

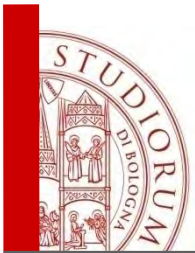
Dipartimento di Ingegneria Industriale

Analisi Numerica dell'effetto di strategie di iniezione d'acqua in motori ad alta potenza specifica

S. Falfari, G. Cazzoli, G.M. Bianchi
Alma Mater Studiorum Università di Bologna

C. Forte
NAIS srl

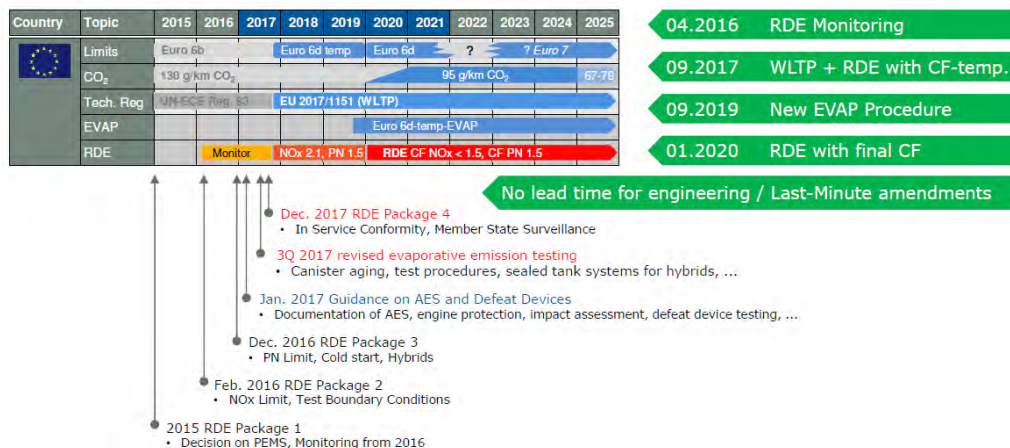
Giornata di Studio 'Giorgio Minelli' sui Motori a Combustione Interna
Bologna - 20 aprile 2018



Motivazioni

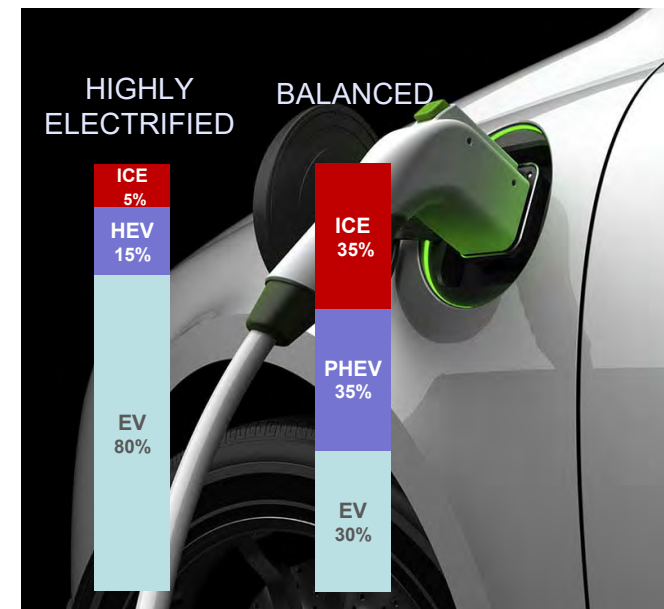
RIDUZIONE CONSUMI FONTI RINNOVABILI ED EMISSIONI CO2: SCENARI POWERTRAIN

2025 Emission Test Cycle Scenario



WLTP – RDE Emission Cycles Implemented from 09/2017
 CO₂ @ 67-78 g/km in 2025

2050 Powertrain Scenarios

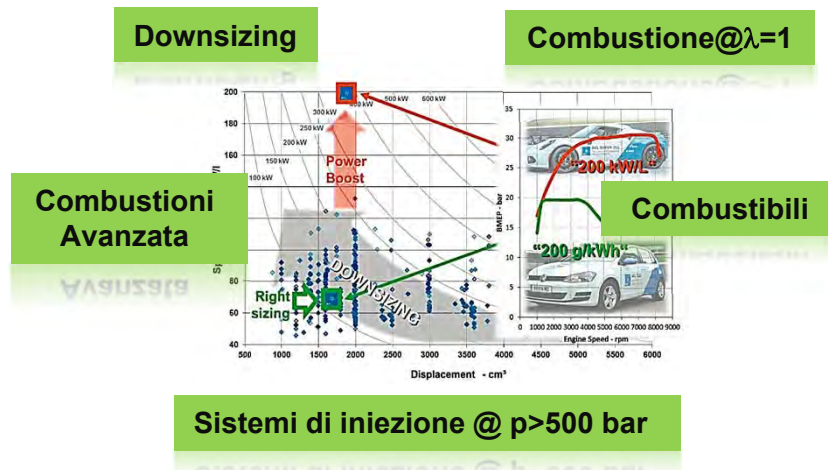


IN ENTRAMBI GLI SCENARI DI MEDIO (2025) E LUNGO (2050) PERIODO DEVONO ESSERE SVILUPPATI SISTEMI COMBUSTIONE AVANZATI

SVILUPPO TECNOLOGICO SISTEMA DI COMBUSTIONE ACCENSIONE COMANDATA CO₂ COMPLYING

SOLUZIONI & CRITICITA'

SOLUZIONI



CRITICITA'

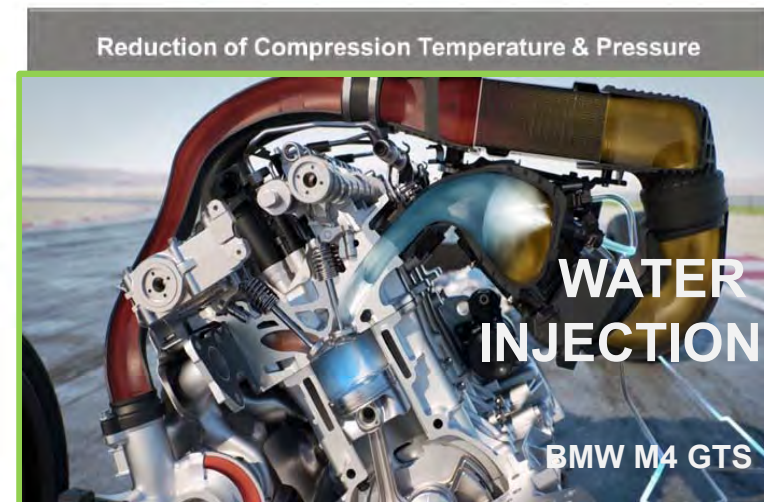
DETONAZIONE

PREACCENSIONE

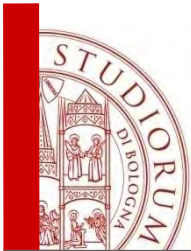
TEMPERATURA INGRESSO TURBINA

MITIGAZIONE RISCHIO

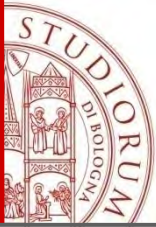
DETONAZIONE & PREACCENSIONE



- Combustione @ $\lambda=1$ (anziché $\lambda < 0.9$)
- Aumento BMEP
- Riduzione BSFC



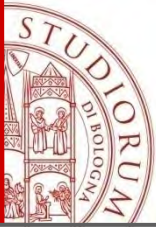
L'iniezione d'acqua: considerazioni preliminari



