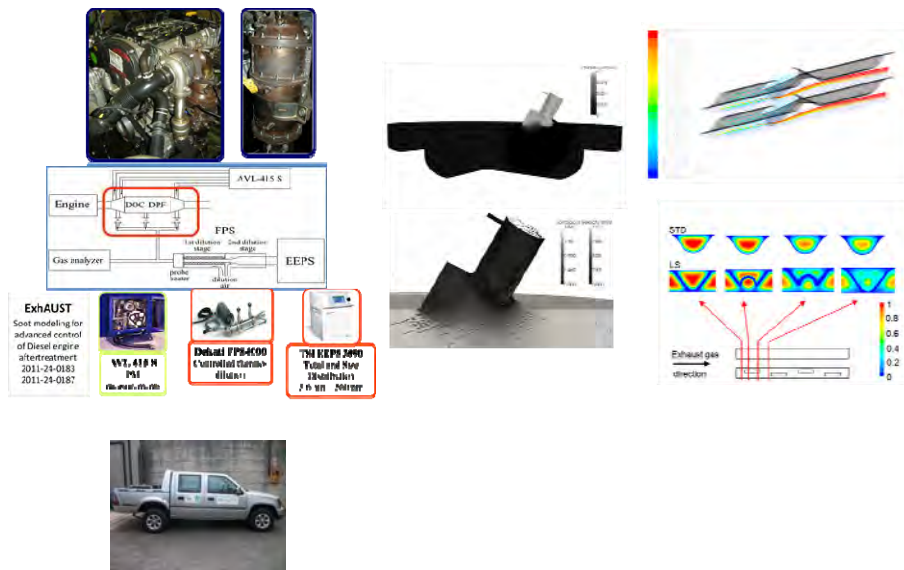


“Studio dei processi di iniezione e combustione di CNG nei motori a combustione interna”

Stefano Cordiner, Lorenzo Bartolucci, Vincenzo Mulone, Vittorio Rocco.
Dipartimento di Ingegneria Industriale
Università di Roma “Tor Vergata”;

Attività di Ricerca sui motori a combustione interna

- Tecnologie per la mobilità sostenibile:
 - Sistemi avanzati di post-trattamento delle emissioni per motori ad accensione comandata e ad accensione per compressione
 - Utilizzo di Biocombustibili nei motori a combustione interna
 - Motori alimentati a gas naturale e sistemi avanzati di combustione per MCI
 - Concetti innovativi di motorizzazione ibrida



- I motori alimentati a gas naturale a carica ultra-magra
- Obiettivi dell'analisi numerica
- Verifica sperimentale
- Analisi dei parametri di influenza
- Esempi di applicazione ai motori

Background: Motori a dosatura ultramagra

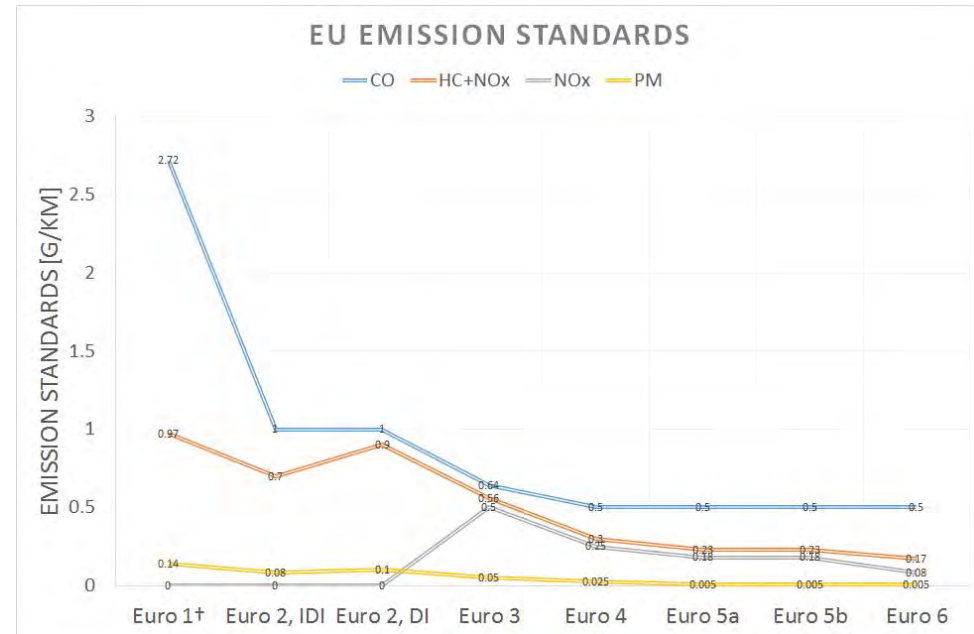
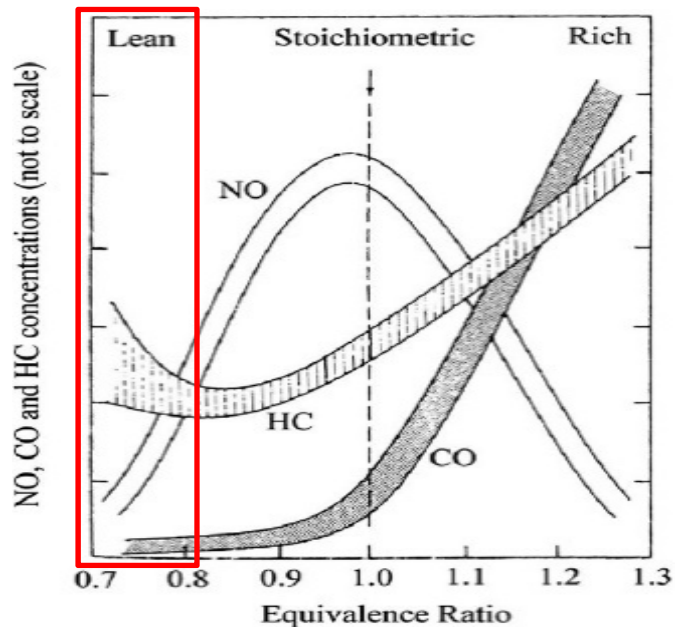
EU Emission Standards

Euro 3 → Euro 6

NO_x :

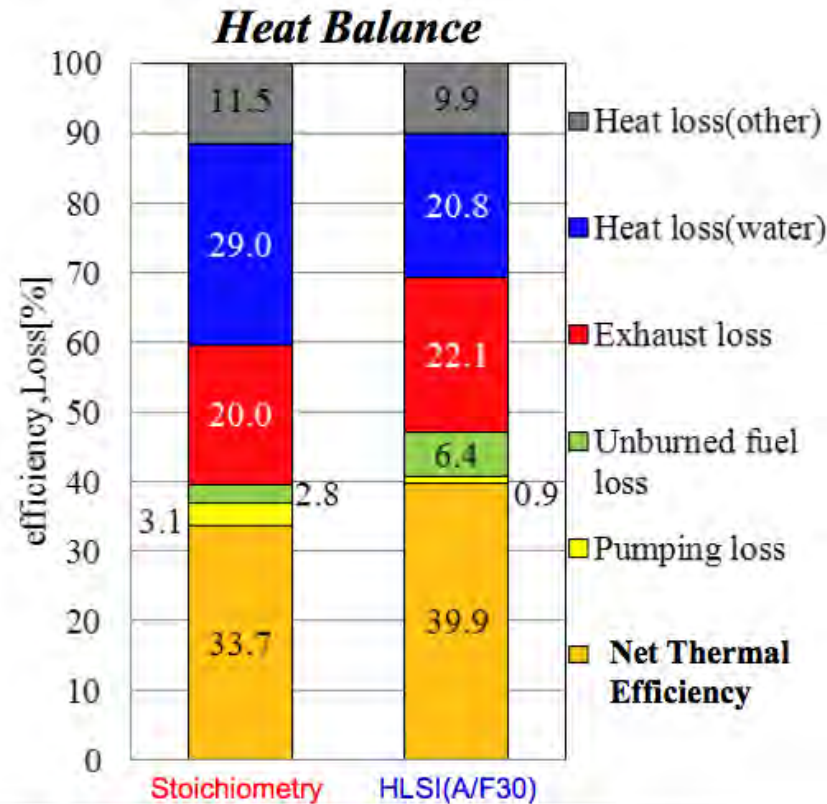
0.5 g/km → 0.08 g/km
(for Diesel fueled engine)

0.15 g/km → 0.06 g/km
(for Gasoline fueled engine)



Miscele stechiometriche → Miscele magre

- Riduzione sensibile delle emission di NO_x per le minori temperature
- Riduzione delle perdite termiche
- Riduzione delle perdite di pompaggio



Honda: high-efficiency low-emission
Homogeneous Lean Charge Spark Ignition (HLSI)

