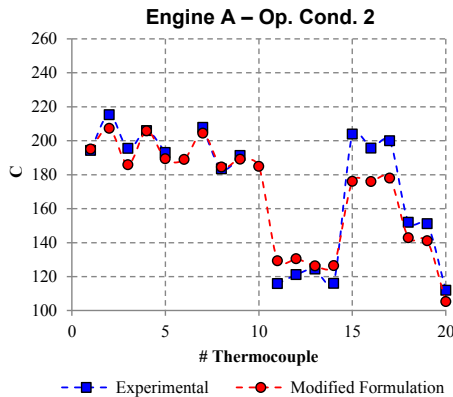
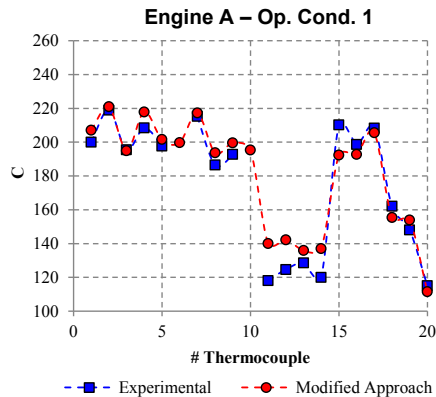
- Nei motori di produzione,  $\zeta$  è basso in virtù dei livelli di pressione e turbolenza in camera.
- Rispetto al pancake engine, i motori di produzione oggetto di indagine scambiano meno energia attraverso le pareti (in relativo!).
- I modelli di scambio termico di Angelberger o di Han & Reitz possono fornire stime corrette per alti valori di  $\zeta$ , come nel pancake, ma tendono a forti sovrastime per bassi valori di  $\zeta$

# LEGGI DI PARETE TERMICHE – GRUMo WALL FUNCTION

- La legge di parete proposta (GruMo Wall Function) stima correttamente il flusso di calore da combustione
- Questo comportamento è confermato per tutti i motori e le condizioni operative analizzate
- L'estensione della validazione della legge di parete in condizioni operative differenti (carichi medi e/o bassi, bassi regimi di rotazione) è in corso



- Target from Thermal Balance
- Average to CHT - Angelberger
- Average to CHT - Han and Reitz
- Average to CHT - Modified Formulation



- Introduzione: downsizing, downspeeding, boosting, detonazione, scambio termico
- **PARTE 1: Detonazione**
- UniMORE-PDF Knock Model
  - Modellazione CFD del fenomeno della detonazione
  - Motivazioni per lo sviluppo del modello UniMORE-PDF
  - Descrizione del modello
  - Distribuzione statistica della reattività della miscela
  - Stima dell'incidenza dei cicli detonanti
- **PARTE 2: Scambio Termico**
- UniMORE Wall Function
  - Metodologia integrata In-cylinder / CHT
  - Bilancio termico motore e stima dei flussi termici
  - Modelli in letteratura
  - Origine della UniMORE Wall Function
- **Conclusioni**

- Le nuove generazioni di motori si muovono verso potenze specifiche sempre crescenti: la resistenza alla detonazione e l'affidabilità termo-meccanica diventano criteri di progettazione sempre più importanti
- Le simulazioni CFD possono supportare la fase di progettazione a patto che esse si basino su modelli accurati, robusti e efficienti
- UniMORE è impegnata nello sviluppo di modelli "ready-to-use" sia per la detonazione che per lo scambio termico, la cui efficacia è stata dimostrata su un ampio range di motori di ricerca e di corrente produzione industriale



## References:

- [1] Breda, S., D'Adamo, A., Fontanesi, S. et al., "CFD Analysis of Combustion and Knock in an Optically Accessible GDI Engine," SAE Int. J. Engines 9(1):2016, doi:10.4271/2016-01-0601.
- [2] Fontanesi, S., d'Adamo, A., Rutland, C.J., "Large-Eddy simulation analysis of spark configuration effect on cycle-to-cycle variability of combustion and knock," International Journal of Engine Research, April 2015; Vol. 16, 3: pp. 403-418., first published on January 9, 2015.
- [3] D'Adamo, A., Breda, S., Fontanesi, S., and Cantore, G., "A RANS-Based CFD Model to Predict the Statistical Occurrence of Knock in Spark-Ignition Engines," SAE Int. J. Engines 9(1):2016, doi:10.4271/2016-01-0581.
- [4] Fox, R. O., Computational models for turbulent reacting flows, Cambridge University Press, 2000.
- [5] Linse, D., Kleemann, A., Hasse, C., "Probability density function approach coupled with detailed chemical kinetics for the prediction of knock in turbocharged direct injection spark ignition engines," Combustion and Flame 161 (2014) 997-1014.
- [6] Cicalese, G., Berni, F., and Fontanesi, S., "Integrated In-Cylinder / CHT Methodology for the Simulation of the Engine Thermal Field: An Application to High Performance Turbocharged DISI Engines," SAE Int. J. Engines 9(1):2016, doi:10.4271/2016-01-0578

*"The most that can be expected from any model is that it can supply a useful approximation to reality:  
all models are wrong, some models are useful"*