L'iniezione d'acqua: considerazioni preliminari

Proprietà Fisiche

	Water	Iso-octane	RON95 E10
Latent heat of vaporization [kJ/kg] at 1 bar	2257.00	307.00	397.00
Surface tension σ [N/m]	72.71e-3	18.32e-3	19.80e-3
Vapour pressure p_v [kPa] at 25°C	2.34	5.30	5.90
Viscosity ν [mPa·s] at 25°C	0.88	0.47	0.50
Density [kg/m ³] at 25°C	999.00	690.00	750.00



L'iniezione d'acqua: considerazioni preliminari

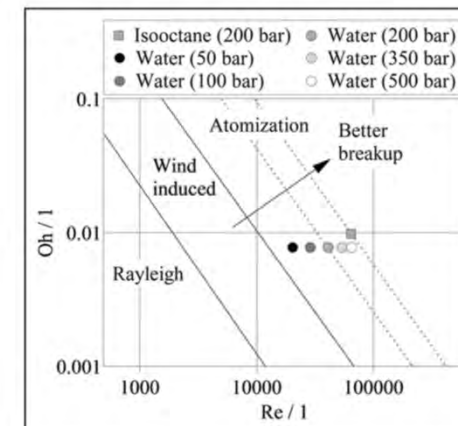
Proprietà Fisiche

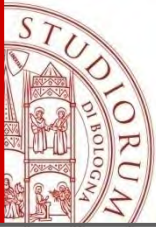
	Water	Iso-octane	RON95 E10
Latent heat of vaporization [kJ/kg] at 1 bar	2257.00	307.00	397.00
Surface tension σ [N/m]	72.71e-3	18.32e-3	19.80e-3
Vapour pressure p_v [kPa] at 25°C	2.34	5.30	5.90
Viscosity ν [mPa·s] at 25°C	0.88	0.47	0.50
Density [kg/m ³] at 25°C	999.00	690.00	750.00

Tensione superficiale meno favorevole all'atomizzazione

E' necessario adottare MAGGIORI pressioni di iniezione per favorire l'atomizzazione dello spray di acqua rispetto al combustibile.

Hoppe, Baumgarten, Dohmen, 'Water Injection for gasoline engines: Potentials, Challenges and solutions', International Journal of Engine Reserach 17(1): 86:96, 2016, doi: 10.1177/1468087415599867.





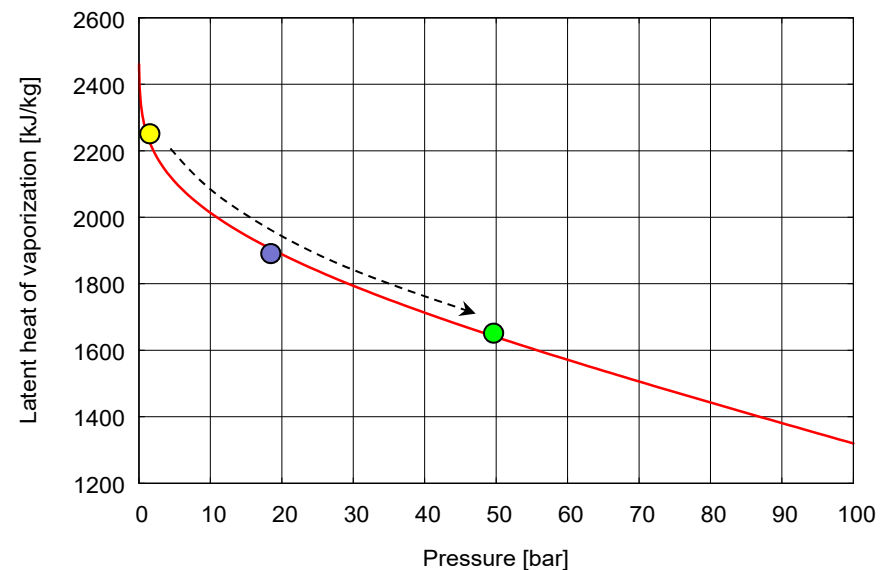
L'iniezione d'acqua: considerazioni preliminari

Proprietà Fisiche

	Water	Iso-octane	RON95 E10
Latent heat of vaporization [kJ/kg] at 1 bar	2257.00	307.00	397.00
Surface tension σ [N/m]	72.71e-3	18.32e-3	19.80e-3
Vapour pressure p_v [kPa] at 25°C	2.34	5.30	5.90
Viscosity ν [mPa·s] at 25°C	0.88	0.47	0.50
Density [kg/m ³] at 25°C	999.00	690.00	750.00

Calore latente di vaporizzazione

1. Valori circa **6 volte superiori** alla benzina @1 bar;
2. LHV VARIABILE (in diminuzione) con la pressione: LHV @p=20 bar MINORE (-19%)



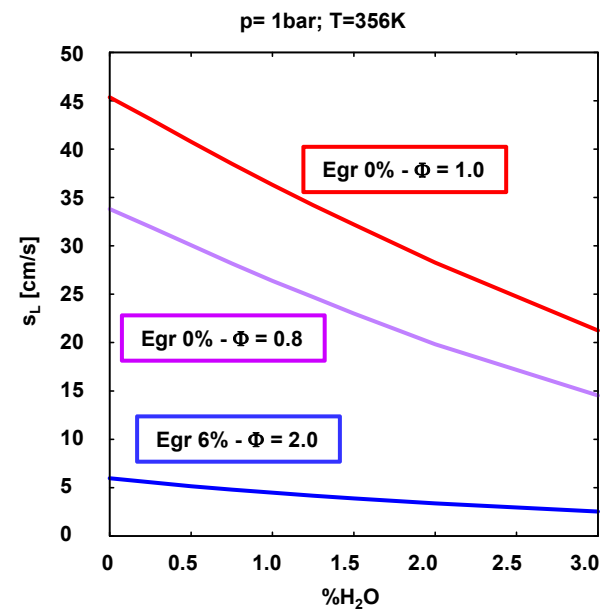
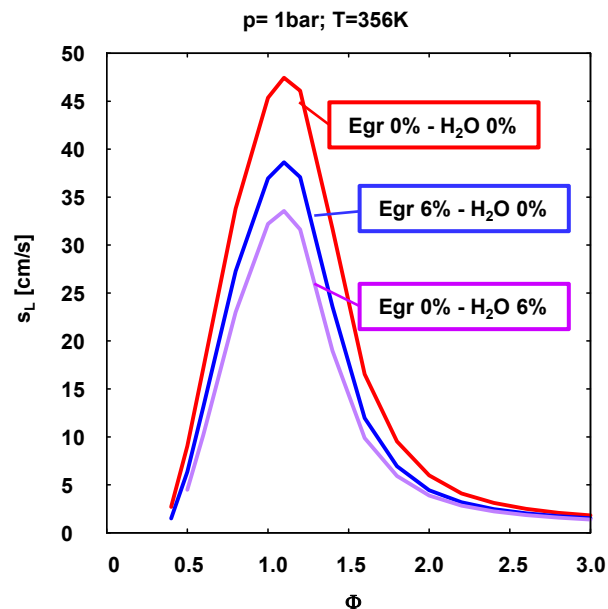


L'iniezione d'acqua: considerazioni preliminari

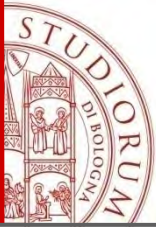
Proprietà Chimiche

Velocità laminare di fiamma

Importante effetto NEGATIVO sulla velocità laminare di fiamma: essa si riduce all'aumentare del quantitativo di acqua vaporizzata in camera



Conseguenza: MAGGIORE DURATA DI COMBUSTIONE e possibili maggiori temperature in ingresso turbina TiT.