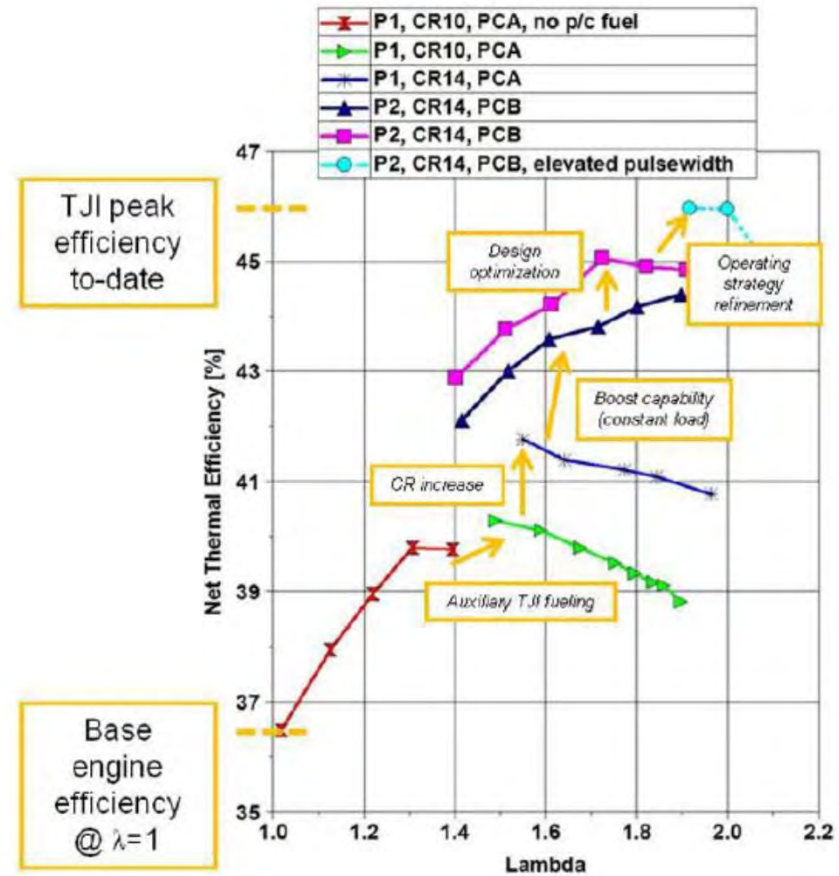


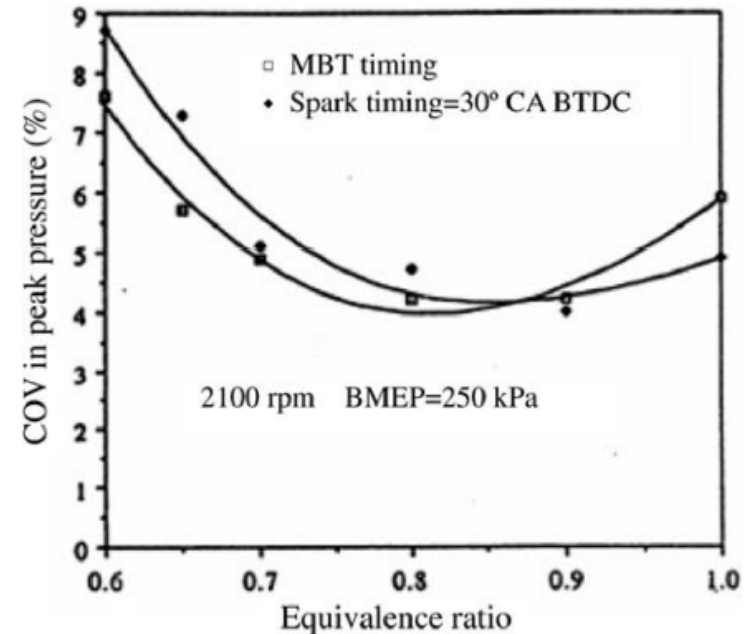
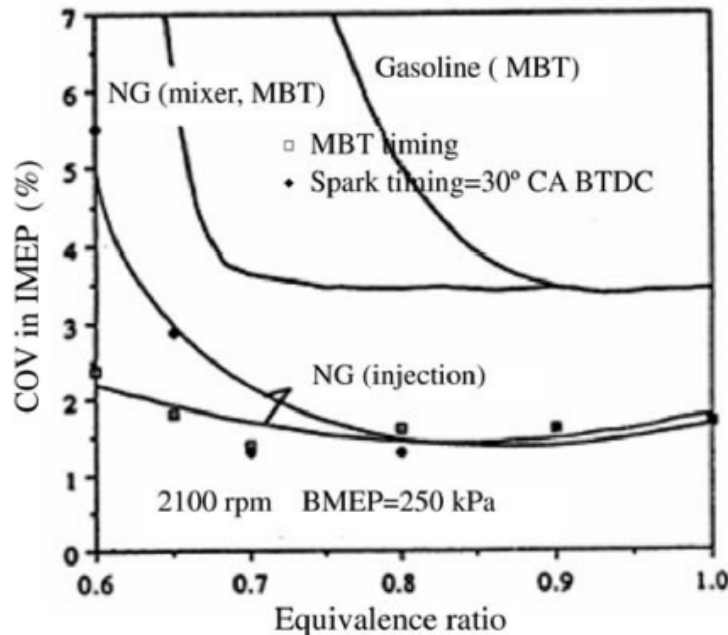
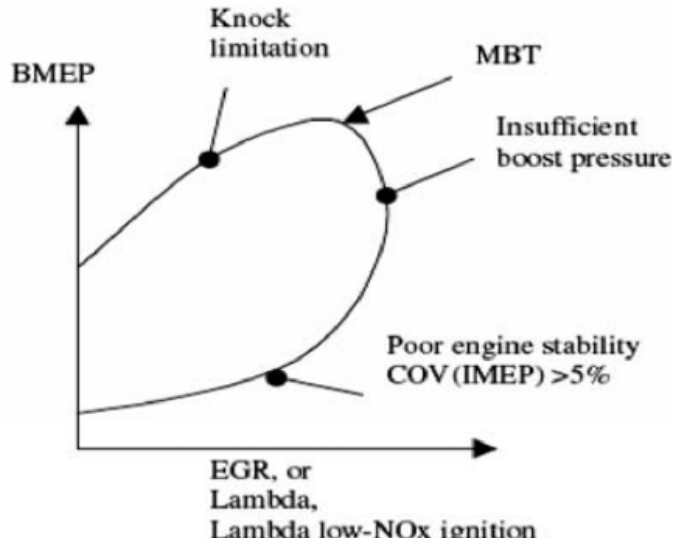
FIGURE 1. NTE vs. λ , 2,500 rpm, 47 kg/hr Air Flow (Phase 1), 11.7 bar IMEPg (Phase 2)

FY2014 ASME Advanced Combustion Engine R&D Annual Report

Problematiche specifiche:

Miscela stechiometriche → Miscela magre

- Riduzione della PME
- Maggiore variabilità ciclica di PMI e pressione massima
- L'iniezione di gas naturale consente di ridurre la variabilità ciclica rispetto alla benzina



CHO, Haeng Muk; HE, Bang-Quan. Spark ignition natural gas engines—A review. Energy Conversion and Management, 2007, 48.2: 608-618.

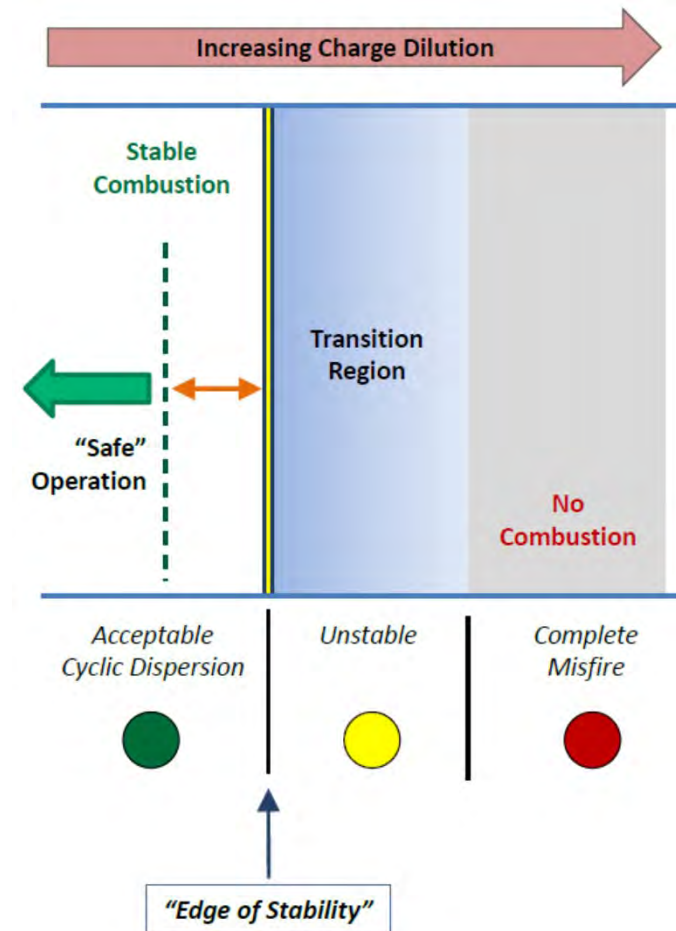
Proprietà fisiche del metano

Densità (kg/Nm^3)	0.72
Campo di infiammabilità (% vol in aria)	5-15
Temperatura di autoaccensione ($^{\circ}C$)	450
Temperatura massima di combustione ($^{\circ}C$)	1884
Potere calorifico inferiore H_i (MJ/kg)	44.7
Numero di ottano (NOR)	125
Rapporto di dosatura stechiometrico	16.8
Temperatura di ebollizione ($^{\circ}C$)	-162

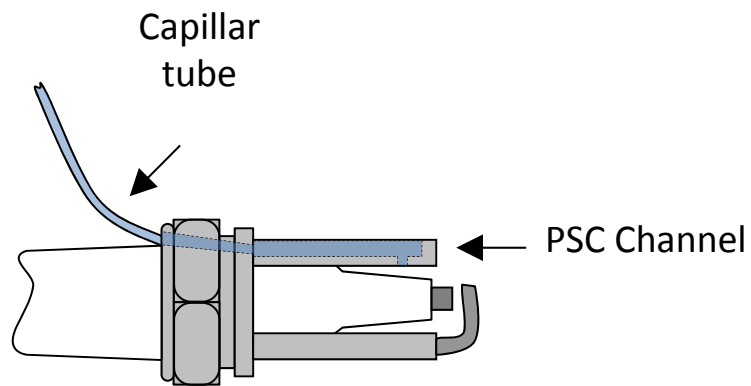
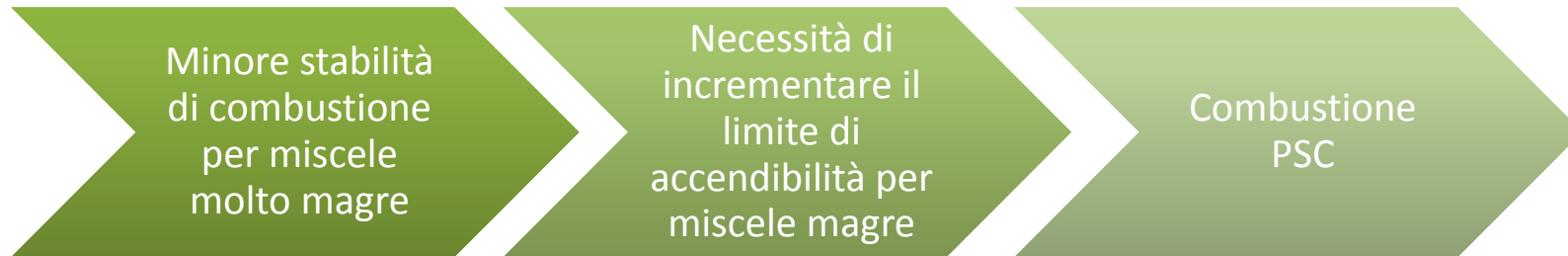
- **Potenzialità**
 - elevati rapporti di compressione
 - miscele molto magre
 - riduzione della variabilità ciclica

Problematiche specifiche

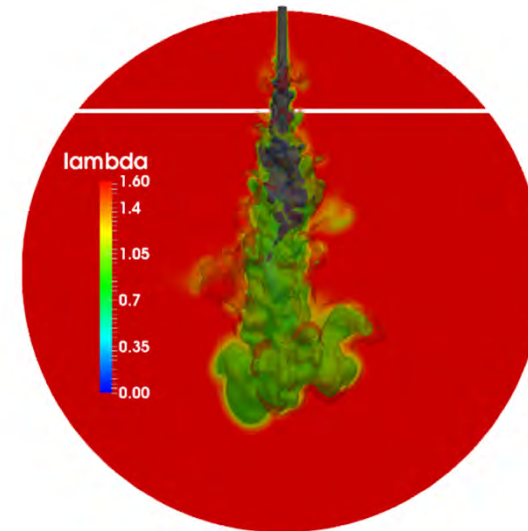
- Capacità di previsione e controllo per la stabilizzazione forzata di condizioni di funzionamento naturalmente instabili;
 - presupposto per lo sviluppo di diverse metodologie di combustione avanzata (HCCI, RCCI);
 - consente di recuperare efficienza rispetto all'approccio corrente che si mette in condizioni di sicurezza rispetto al limite per assorbire fluttuazioni casuali
 - instabilità provocata da effetti casuali (fluttuazioni nel cilindro) e deterministici (variazioni cicliche) e sbilanciamento tra i cilindri



Partially Stratified Charge (PSC) combustion



PSC Spark Plug^[*]

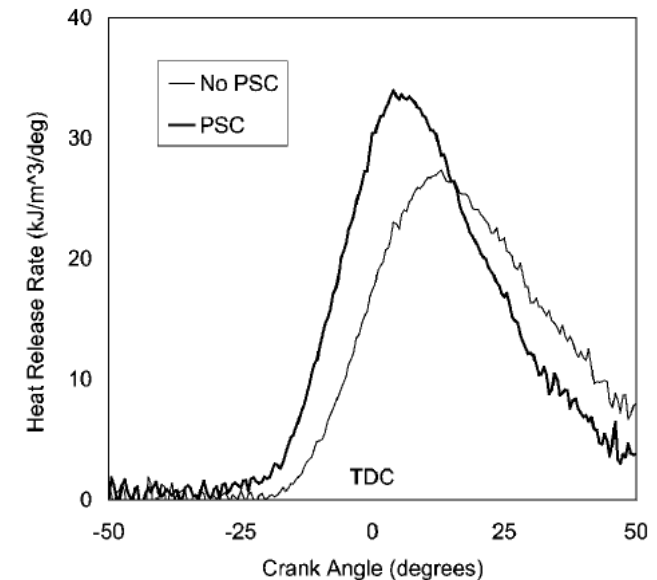
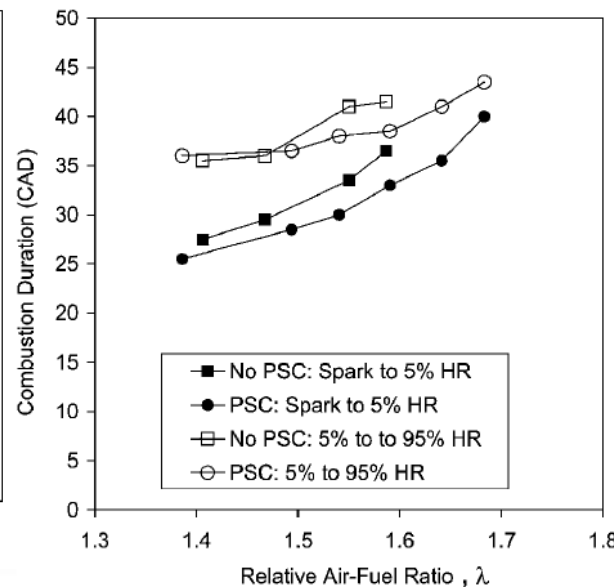
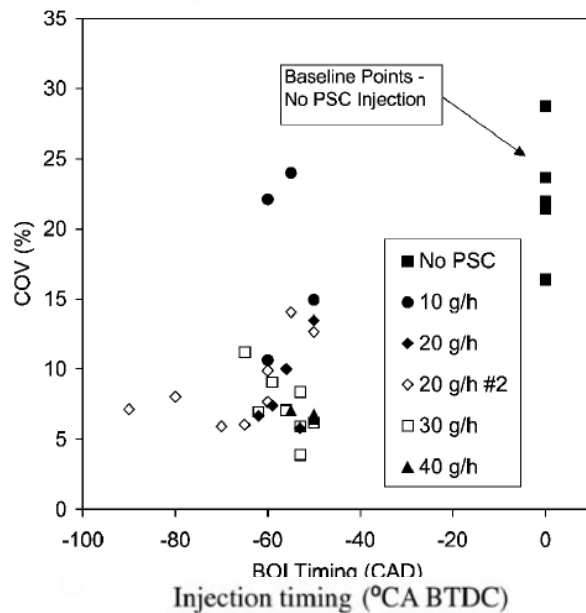
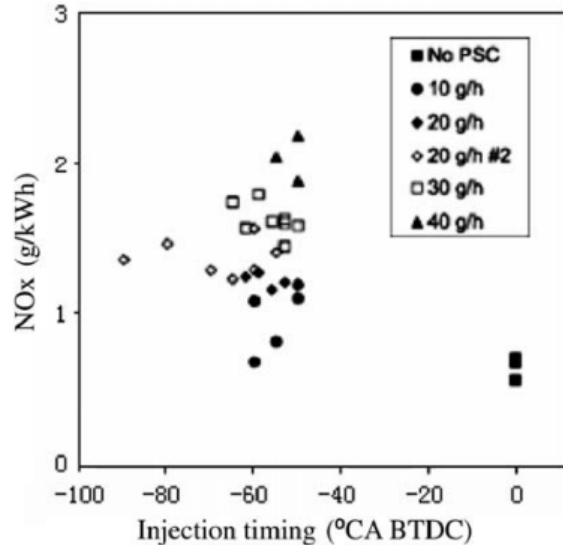


