

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DIN - Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica LM

Tesi di laurea in

Advanced Combustion Systems M

Analisi tramite simulazione CFD di un motore ad accensione
comandata da ricerca ad accesso ottico

Candidato:

Christian Antetomaso

Relatore:

Prof. Ing. Gian Marco Bianchi

Correlatori:

Prof.ssa Ing. Stefania Falfari

Ing. Giulio Cazzoli

Ing. Valerio Mariani

Abstract

Il motore a combustione interna (MCI) è, e con tutta probabilità rimarrà nel futuro prossimo, il motore più utilizzato nell'ambito del trasporto, sia per quanto riguarda i cosiddetti light-duty vehicle (LDV, veicoli per lo più ad uso personale), sia per quanto riguarda gli heavy-duty vehicle (HDV, veicoli adibiti per lo più al trasporto di materie prime, e.g. autoarticolati, camion, ...). La necessità di continuare ad utilizzare tali mezzi, unita alla consapevolezza ed alla crescente attenzione rivolta alle emissioni di inquinanti diretti ed anidride carbonica, ha spinto l'evoluzione dei MCI sempre con maggior urgenza, alla ricerca di soluzioni più efficienti, più sostenibili, meno costose. Gli studi sperimentali al banco e quelli numerici hanno da sempre lavorato in maniera sinergica alla ricerca di tali soluzioni, ma le numerose nuove tecnologie introdotte richiedono un nuovo studio nella morfologia dei fenomeni dentro camera col fine di sviluppare modelli ad hoc da integrare nelle simulazioni. I motori ad accesso ottico si presentano come chiave di volta del problema, ma, data la loro natura e i materiali impiegati, hanno un comportamento diverso da quelli commerciali, e richiedono quindi una minuziosa caratterizzazione.

La presente tesi ha come obiettivo la caratterizzazione completa di un motore ad accesso ottico 4 cilindri ad accensione comandata con portata di blow-by non trascurabile; tale motore è presente nei laboratori dell'ente CNR-STEM con sede a Napoli.

La tesi si è sviluppata secondo i seguenti passaggi:

1. È stata disegnata la geometria del motore con il software CAD Creo Parametric;
2. È stata poi usata tale geometria per produrre la mesh utile alle simulazioni CFD tridimensionali sia per motore aspirato sia per la successiva combustione;
3. Sono state eseguite simulazioni stazionarie di flussaggio per caratterizzare i condotti del motore, ossia calcolare i coefficienti di efflusso da utilizzare poi nello sviluppo di un modello mono-dimensionale nel codice di calcolo OpenWam;
4. Il modello mono-dimensionale in OpenWam è stato tarato per confronto con i dati sperimentali e ha portato alla definizione delle condizioni al contorno ed iniziali utili per le simulazioni CFD in ambiente FIRE.

Ringraziamenti

Questo è cronologicamente l'ultimo "capitolo" che scrivo: ho cercato l'ispirazione nei ringraziamenti scritti in triennale, ma in parte mi sembrava di barare, in parte credo sia impossibile che riesca a fare meglio. Saranno giusto un paio di righe, ma spero vi trasmettano la mia gratitudine.

Ringrazio i miei genitori e mia sorella, per il continuo supporto e la fiducia (mal)riposta in me. Grazie a tutti i miei cari, gli amici, i colleghi: personalmente non credo sarei stato in grado di mantenere i rapporti con me stesso così a lungo, quindi oltre a ringraziarvi vi faccio i miei complimenti (tranne ai parenti, a loro tocca per contratto mi pare).

Un ringraziamento particolare va poi al professore Gian Marco Bianchi, che insieme alla professoressa Stefania Falfari, al professore Giulio Cazzoli e al dottorando Valerio Mariani mi hanno consigliato e guidato in un percorso tanto impervio quanto stimolante.

Indice

1	Introduzione.....	1
1.1	Motore in studio.....	1
1.2	Analisi CFD.....	4
1.3	Il blow-by.....	5
1.4	Software utilizzati.....	6
1.4.1	CREO Parametric.....	6
1.4.2	AVL FIRE.....	7
1.4.3	OpenWAM.....	8
1.4.4	MATLAB.....	9
2	Individuazione del dominio fluido.....	10
2.1	CAD di partenza.....	10
2.2	Modifica dei componenti.....	16
2.3	Esportazione in formato STL.....	26
3	Flussaggio.....	27
3.1	Caratteristiche di una mesh per flussaggio.....	29
3.2	Setup della simulazione.....	34
3.3	Risultati.....	35
4	Simulazione di un ciclo trascinato.....	41
4.1	Realizzazione della mesh.....	41
4.2	Modello motore in OpenWAM.....	42
4.2.1	Dati sperimentali.....	43
4.2.2	Risultati del modello OpenWAM.....	44
4.3	Simulazione 3D CFD.....	47
4.4	Risultati.....	49
4.5	Test operativi.....	52
4.5.1	Modifica delle condizioni al contorno ed iniziali.....	52
4.5.2	Modifica della funzione di parete.....	54
4.5.3	Controllo con sensore di pressione.....	55
4.6	Blow-by con boundary di pressione.....	57