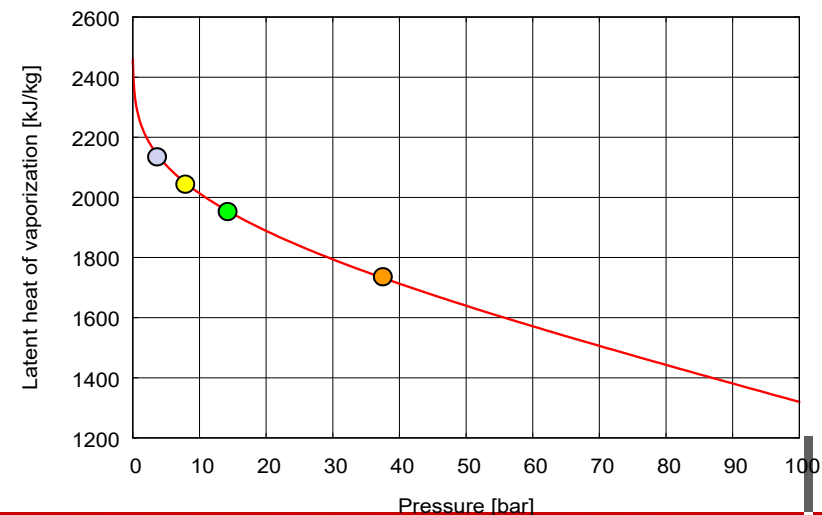
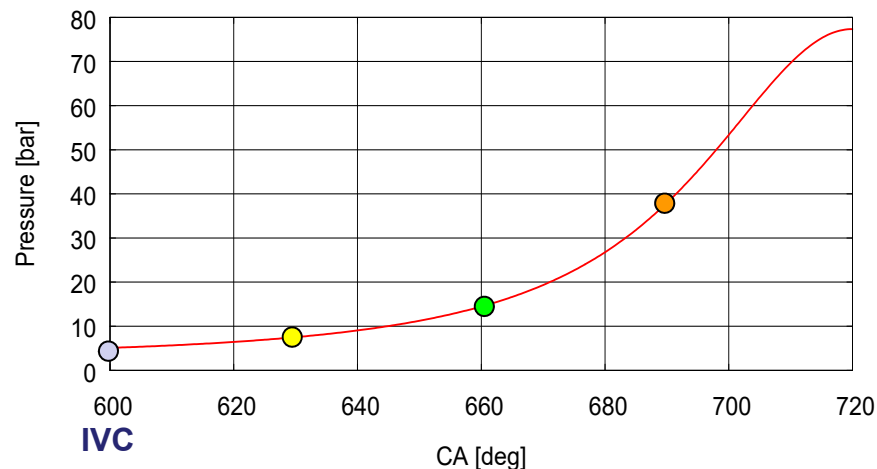


L'iniezione d'acqua: considerazioni preliminari

Termodinamica

1. Rischio di **saturation** tanto maggiore quanto minori sono le temperature dell'aria
2. Necessario **trade-off** tra caso ideale di evaporazione Istantanea (idealmente isocora) in prossimità di IVC (alti valori di calore latente di vaporizzazione) e CASO REALE con compromesso tra:
 - a. Tempo di evaporazione -> Completa evaporazione
 - b. Riduzione del calore latente di vaporizzazione

IPOTESI: evaporazione istantanea ISOCORA dell'acqua



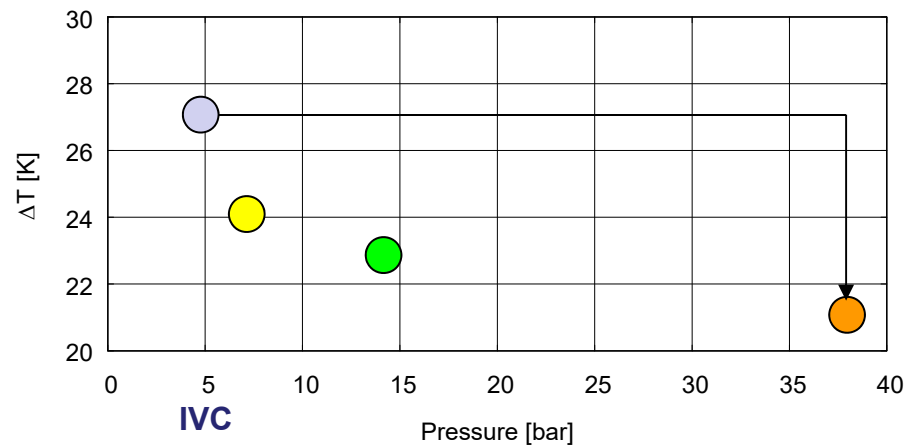


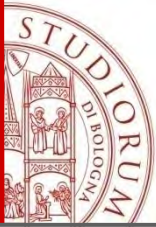
L'iniezione d'acqua: considerazioni preliminari

Termodinamica

1. Rischio di **saturazione** tanto maggiore quanto minori sono le temperature dell'aria
2. Necessario **trade-off** tra caso ideale di evaporazione ISTANTANEA (idealmente isocora) in prossimità di IVC (alti valori di calore latente di vaporizzazione) e CASO REALE con compromesso tra:
 - a. Tempo di evaporazione -> Completa evaporazione
 - b. Riduzione del calore latente di vaporizzazione

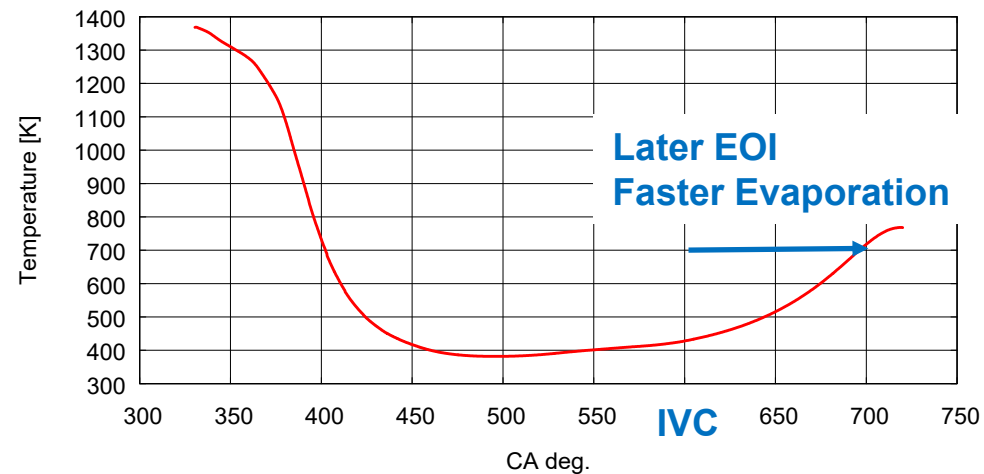
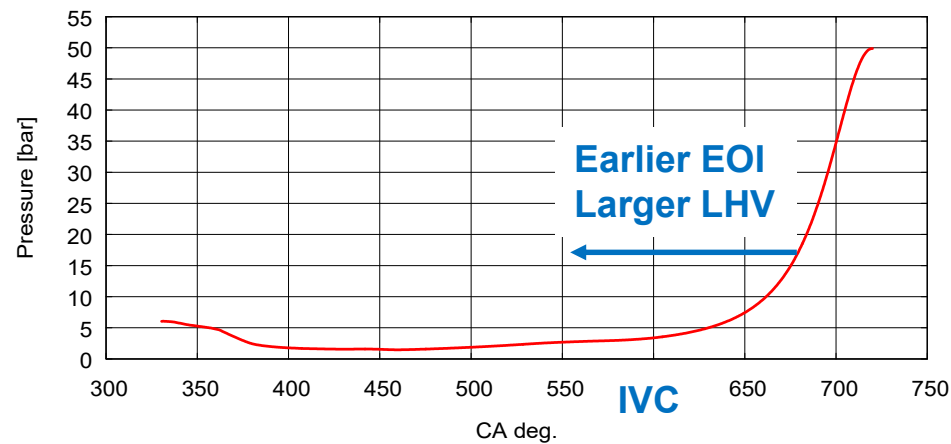
IPOTESI: evaporazione istantanea ISOCORA dell'acqua