*R.L. Evans. "US Patent 6032640", 2000

La combustione stratificata

Partially Stratified Charge Combustion

- Permette di operare con lo stesso rapporto di dosatura anche se provoca un leggero incremento delle emissioni di Nox
- Consente di ridurre notevolmente la variabilità ciclica.
- Riduce la durata della combustione



Gli obiettivi dell'analisi numerica

Simulazione del processo di iniezione

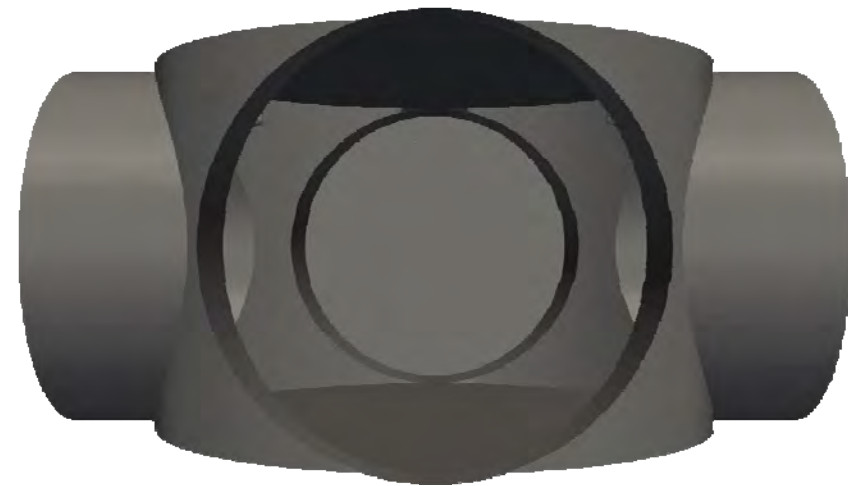
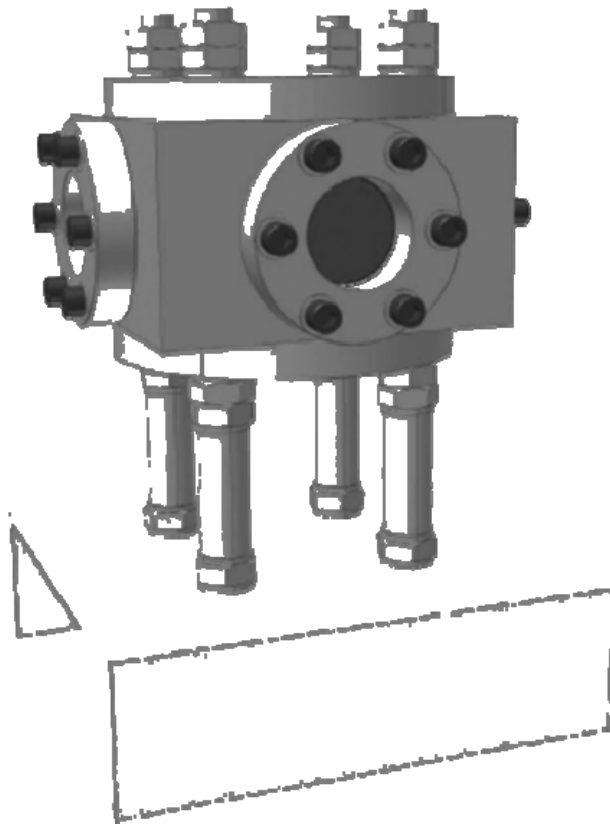
- Fornire una rappresentazione attendibile e dettagliata della stratificazione della miscela

Simulazione della Combustione

- Valutare la capacità del modello numerico di fornire una adeguata descrizione del processo di combustione omogeneo e stratificato PSC per diversi valori del rapporto di dosatura.
- Analizzare gli effetti dell'istante di accensione sulla propagazione del fronte di fiamma.
- Fornire gli elementi per una analisi della interazione fiamma-turbolenza per una migliore comprensione dei fenomeni e quindi per il loro controllo.

Apparato sperimentale

- Camera di combustione a volume costante realizzata alla *University of British Columbia*^[*]
- Dotata di 4 accessi ottici per la visualizzazione degli eventi di combustione ed iniezione
- Campagna sperimentale su iniezioni, combustioni omogenee e a carica parzialmente stratificata (*PSC*)
- Acquisizione con sistema *Schlieren* ad elevata velocità



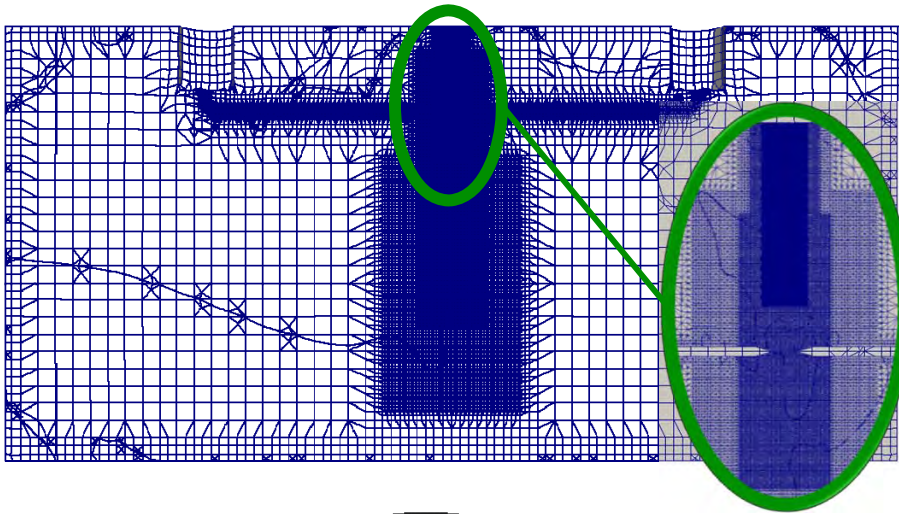
*. Edward C.Chan, "Spark Ignition of Partially Stratified Gaseous Fuel-Air Mixtures." *PhD Thesis*, The University of British Columbia, October 2010.

Open  FOAM

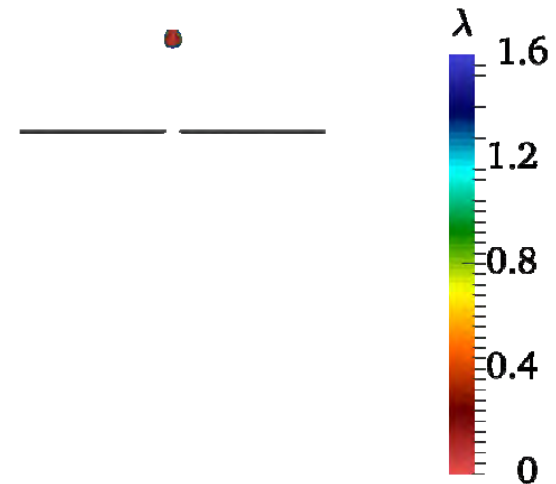
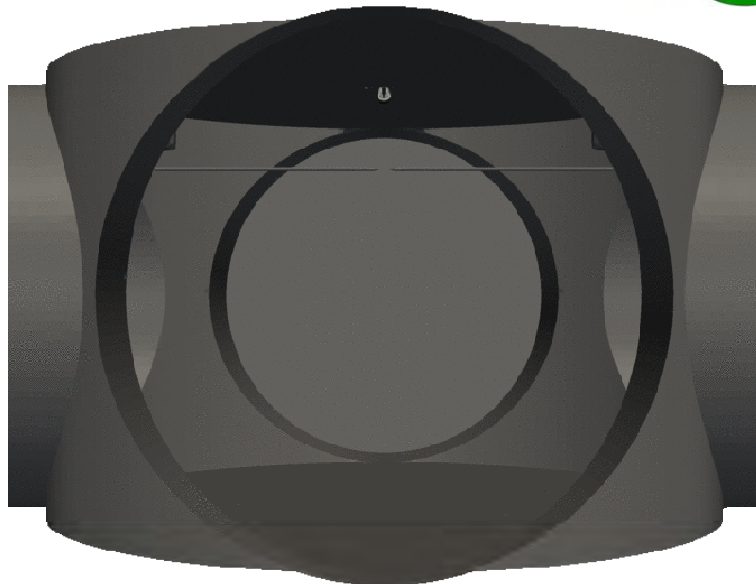
 *ParaView*

Processo	Iniezione	Combustione
Solutore	myReactingFoam	myReactingFoamSources
Algoritmo	PIMPLE	
Tipologia di modello per la turbolenza	Large Eddy Simulation	
Modello per le scale di sottogriglia	Analisi comparativa: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Smagorinsky ▪ homoDynSmagorinsky ▪ dynamicSmagorinsky ▪ OneEqEddy 	OneEqEddy
Modello di combustione	—	PaSR

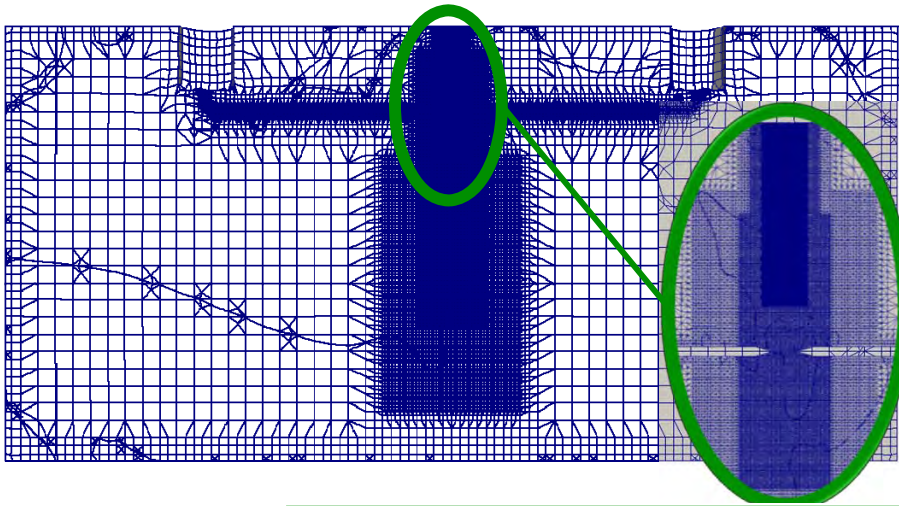
Analisi dell'iniezione



Numero celle	3,391,161
Spaziatura minima	$3.125 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$
Spaziatura massima	1 mm
Numero di livelli di <i>refinement</i>	6
Numero facce Inlet	256