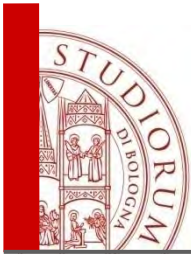




L'iniezione d'acqua: considerazioni preliminari

3. Effetto della fase di iniezione





Applicazioni Motoristiche in flusso non reagente:

ANALISI PRELIMINARE

4. Effetto della temperatura dell'aria sul **Tempo di evaporazione**

A) L'evaporazione deve avvenire ad alta temperatura per potere avere tempi compatibili con cicli motore

B) Nel caso di **iniezione indiretta**

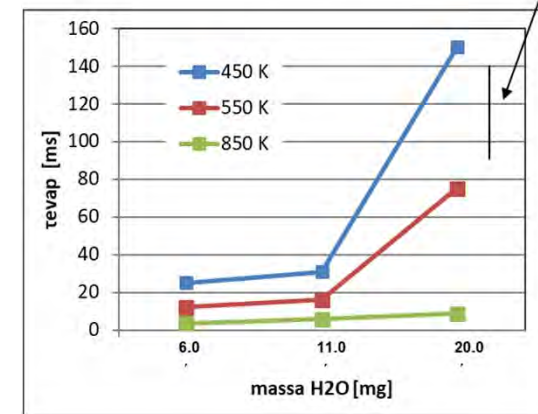
B.1 l'evaporazione deve avvenire **nel cilindro**:

- T_{aria} condotto < 330 K:
- Rischio saturazione
- Velocità evaporativa bassa

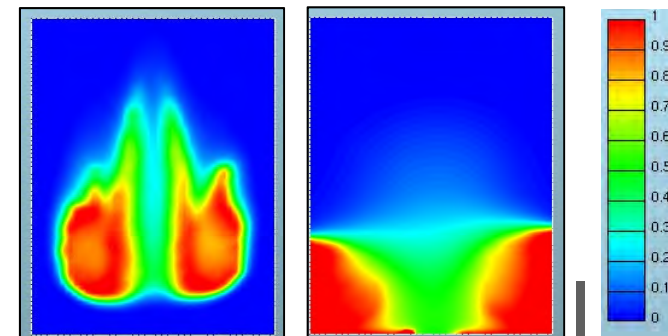
B.2 Necessaria ottimizzazione:

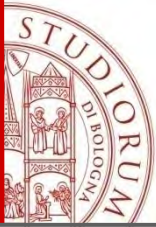
- Pressione di iniezione acqua
- Installazione e targeting iniettore
- SOI/EOI

EFFETTO DI SATURAZIONE



Saturazione: Umidità Relativa [0:1] @ T=330K

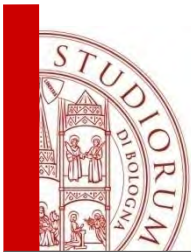




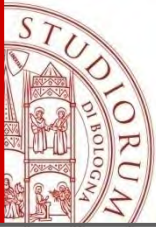
L'iniezione d'acqua: considerazioni preliminari

Aspetti Motoristici

1. Necessità di trovare il migliore **trade-off** tra **limitazione consumo di acqua** e obiettivo di **riduzione consumo specifico** (frequenza rifornimenti e costo gestione, peso aggiuntivo, rischio recovery se H₂O assente)
2. **Evitare impatto a parete** allo scopo non solo di evitare rischio **locale di saturazione** ma anche **contaminazione del lubrificante**
3. Necessità di esplorare soluzioni (PWI) che **limitino i costi** e gli aspetti legati allo sviluppi di tecnologie di iniezione rispetto a soluzioni (DWI) ad alta pressione (problemi di lubrificazione e raffreddamento componenti)



Metodologia e Obiettivi



Metodologia e Obiettivi

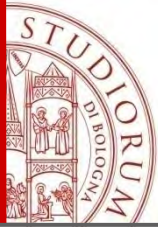
METODOLOGIA

Di tipo **NUMERICO** mediante impiego di simulazioni CFD tridimensionali per esigenze di comprensione profonda dei processi fisici legati all'evaporazione d'acqua in funzione delle condizioni fluidodinamiche motoristiche, altrimenti non ottenibili tramite attività sperimentali

SOFTWARE DI SIMULAZIONE

AVL Fire v2014.2

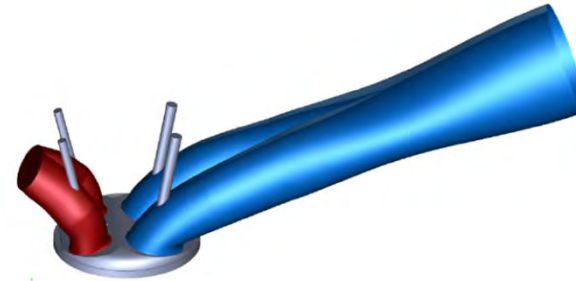
TURBOLENZA	k - ϵ
TRATTAMENTO A PARETE	Hybrid Wall Treatment
TRASFERIMENTO CALORE A PARETE	Han-Reitz Model
MODELLO DI TRASPORTO	General (definizione delle proprietà delle specie chimiche tramite tabelle esterne)



Metodologia e Obiettivi

MOTORE

Corsa [mm]	86.10
Alesaggio [mm]	82.00
Rc	10.0
Cilindrata Unitaria [cm ³]	455.00
C/D	1.05
D _v /D	0.38
Aspirazione	Sovralimentato
P _{boost} /T _{boost}	2.2 bar/330 K
BMEP@WOT	27.50 bar
RT@IVC	1.20
Iniezione fuel	Diretta centrale
Accensione	Comandata

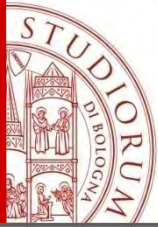


Fasatura ASPIRAZIONE/SCARICO (CA deg. BTDC)

EVO	162
IVO	362
EVC	368
IVC	598

Condizione Operativa Simulata

Regime [rpm]	6500
Titolo (w/o) H2O	0.80
Carico	WOT



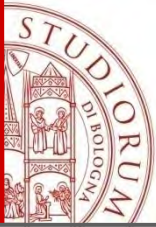
Metodologia e Obiettivi

ANALISI MOTORISTICA

2.1 FLUSSO NON REAGENTE

2.2 FLUSSO REAGENTE - TRADE-OFF fra:

PRESTAZIONI
CONSUMO SPECIFICO
CONSUMO di ACQUA



Metodologia e Obiettivi

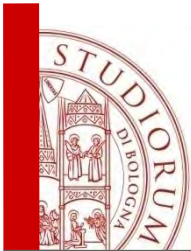
ANALISI MOTORISTICA

2.1 FLUSSO NON REAGENTE

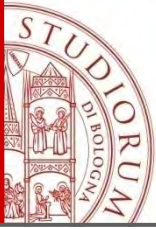
Iniezione Indiretta (PWI)

Iniezione Diretta (DWI)

- A. Comprensione della fisica del processo di evaporazione ai fini di ottimizzare il consumo di acqua.
- B. Analisi di sensibilità su:
 - i. Pressione di iniezione e fasatura di iniezione
 - ii. Frazioni di acqua da iniettare
- C. Variazione dei principali parametri motoristici fluidodinamici



Applicazioni Motoristiche in Flusso Non Reagente:



Applicazioni Motoristiche in flusso non reagente:

ANALISI PRELIMINARE

POSIZIONAMENTO E LAYOUT INIETTORI

INIEZIONE INDIRETTA PWI



☐ DEFINIZIONE DEL PARAMETRO s:

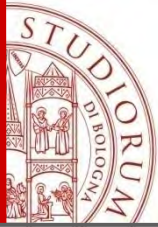
$$s = \frac{m_{H_2O}}{m_{fuel_{st}}}$$

☐ CASO DI RIFERIMENTO: $\lambda=1.0$ NO H₂O

#1 Iniettore

n_{Fori}	2
Diametro [mm]	0.300
P_{Inj} [bar]	5/25/50

P_{inj} [bar]	s	SOI [ATDC]	EOI [ATDC]
5	0.2	250	540
25	0.2/0.4/0.5	330	429/508/552
50	0.2	330	429



Applicazioni Motoristiche in flusso non reagente:

ANALISI PRELIMINARE

INIEZIONE INDIRETTA PWI 1/2

P_{inj} [bar]	s	SOI [ATDC]	EOI [ATDC]
5	0.2	250	540
25	0.2/04/05	330	429/508/552
50	0.2	330	429

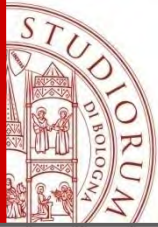
Obiettivi:

Valutare effetto della pressione di iniezione @s=0.2 per valutare trade-off:

1. Completezza evaporativa
2. Effetto di raffreddamento

Nota:

Fasature ottimizzate (valide per la posizione di installazione considerata)



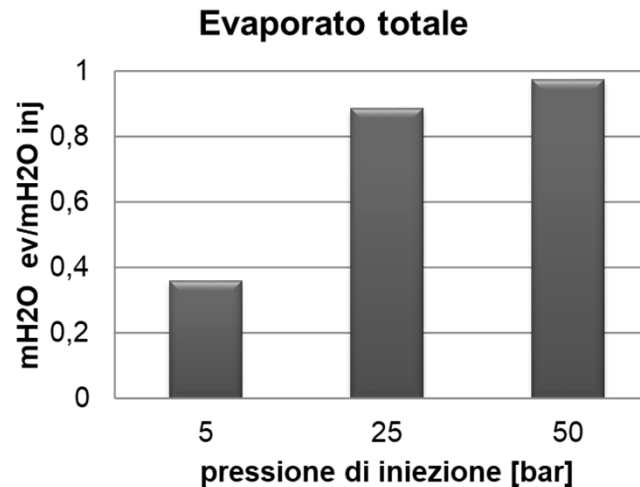
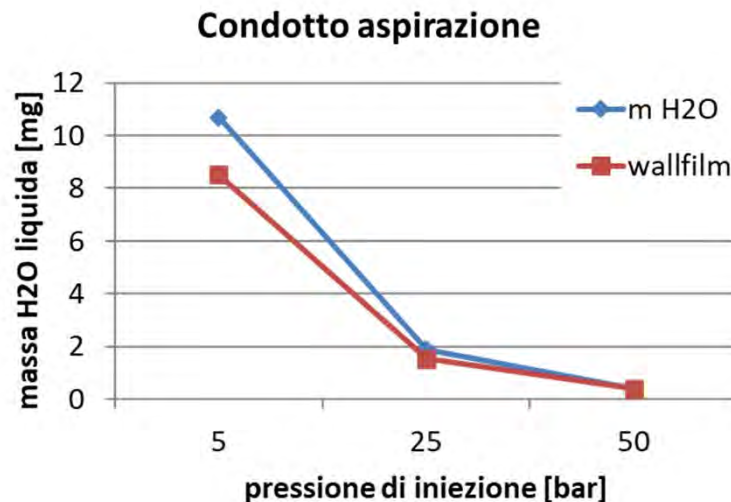
Applicazioni Motoristiche in flusso non reagente:

ANALISI PRELIMINARE

INIEZIONE INDIRETTA PWI 1/2

Effetto (Aumento) della pressione di iniezione (analisi @ 720 CA):

- 1) Aumento della massa totale evaporata (90% @ $p_{inj} \geq 25$ bar)
- 2) Diminuzione del wallfilm (la pressione di iniezione favorisce l'ingresso nel cilindro evitando accumuli a bassa temperatura)
- 3) Eliminazione del residuo liquido solo con **pressioni ≥ 25 bar**





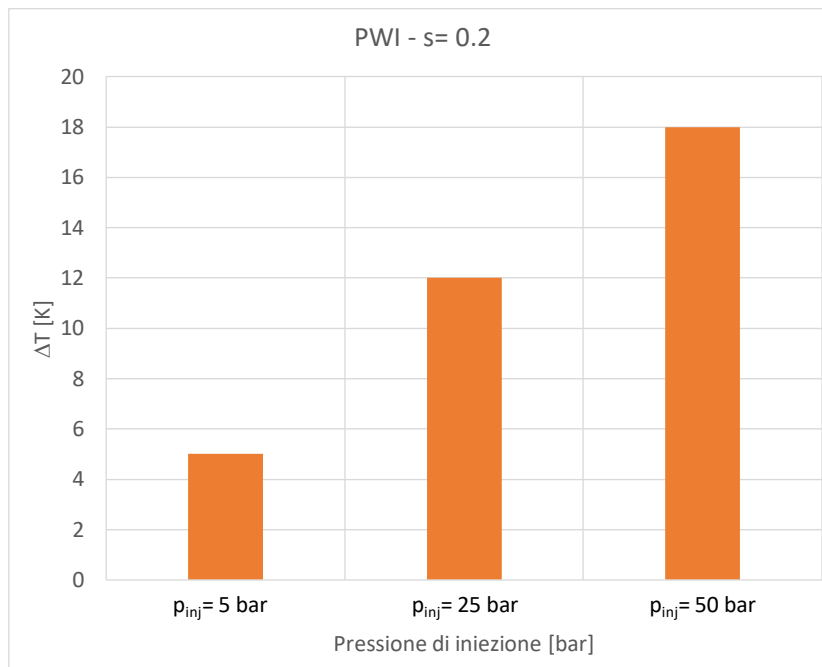
Applicazioni Motoristiche in flusso non reagente:

ANALISI PRELIMINARE

INIEZIONE INDIRETTA PWI 1/2

Effetto (Aumento) della pressione di iniezione (analisi @ 720 CA):