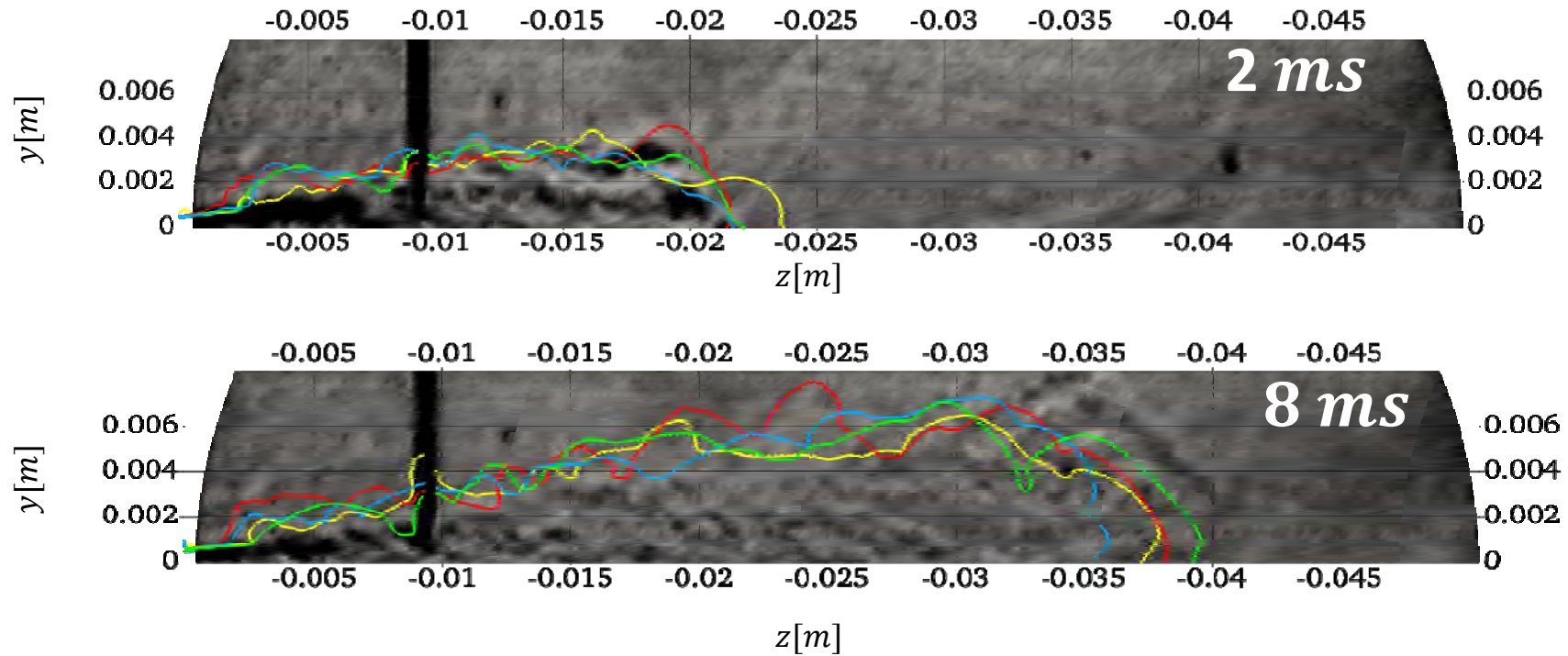
Analisi dell'iniezione



Numero celle	3,391,161
Spaziatura minima	$3.125 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$
Spaziatura massima	1 mm
Numero di livelli di <i>refinement</i>	6
Numero facce Inlet	256

Pressione della camera	$7 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
Massa iniettata (media)	0.35 mg
Durata iniezione	10 ms
Percentuale massa iniettata rispetto alla totale	$\lambda = 1.2 \rightarrow 0.257\%$ $\lambda = 1.4 \rightarrow 0.297\%$ $\lambda = 1.6 \rightarrow 0.336\%$ $\lambda = 1.8 \rightarrow 0.375\%$ $\lambda = 2.0 \rightarrow 0.415\%$

Evoluzione del getto

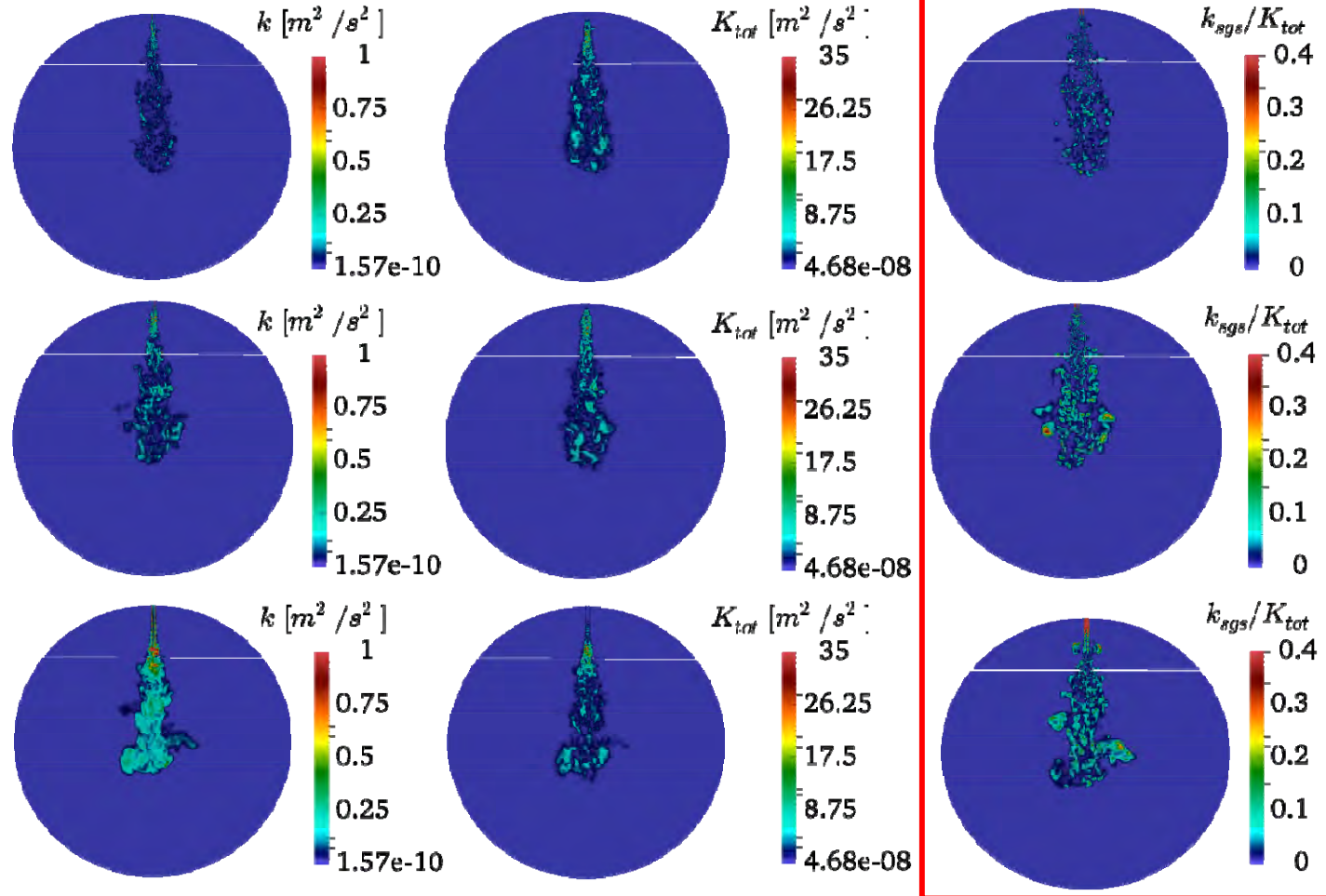


Risoluzione LES

5 ms

ASOI

Smagorinsky



Analisi della combustione

Modello di accensione

- Implementazione di un profilo realistico di cessione di energia al kernel

Confronto con i risultati sperimentali

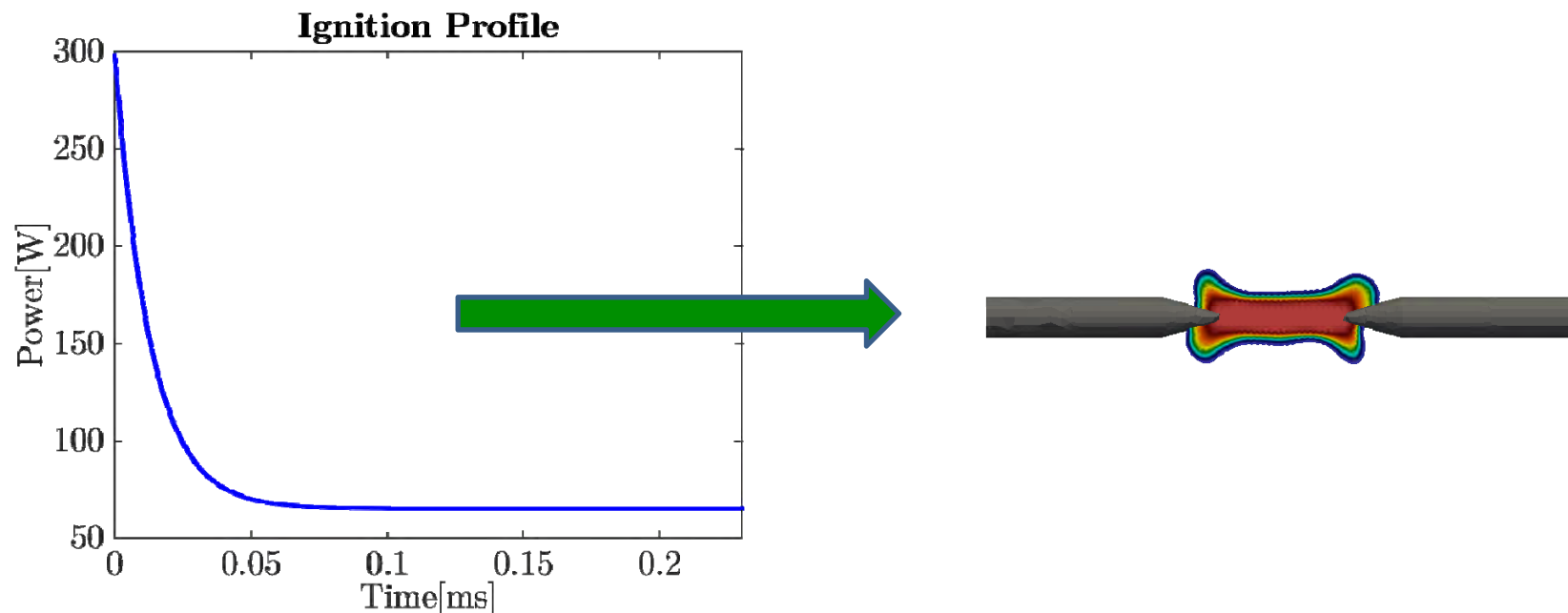
- Condizioni di combustione omogenea e stratificata

Combustione turbolenta

- Analisi dell'influenza dei moti turbolenti sulla propagazione del fronte di fiamma

Simulazione accensione CDI

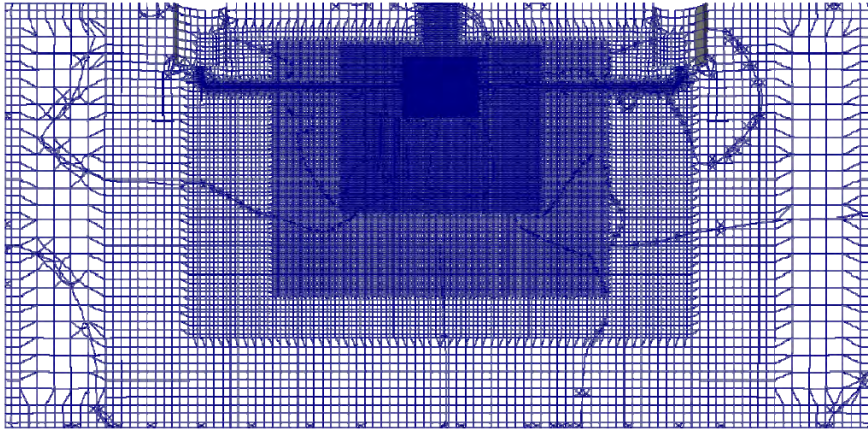
CDI 3 mJ 100 μ s + sovrapposizione di un arco di 15 mJ per 230 μ s



Maly R., Vogel M., Initiation and propagation of Flame Fronts in Lean CH₄ lean mixtures by the three modes of the ignition spark, Seventeenth Symposium (International) on Combustion, 1979

Herweg R., Maly R., A Fundamental Model for Flame Kernel Formation in S. I. Engines, SAE Paper 922243, 1992

Analisi della combustione



Numero celle	10,597,930
Spaziatura minima	$6.25 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$
Spaziatura massima	1 mm
Numero di livelli di <i>refinement</i>	5