1. Significativo incremento dell'effetto di raffreddamento (20% acqua)



REF. CASE: $\lambda=1.0$



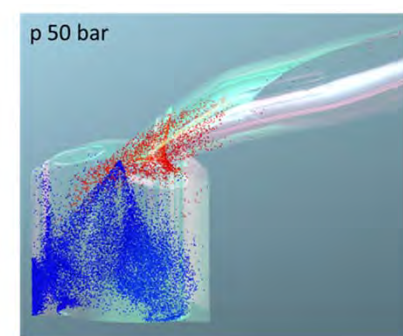
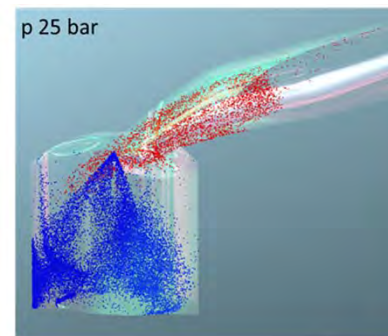
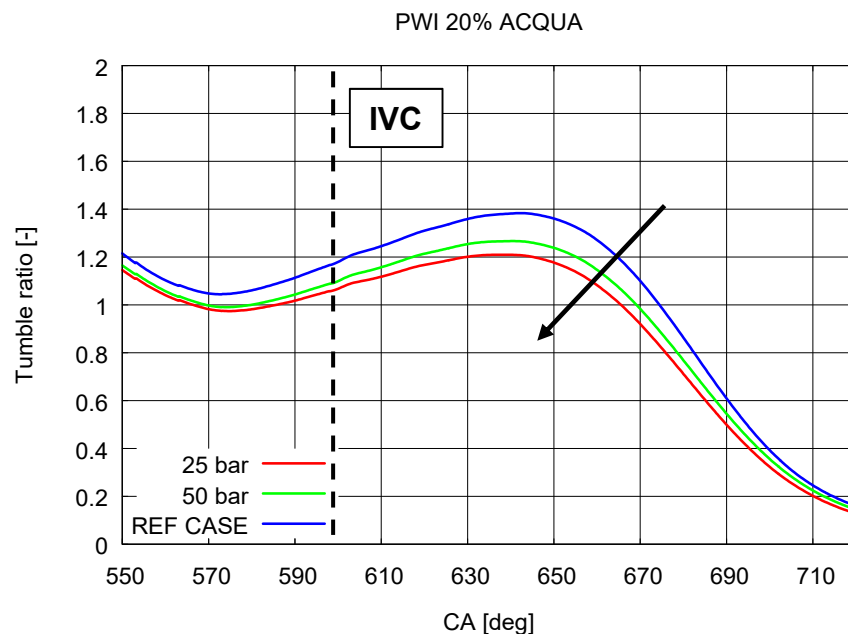
Applicazioni Motoristiche in flusso non reagente:

ANALISI PRELIMINARE

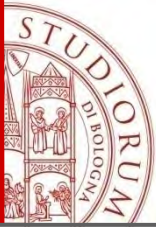
INIEZIONE INDIRETTA PWI 1/2

Effetto (Aumento) della pressione di iniezione - Casi a 25-50 bar

A causa dell'ORIENTAMENTO dello spray verso l'ingresso nel cilindro, si registra la penalizzazione del flusso lato scarico con conseguente **diminuzione del rapporto di tumble** @IVC (598 ca deg) rispetto al caso di riferimento senza iniezione di acqua.



Non si è considerato il **caso a pressione di iniezione 5bar** perché ha dimostrato irrilevante interesse motoristico dato il basso potere raffreddante.



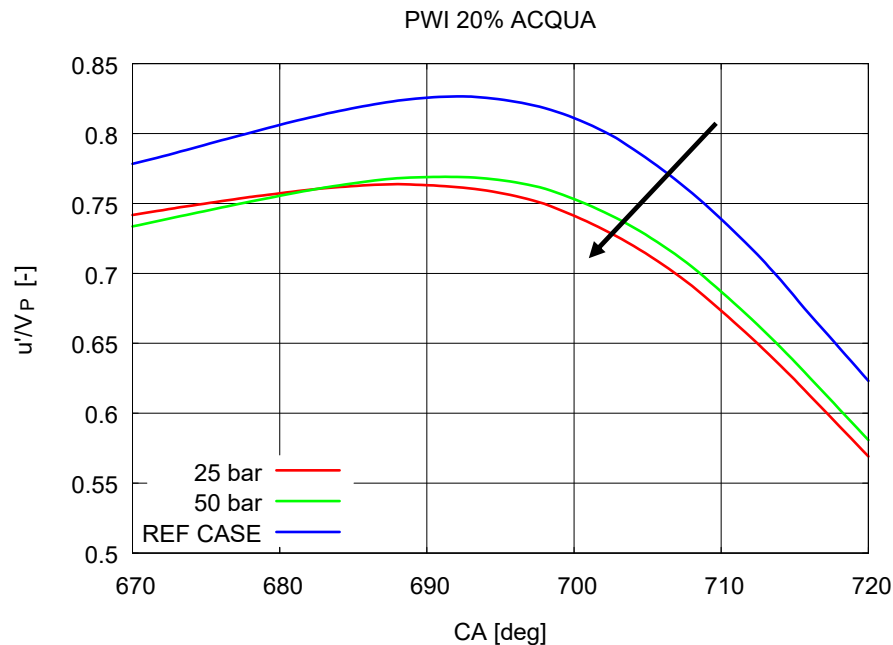
Applicazioni Motoristiche in flusso non reagente:

ANALISI PRELIMINARE

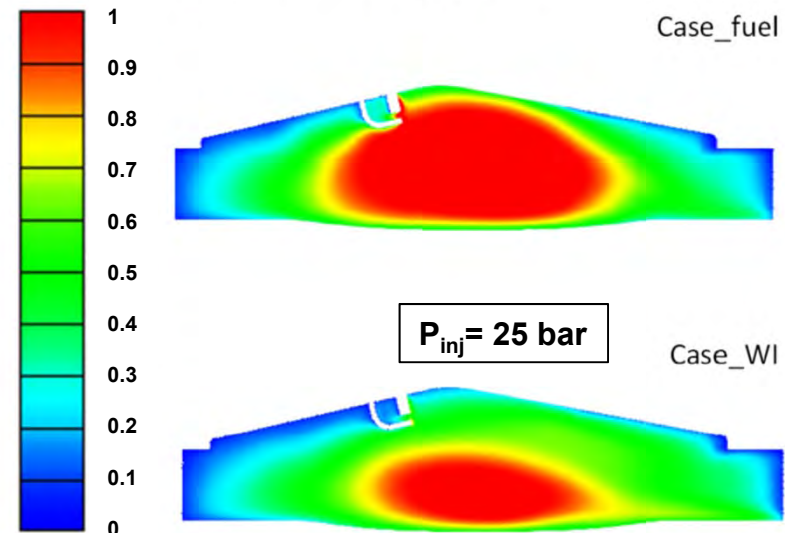
INIEZIONE INDIRETTA PWI 1/2

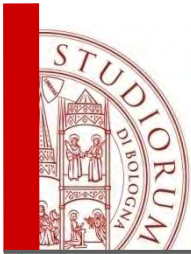
Effetto (Aumento) della pressione di iniezione - Casi a 25-50 bar

A causa dell'indirizzamento dello spray orientato per entrare nel cilindro, si registra la **diminuzione dell'intensità di turbolenza u'/V_p** : è necessario trovare il **TRADE-OFF tra effetto raffreddante e velocità di combustione**.



u'/V_p @ 700 CA deg. ATDC





Applicazioni Motoristiche in flusso non reagente:

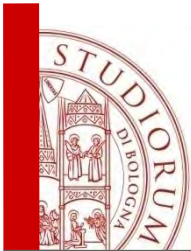
ANALISI PRELIMINARE

INIEZIONE INDIRETTA PWI 1/2

P_{inj} [bar]	s	SOI [ATDC]	EOI [ATDC]
5	0.2	250	540
25	0.2/04/05	330	429/508/552
50	0.2	330	429

Conclusioni:

1. **Necessario Incremento** della pressione di iniezione (≥ 25 bar) già per valori di $s=0.2$
2. Effetti di **trade-off** da valutare rispetto alla **velocità di combustione** a causa dell'influenza (negativa) della pressione di iniezione sull'intensità di turbolenza



Applicazioni Motoristiche in flusso non reagente:

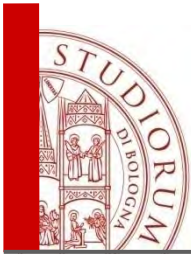
ANALISI PRELIMINARE

INIEZIONE INDIRETTA PWI 2/2

P_{inj} [bar]	s	SOI [ATDC]	EOI [ATDC]
5	0.2	250	540
25	0.2/ 0.4/0.5	330	429/ 508/552
50	0.2	330	429

Nota:

Nel punto a 'Max Power', per valori alti di s (>0.4), EOI entro IVC può essere garantito solo da pressioni di iniezione maggiori di 50 bar



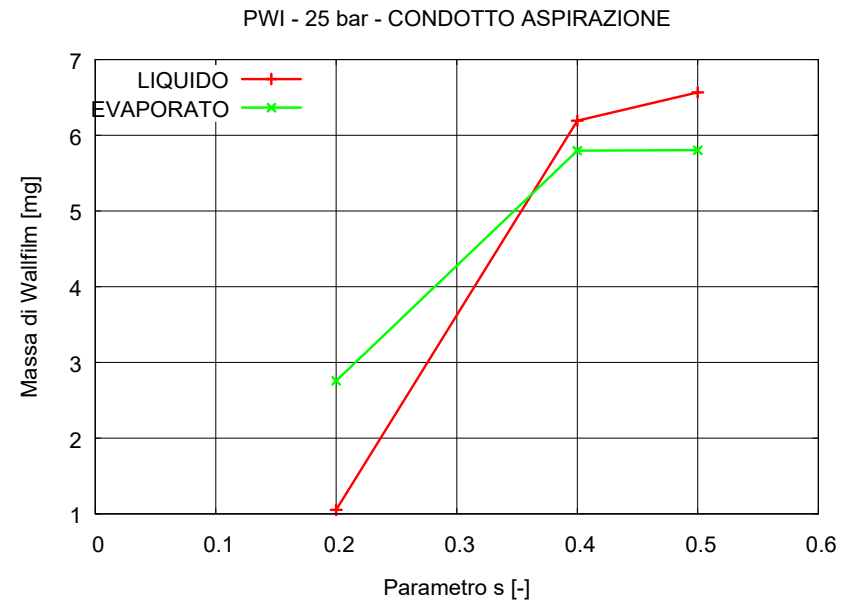
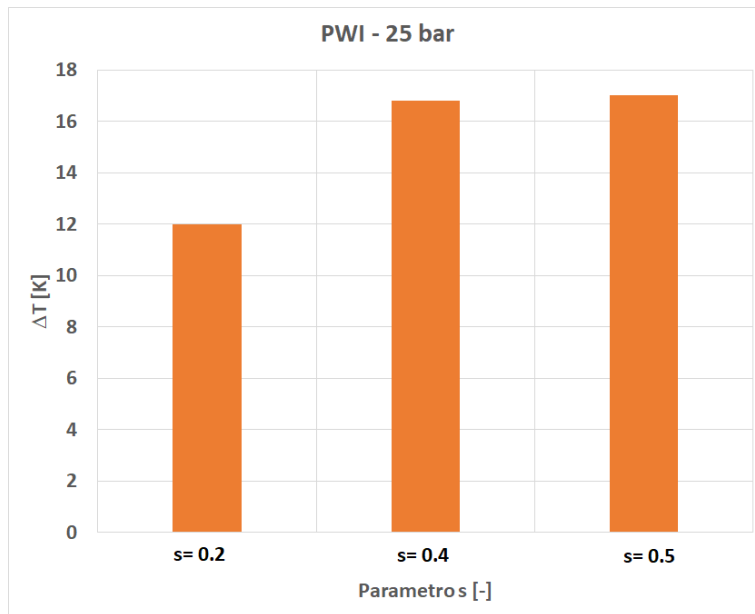
Applicazioni Motoristiche in flusso non reagente:

ANALISI PRELIMINARE

INIEZIONE INDIRETTA PWI 2/2

Effetto (Aumento) della quantità di massa di acqua iniettata:

1. **Incremento** (meno che lineare) dell'effetto di raffreddamento nel CILINDRO da $s=0.2$ a $s=0.4$ @25 bar
2. Plafonamento effetto raffreddante evidente



Effetto di raffreddamento valutato @TDC rispetto al caso di riferimento ($\lambda=1$, no H_2O)

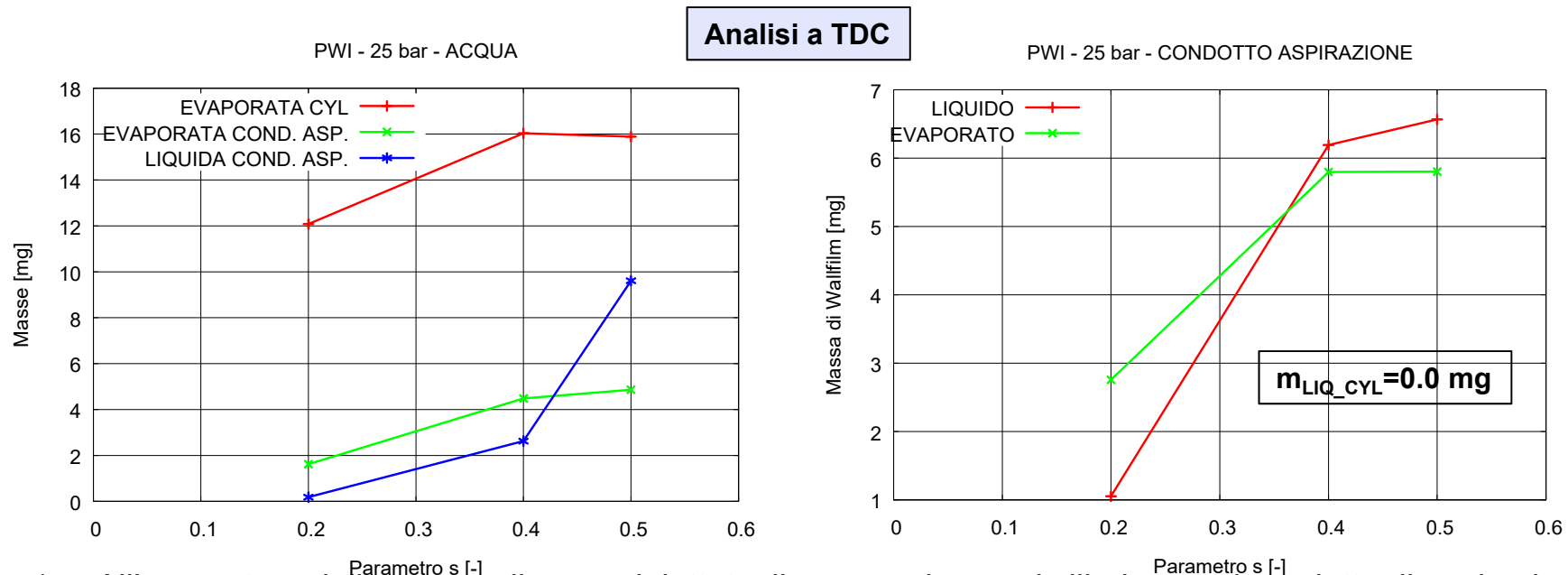


Applicazioni Motoristiche in flusso non reagente:

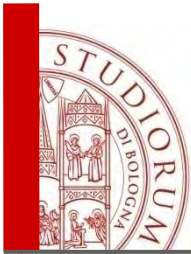
ANALISI PRELIMINARE

INIEZIONE INDIRETTA PWI 2/2

Effetto (Aumento) della quantità di massa (s) di acqua iniettata (25 bar):



1. All'aumentare della massa di acqua iniettata, l'evaporazione nel cilindro e nel condotto di aspirazione tende a plafonare ($s > 0.4$) a causa dell'aumento della **massa liquida nel condotto di aspirazione** (wall film)
2. Il wall film genera saturazione e riduce beneficio sottraendo calore dalle pareti