Piano delle simulazioni

λ	No PSC	PSC
1.2	■	■
1.4	■	
1.6	■	■
1.8	Misfire	■
2.0	Misfire	■

Combustione omogenea

$\lambda = 1.2$

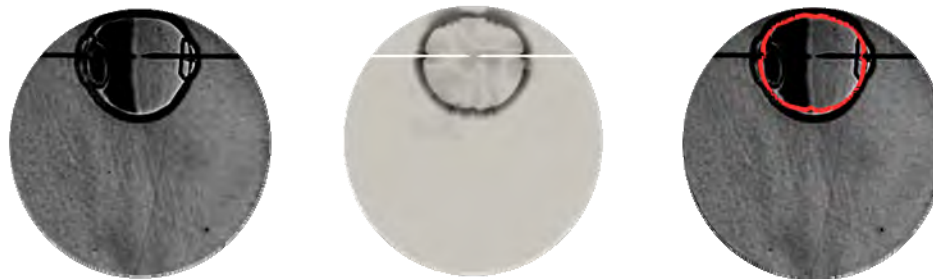
2 ms AS



5 ms AS



10 ms AS



Combustione omogenea

$\lambda = 1.4$

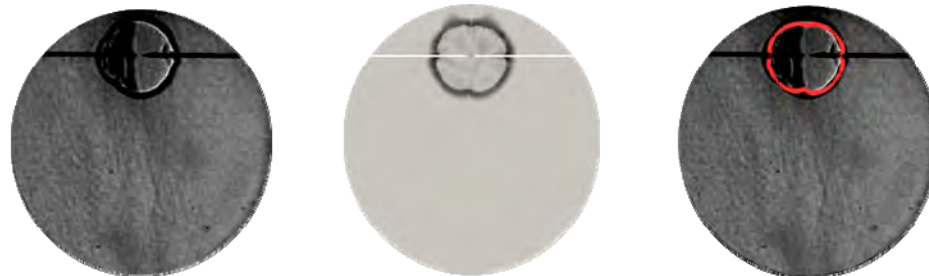
2 ms AS



5 ms AS



10 ms AS



Combustione omogenea

$\lambda = 1.6$

2 ms AS



5 ms AS



10 ms AS



Combustione Omogenea

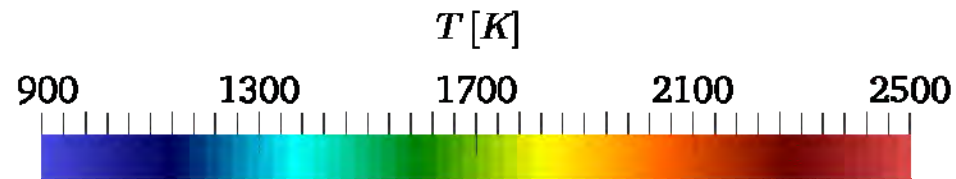
Misfire with fuel volume concentration lower than 5%*

$$\lambda = 1.8$$

$$\lambda = 2.0$$



0.0 ms AS



* Kuo, K., "Principles of combustion". Wiley-Interscience, 2005

Combustione Stratificata PSC

$\lambda = 1.2$

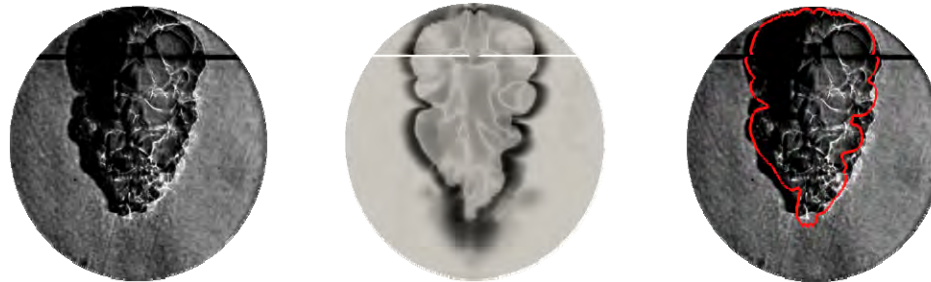
2 ms AS



5 ms AS



10 ms AS



Combustione Stratificata PSC

$\lambda = 1.6$

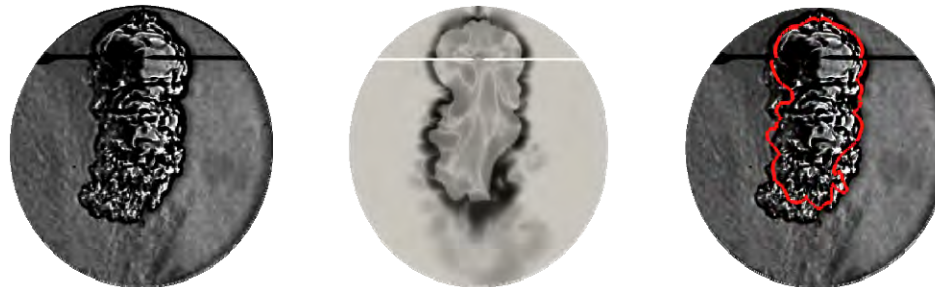
2 ms AS



5 ms AS



10 ms AS



Combustione Stratificata PSC

$\lambda = 1.8$

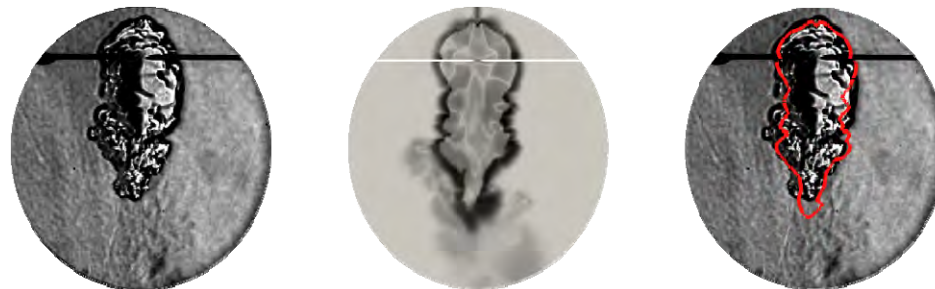
2 ms AS



5 ms AS



10 ms AS



Combustione Stratificata PSC

$\lambda = 2.0$

2 ms AS



5 ms AS

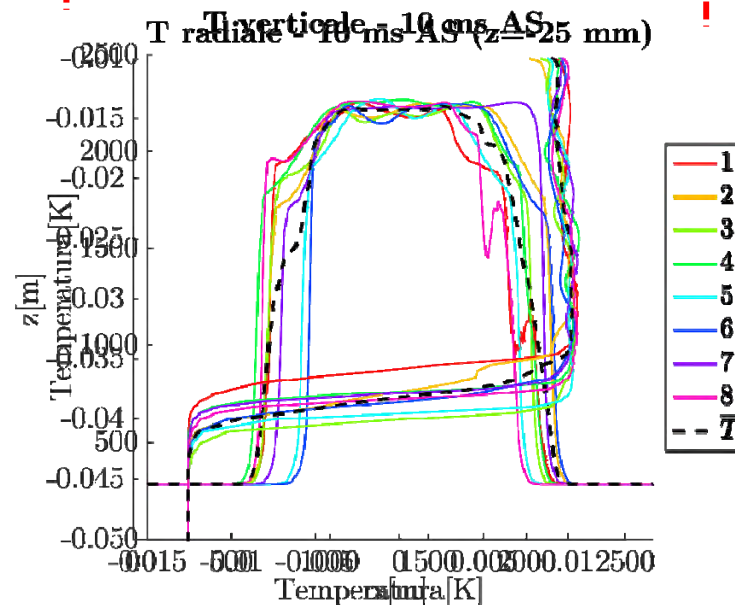
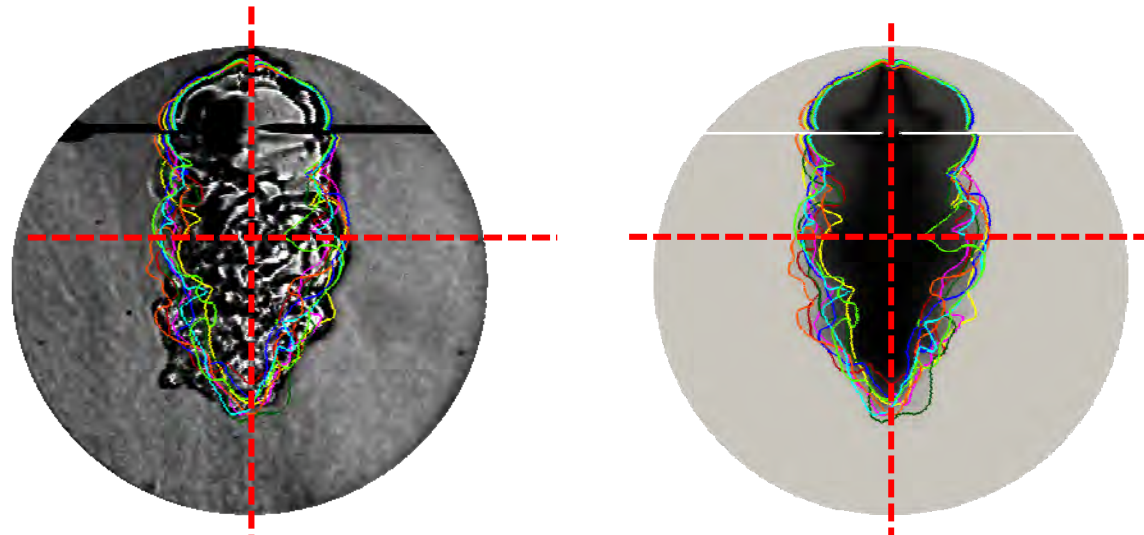


10 ms AS



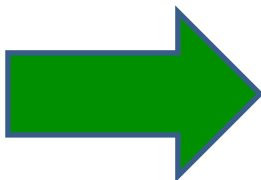
Analisi statistica della combustione

10 ms AS



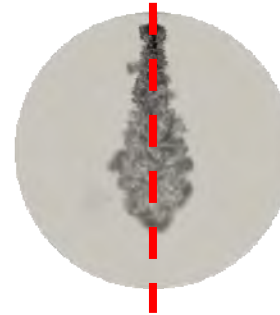
Risultati preliminari

- Ottima capacità di descrizione dei sperimentali
- Nessuna necessità di modifica di parametri di tuning
- Buona descrizione sia in condizioni di moto laminare che turbolento

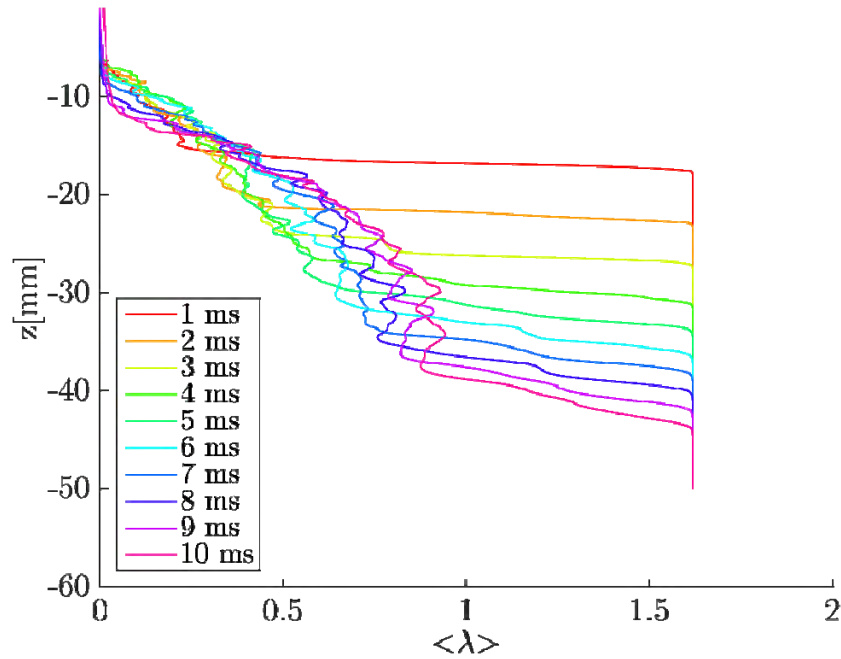


- Possibile utilizzo della simulazione come strumento di progettazione
- Esempio: studio delle condizioni ottimali di accensione

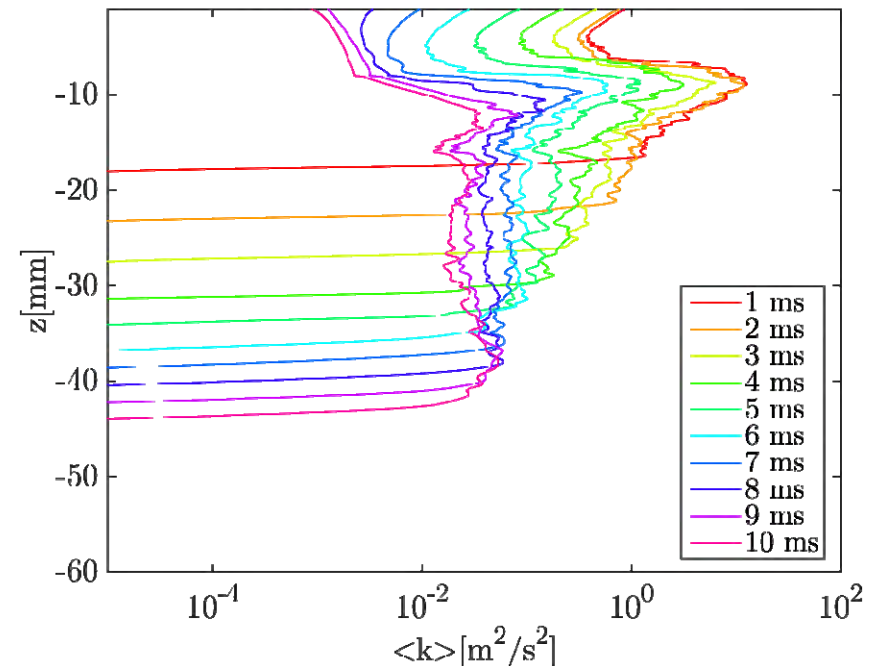
Condizioni durante l'iniezione



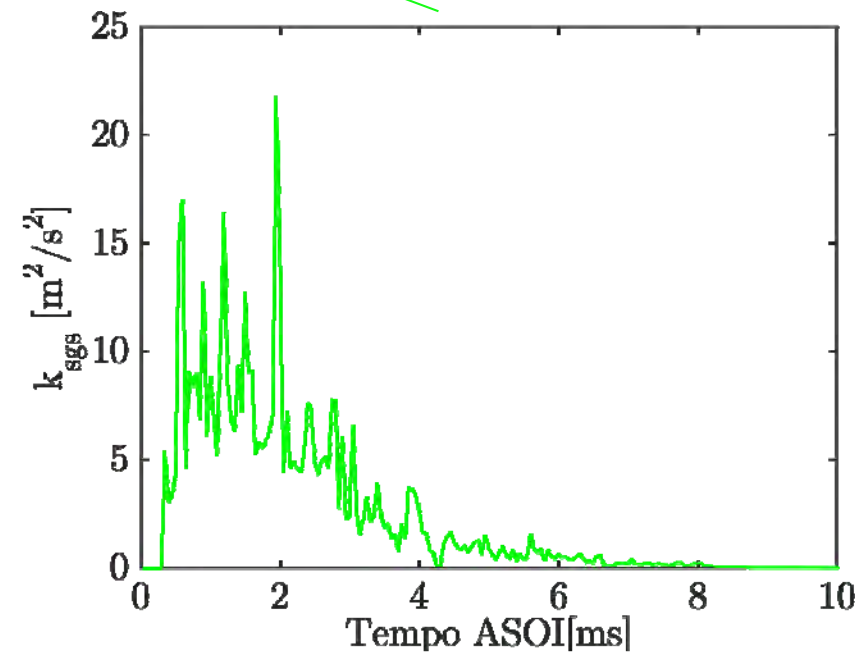
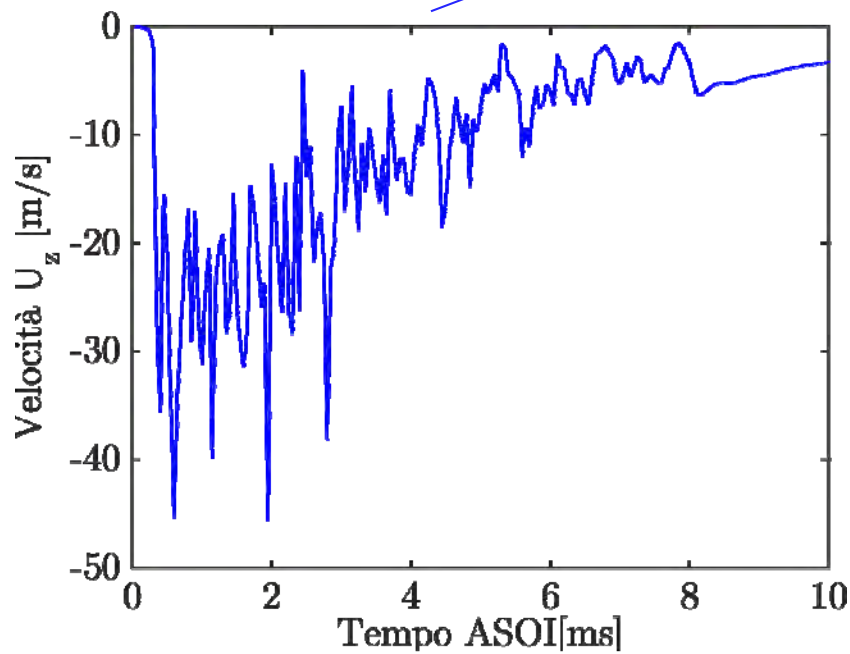
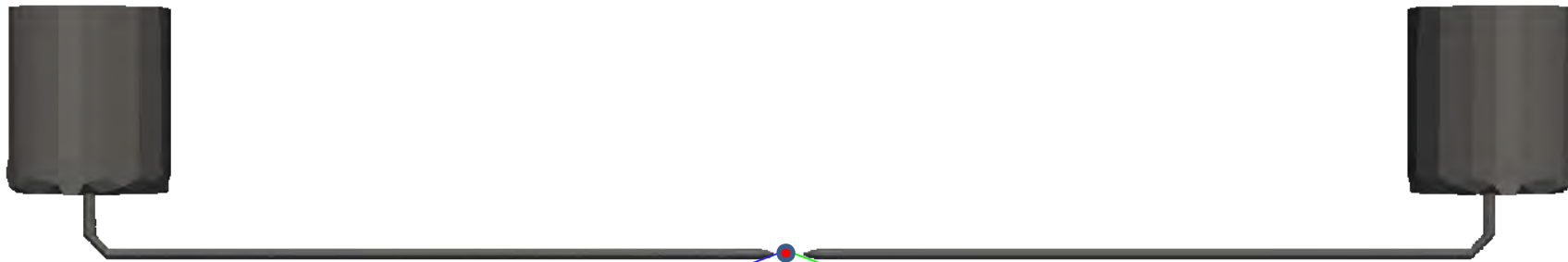
Distribuzione di $\langle \lambda \rangle$ verticale