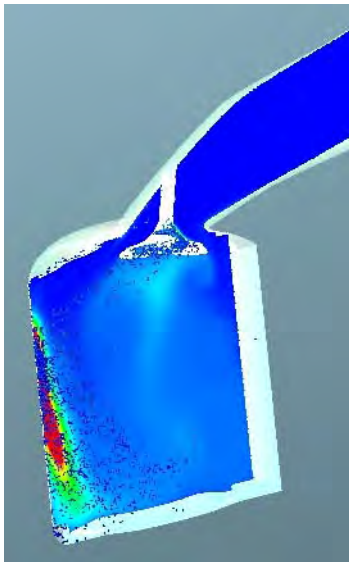


Applicazioni Motoristiche in flusso non reagente:

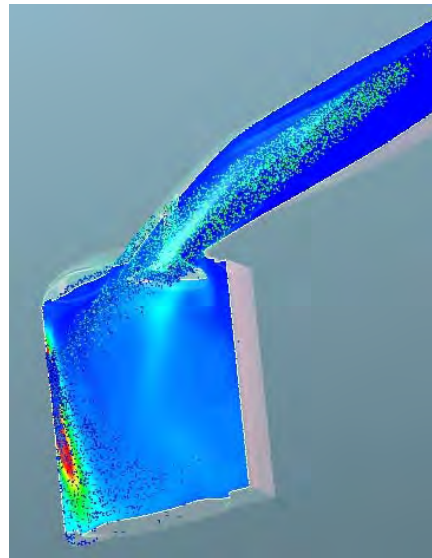
ANALISI PRELIMINARE

INIEZIONE INDIRETTA PWI 2/2

INDICE DI UMIDITA' @ CA 530 deg. ATDC

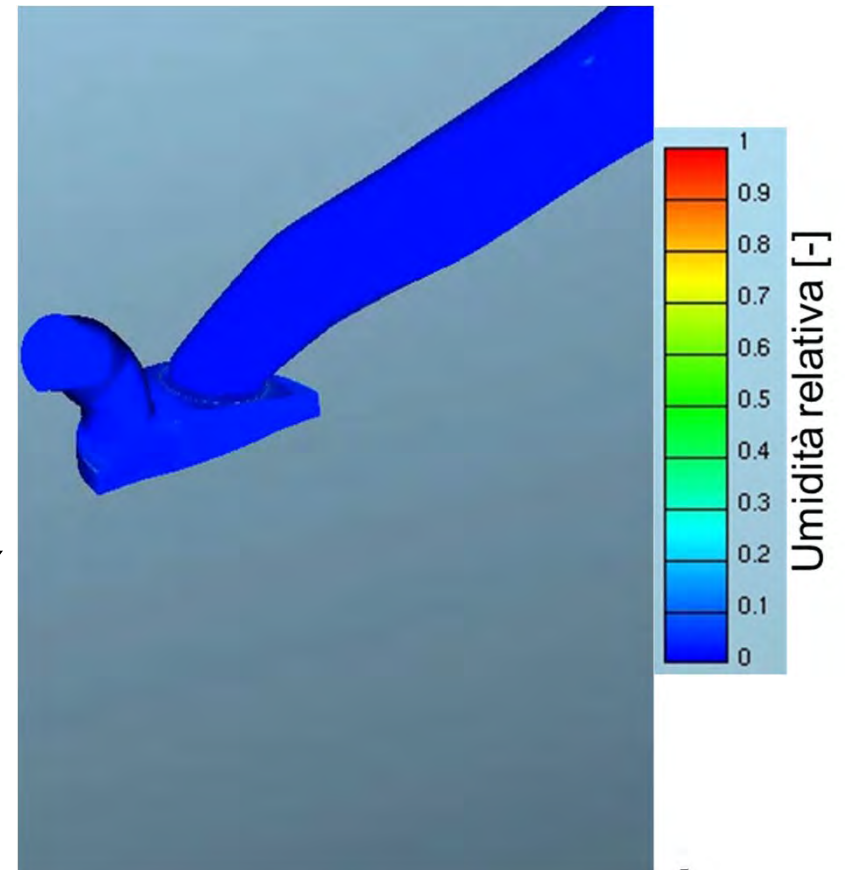


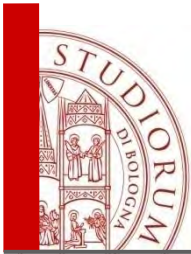
PWI – 25 bar $s=0.2$



PWI – 25 bar $s=0.4$

PIANO VALVOLA





Applicazioni Motoristiche in flusso non reagente:

ANALISI PRELIMINARE

INIEZIONE INDIRETTA PWI 2/2

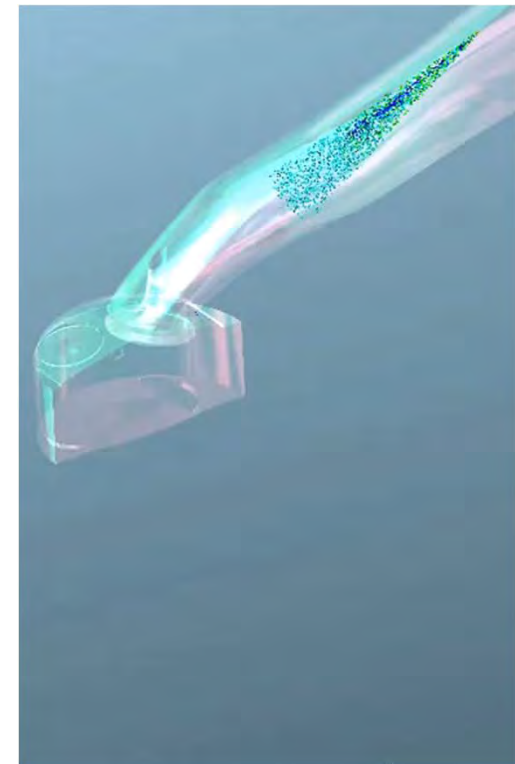
PWI – 25 bar – $s = 0.2$

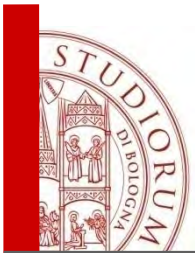


PWI – 25 bar – $s = 0.4$

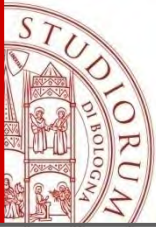


PWI – 25 bar – $s = 0.5$





Conclusioni



Conclusioni

- ❑ L'analisi ha indicato l'effetto delle proprietà fisiche dell'acqua e ha considerato una applicazione con soluzione ad iniezione indiretta (PWI) al fine di minimizzare i consumi a pari effetto raffreddante
- ❑ Le proprietà fisiche e chimiche dell'acqua giocano un ruolo chiave nella determinazione delle specifiche del sistema di iniezione e delle fasi di iniezione
- ❑ Particolare cura va prestata alle condizioni termodinamiche in cui l'evaporazione dell'acqua avviene
- ❑ A bassa temperatura ($T < 350$ K) si accentua il rischio di raggiungere le condizioni di saturazione e la velocità di evaporazione può non essere compatibile con le finestre angolari disponibili
- ❑ La massimizzazione dell'effetto raffreddante dell'acqua richiede di evitare qualsiasi contatto con le pareti del condotto/valvola/cilindro (anche per ragioni di contaminazione del lubrificante nel caso del liner) e l'evaporazione nel condotto
- ❑ I gradi di libertà relativi alla pressione di iniezione ed alla fasatura sono limitati da quanto sopra e dalla necessità di trasportare la fase liquida nel cilindro, in funzione del valore del parametro s e della velocità di rotazione a potenza massima.
- ❑ Nel caso di iniezione indiretta, a seguito di quanto si è evidenziato, si suggerisce l'adozione di pressione molto più alte di quelle adottate nel caso dell'iniezione di benzina ($p_{inj} > 20$ bar)
- ❑ E' possibile che l'adozione di valori di $s > 0.4$ siano difficili da operare con strategie PWI