Distribuzione di $\langle k \rangle$ verticale

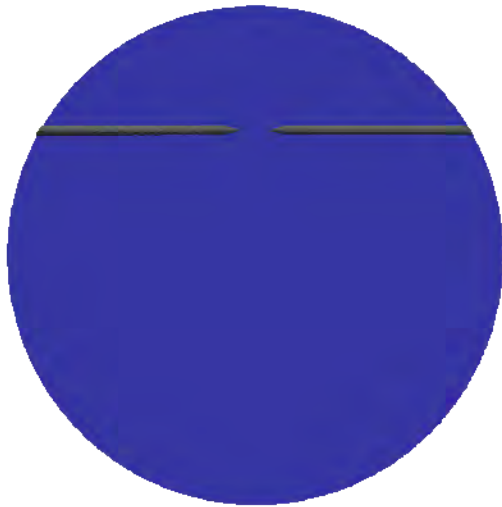


Ricerca del timing ottimale di accensione

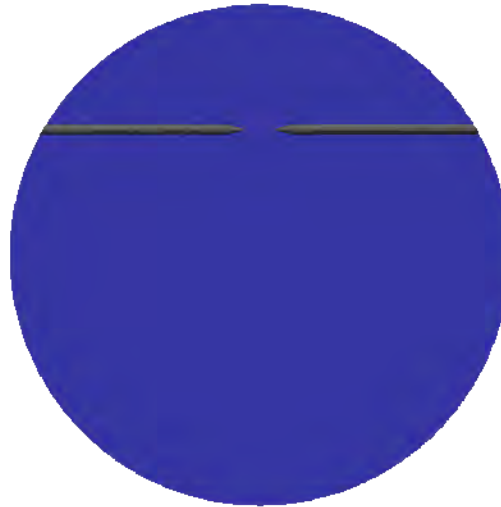


Misfire fino a 4 ms ASOI

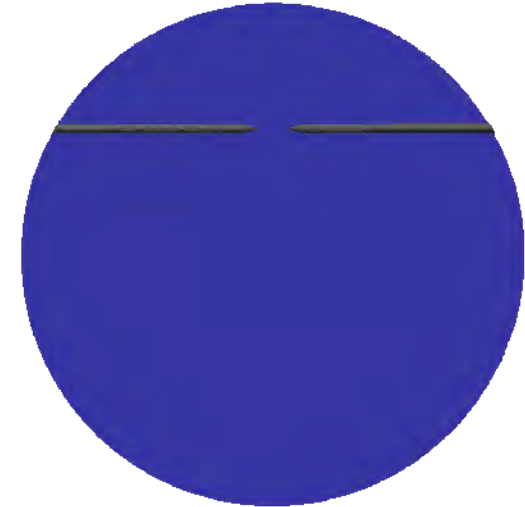
2 ms ASOI



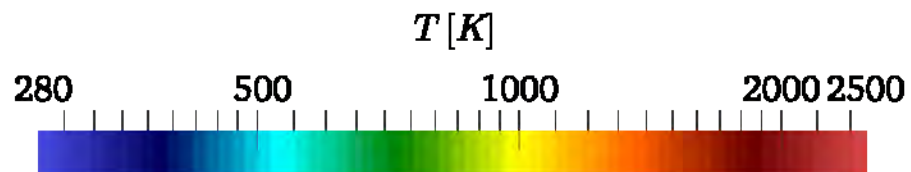
3 ms ASOI



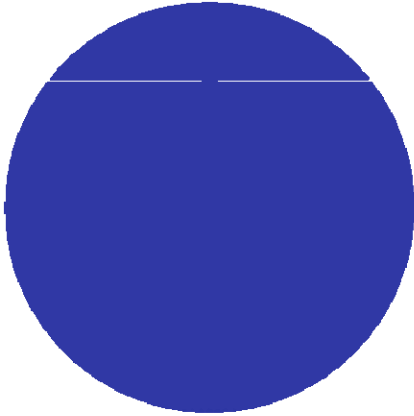
4 ms ASOI



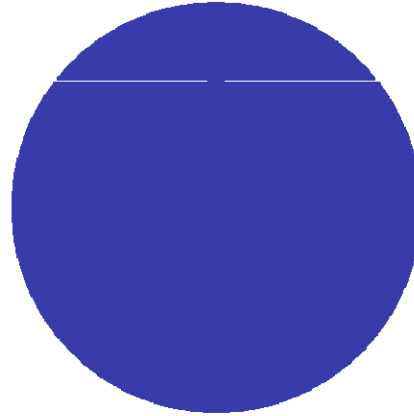
0.0 ms AS



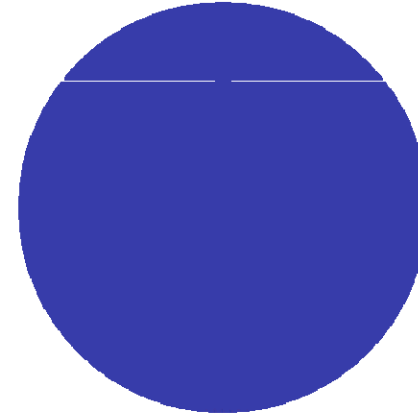
5 ms ASOI



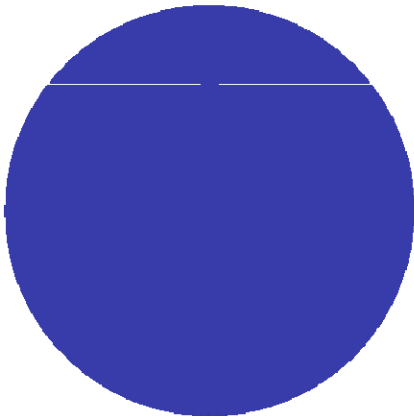
6 ms ASOI



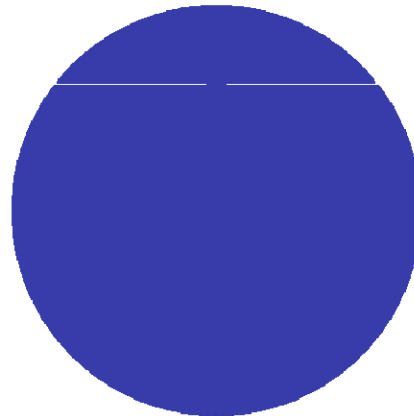
7 ms ASOI



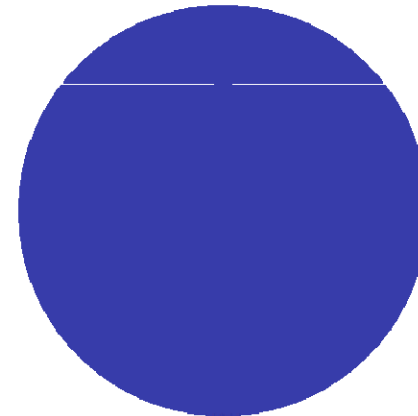
8 ms ASOI



9 ms ASOI

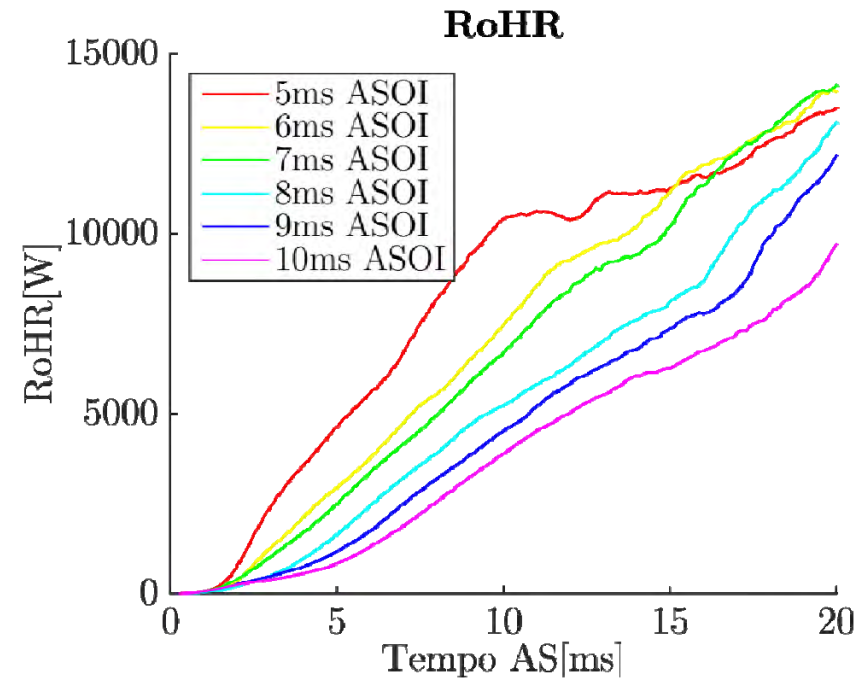
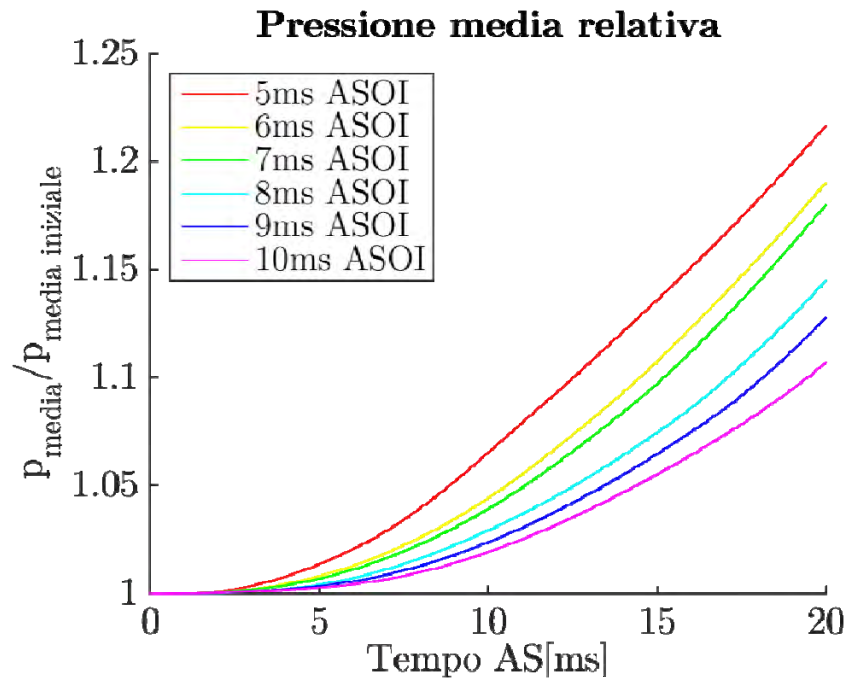


10 ms ASOI

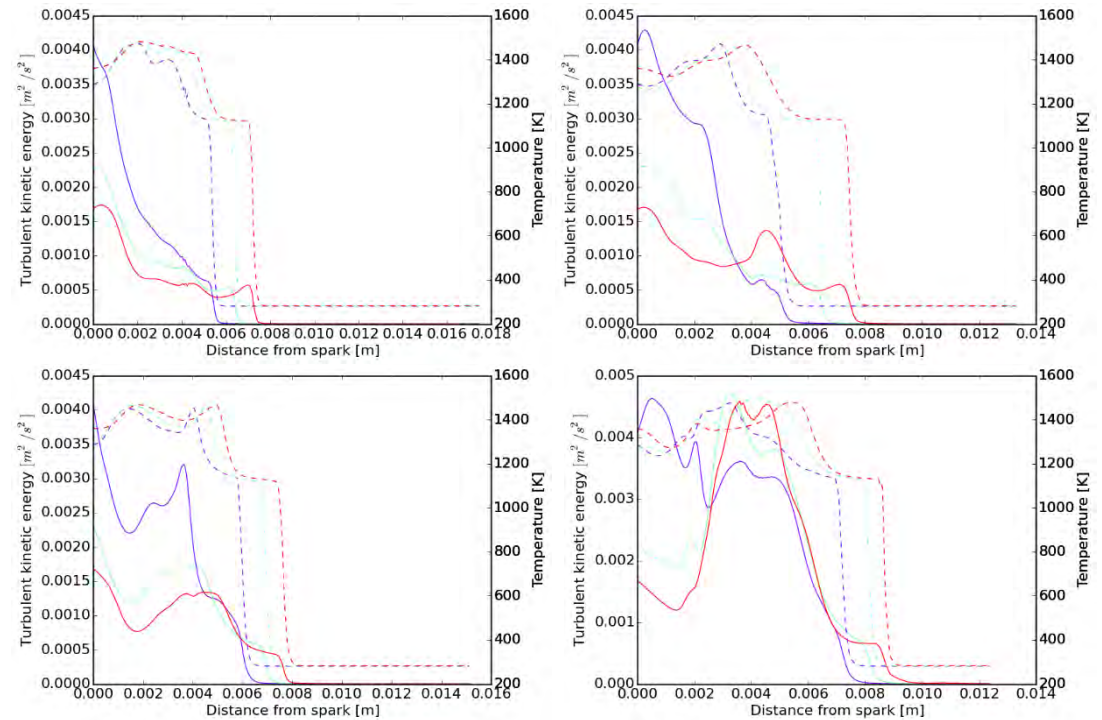
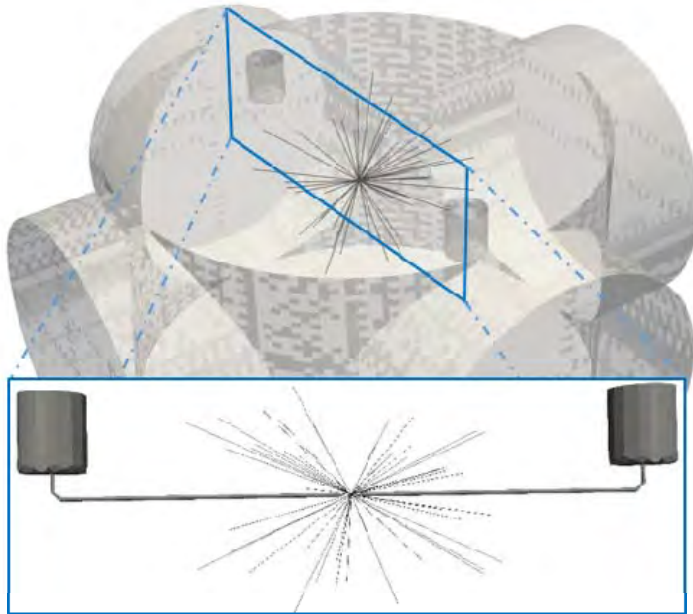


0.0 ms AS

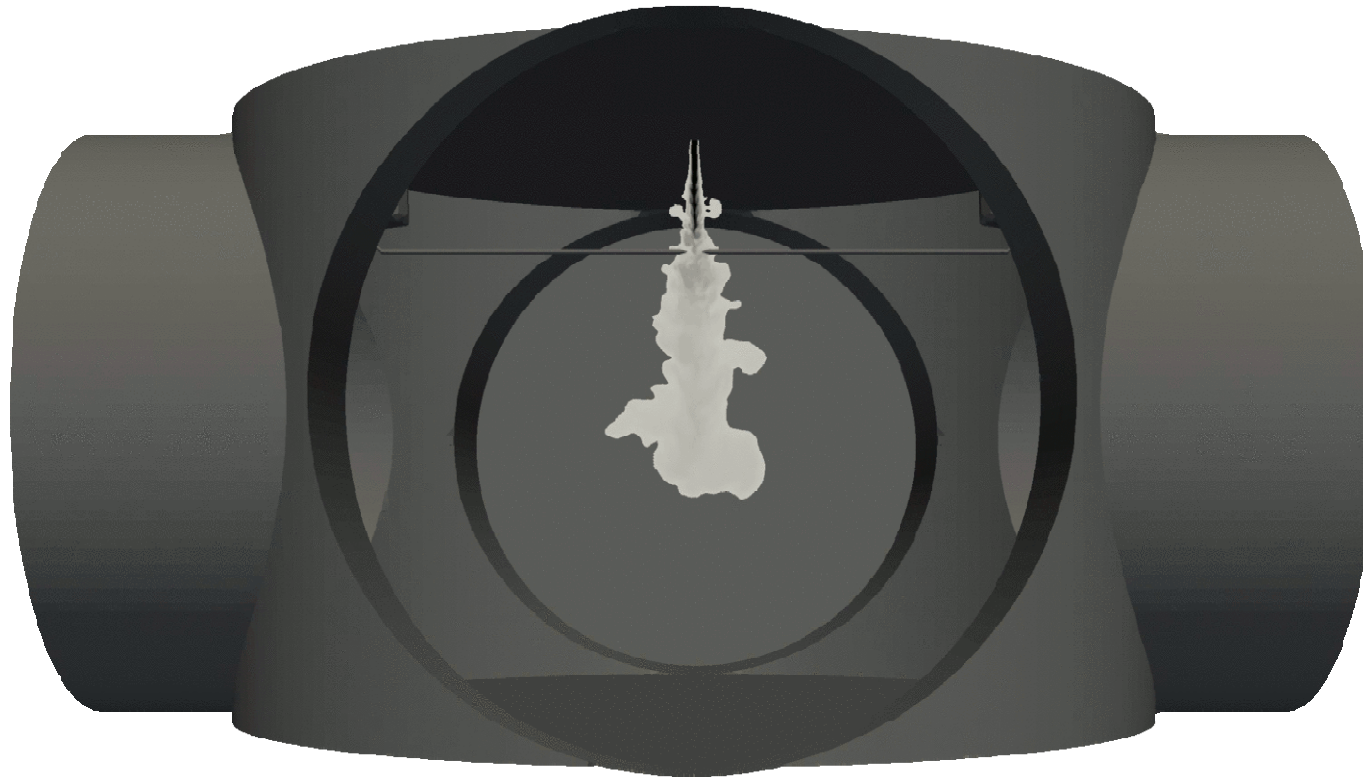
Grandezze medie al variare del timing



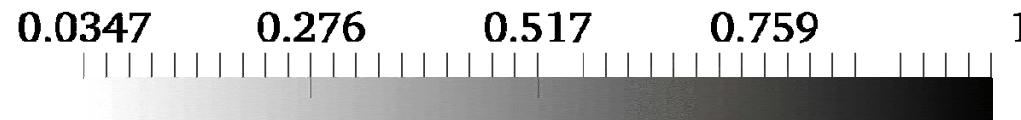
Turbulence – Flame interaction



Interazione tra getto e fronte di fiamma



CH_4



0.0 ms AS

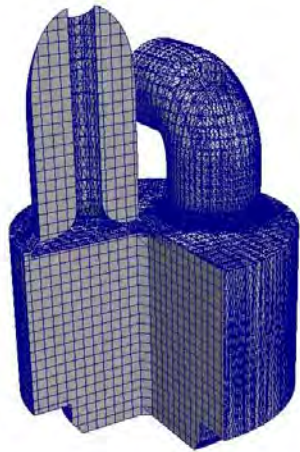
Dipartimento di Ingegneria Industriale

- Validazione dell'approccio numerico in condizioni motoristiche ed utilizzando dati sperimentali:
- Analisi delle condizioni di funzionamento e studio dell'influenza dei principali parametri di controllo
- Confrontare diverse strategie di controllo del processo di combustione stratificata



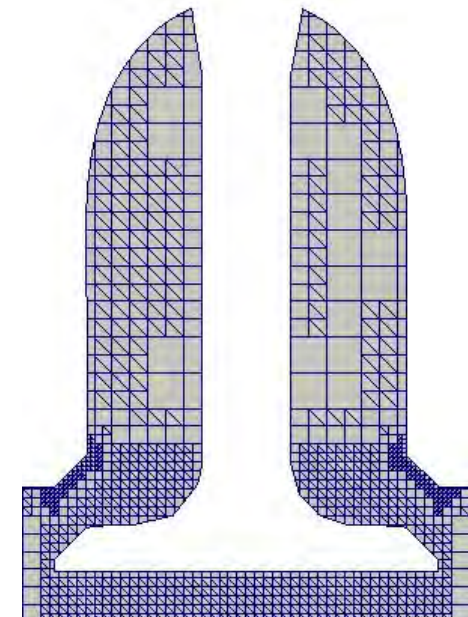
Griglia cartesiana  "Cut cell method"

Base grid

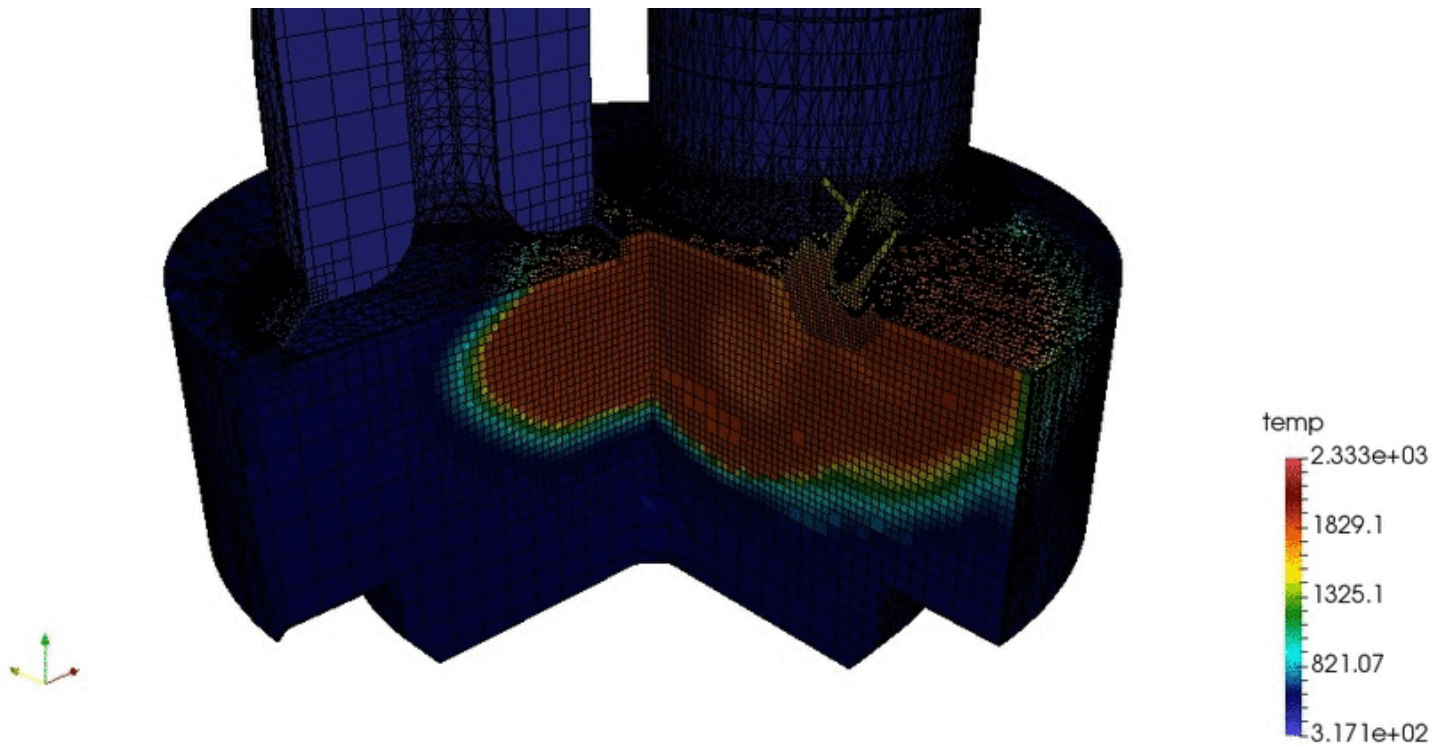


Fixed embedding

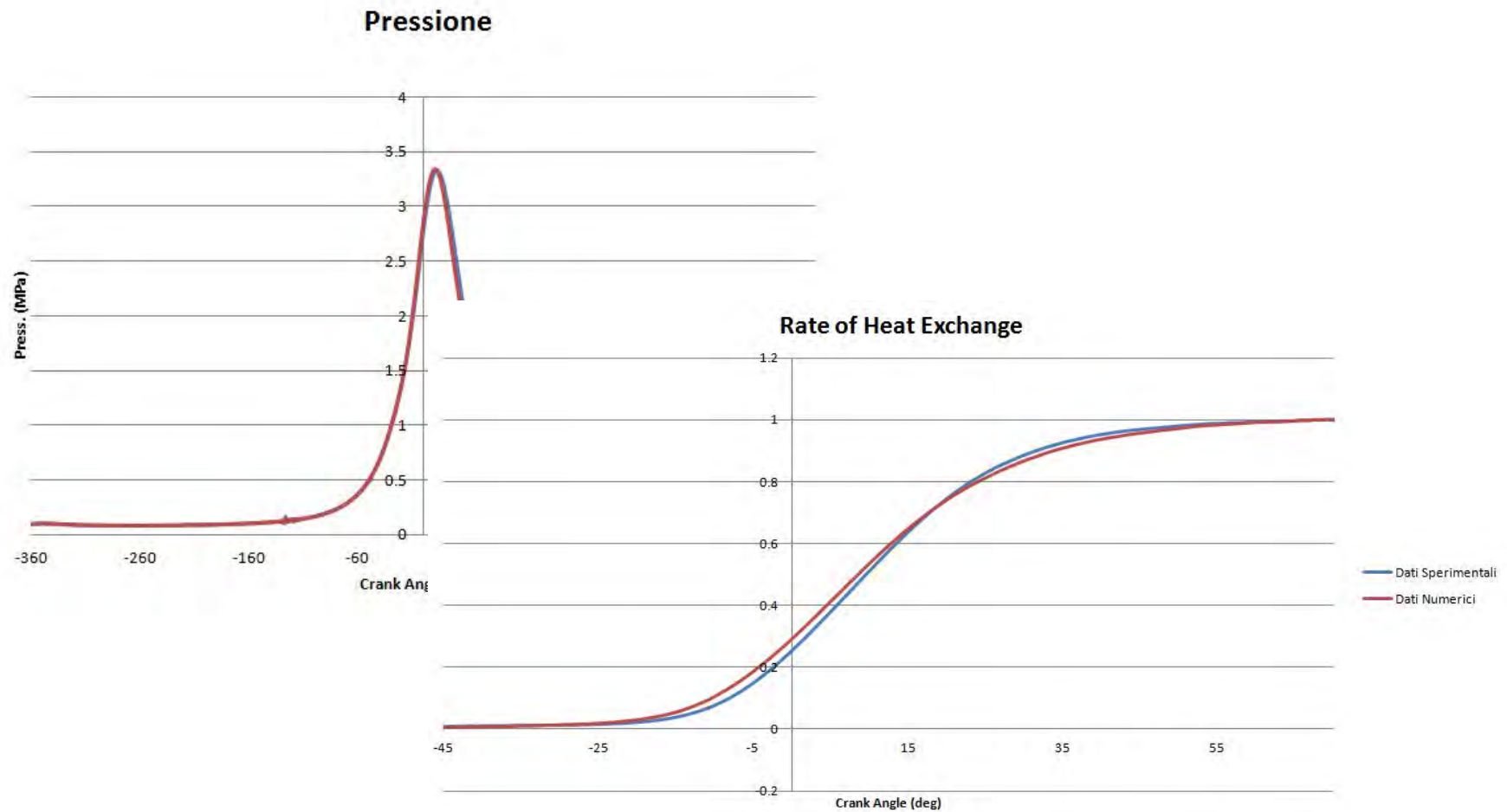
- Sphere
- Cylindric
- Boundary



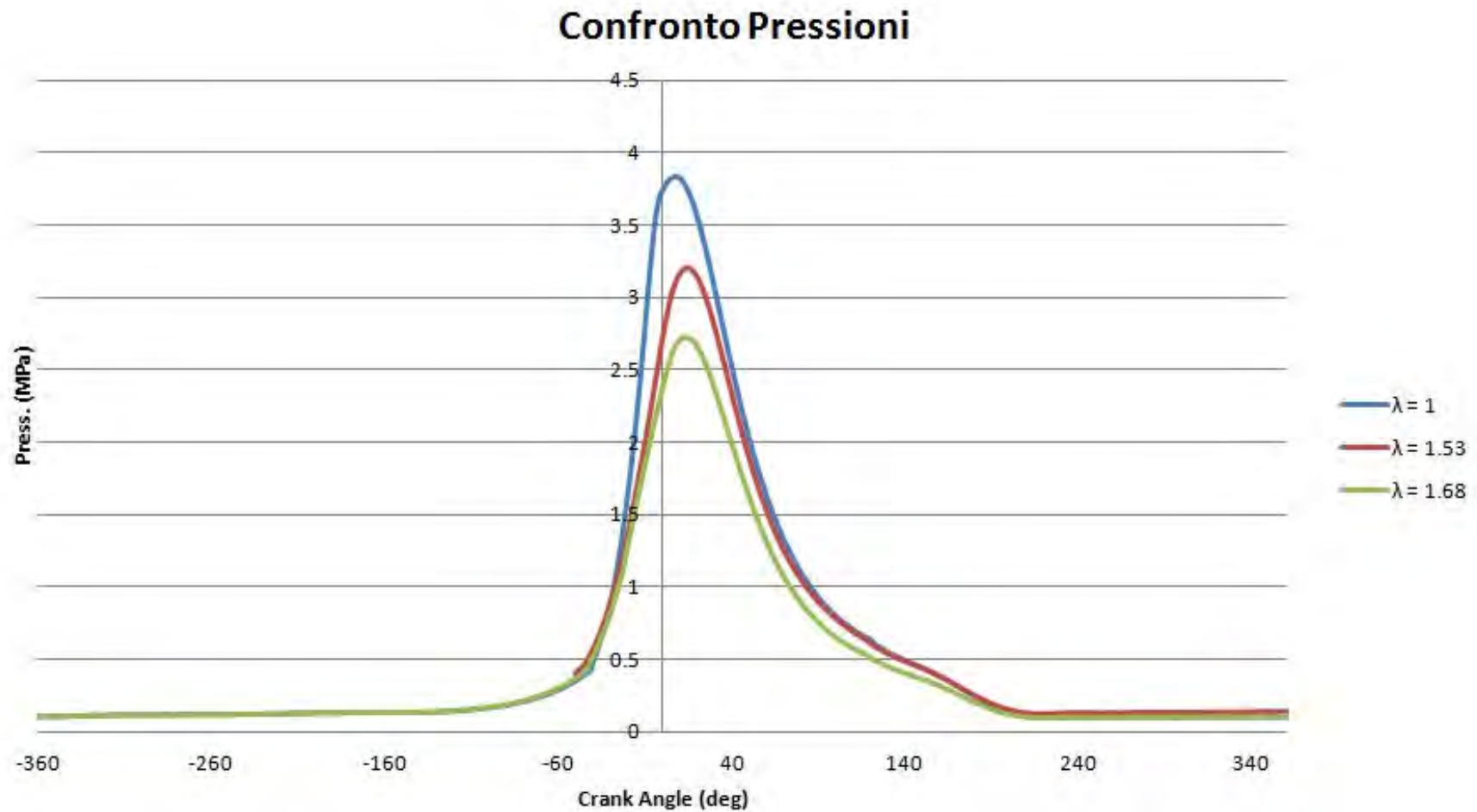
Adaptive mesh refinements (AMR)



$$\lambda = 1.53$$



Confronti



Ringraziamenti:

- Ed Chan e la British Columbia University per le diverse attività sperimentali
- Riccardo Scarcelli, Thomas Wallner e gli Argonne Laboratories per il supporto con Converge
- I tesisti I. Vissani, W. DeSalvador, M. Papaleo

References:

Bartolucci, L., Cordiner, S., Mulone, V., Rocco, V. et al., "Natural Gas Partially Stratified Charge Combustion: Extended Analysis of Experimental Validation and Study of Turbulence Impact on Flame Propagation," SAE Technical Paper 2016-01-0596, 2016, doi:10.4271/2016-01-0596.

Bartolucci, L., Chan, E. C., Cordiner, S., Mulone, V., & Rocco, V. (2015). Natural Gas Fueling: A LES Based Injection and Combustion Modeling for Partially Stratified Engines. *Energy Procedia*, 82, 417-423.

Bartolucci, L., Cordiner, S., Mulone, V., Rocco, V. et al., "Partially Stratified Charge Natural Gas Combustion: The Impact of Uncertainties on LES Modeling," SAE Technical Paper 2015-24-2409, 2015, doi:10.4271/2015-24-2409.

Bartolucci, L., Cordiner, S., Mulone, V., Rocco, V. et al., "Partially Stratified Charge Natural Gas Combustion: A LES Numerical Analysis," SAE Technical Paper 2015-01-0398, 2015, doi:10.4271/2015-01-0398.

Grazie per l'attenzione

stefano.cordiner@uniroma2.it