5	Simulazione di un ciclo con combustione.....	59
5.1	Realizzazione della mesh.....	59
5.2	Modello motore in OpenWAM.....	60
5.2.1	Dati sperimentali.....	61
5.2.2	Risultati del modello OpenWAM.....	62
5.3	Aspirazione e compressione con iniezione di combustibile.....	65
5.3.1	Risultati.....	68
5.3.2	Variazione della massa iniettata.....	69
5.3.3	Analisi della carica.....	72
5.4	Combustione.....	77
5.5	Risultati.....	78
6	Conclusioni e sviluppi futuri.....	81
7	Bibliografia.....	82

Elenco delle tabelle

Tabella 1: Alzate analizzate e boundary layer utilizzati.....	30
Tabella 2: Dimensione celle per simulazione di flussaggio (lato aspirazione).....	31
Tabella 3: Refinement cilindrico per la simulazione di flussaggio.....	32
Tabella 4: Flussaggio, setup dei principali parametri di simulazione.....	34
Tabella 5: Flussaggio, fattori di sottorilassamento.....	34
Tabella 6: Ciclo trascinato, condizioni iniziali OpenWAM.....	43
Tabella 7: Ciclo trascinato, setup di base.....	47
Tabella 8: Ciclo trascinato, condizioni al contorno ed iniziali.....	48
Tabella 9: Ciclo trascinato, fattori di sottorilassamento.....	48
Tabella 10: Ciclo trascinato, test operativi.....	52
Tabella 11: Ciclo con combustione, parametri della Wiebe.....	60
Tabella 12: Ciclo con combustione, condizioni iniziali OpenWAM.....	60
Tabella 13: Ciclo con combustione, lambda e MFBxx.....	61
Tabella 14: Fase di aspirazione e compressione, setup di base.....	64
Tabella 15: Fase di aspirazione e compressione, condizioni al contorno ed iniziali.....	64
Tabella 16: Fase di aspirazione e compressione, fattori di sottorilassamento.....	66
Tabella 17: Fase di aspirazione e compressione, setup iniettore.....	67
Tabella 18: Casi in studio, SOI = 430° aTDC.....	70
Tabella 19: Valore medio e deviazione standard della turbolenza.....	75
Tabella 20: Valore medio e deviazione standard del lambda.....	76
Tabella 21: Combustione, setup di base.....	77
Tabella 22: Combustione, fattori di sottorilassamento.....	77
Tabella 23: Confronto dati sperimentali e simulazione 3D CFD.....	79

Elenco delle figure

Figura 1: Vista in prospettiva del MCI ad accesso ottico.....	2
Figura 2: Vista in prospettiva del MCI ad accesso ottico (2).....	2
Figura 3: Sezione del motore in corrispondenza dell'unico cilindro operativo.....	3
Figura 4: Domini di un'analisi CFD e FEM.....	4
Figura 5: Blow-by nei MCI.....	5
Figura 6: Schermata di lavoro di CREO Parametric.....	6
Figura 7: Schermata di lavoro di AVL FIRE.....	7
Figura 8: Schermata di lavoro di OpenWAM.....	8
Figura 9: Schermata di lavoro di MATLAB.....	9
Figura 10: Superficie della testa motore.....	10
Figura 11: Collettore di aspirazione.....	11
Figura 12: Collettore di scarico.....	11
Figura 13: Cilindro con accesso ottico.....	12
Figura 14: Esploso del pistone per MCI ad accesso ottico.....	12
Figura 15: Valvole di aspirazione e scarico.....	13
Figura 16: Iniettore GDI.....	13
Figura 17: Candela.....	14
Figura 18: Organi di tenuta.....	14
Figura 19: Meato di passaggio pistone-cilindro.....	15
Figura 20: Primo assembly del motore.....	15
Figura 21: Volume fluido del collettore di aspirazione.....	16
Figura 22: Volume del collettore di scarico.....	16
Figura 23: Volume della camera di combustione del motore.....	18
Figura 24: Modifica della zona d'iniezione, vista frontale.....	18
Figura 25: Modifica della zona d'iniezione, vista dal basso.....	19
Figura 26: Bombatura sulla testa.....	19
Figura 27: Patch sul condotto di aspirazione.....	20
Figura 28: Patch sul condotto di aspirazione (2).....	20
Figura 29: Rampa sul condotto di scarico.....	21
Figura 30: Solido dei condotti di aspirazione e testa.....	21
Figura 31: Assemblaggio dei condotti di aspirazione sulla testa.....	22
Figura 32: Sottrazione booleana del volume dell'iniettore.....	22
Figura 33: Aggiunta del volume tra i fianchi del pistone ed il cilindro.....	23
Figura 34: Modifica della sedi valvole.....	23
Figura 35: Aggiunta dei volumi dei collettori di aspirazione e scarico.....	24
Figura 36: Sottrazione booleana del volume delle valvole.....	24
Figura 37: Sottrazione booleana del volume della candela.....	25
Figura 38: Geometria finale del motore.....	25
Figura 39: STL del dominio fluido del motore in studio.....	26
Figura 40: Area di passaggio di riferimento dei condotti di aspirazione.....	28
Figura 41: Area di passaggio di riferimento dei condotti di scarico.....	28

Figura 42: CAD per il flussaggio del lato d'aspirazione.....	29
Figura 43: CAD per il flussaggio del lato di scarico.....	30
Figura 44: Legge di alzata delle valvole.....	31
Figura 45: Refinement cilindrico per la simulazione di flussaggio.....	32
Figura 46: Taglio valvola, alzata 1 mm, 4 boundary layer.....	33
Figura 47: Taglio valvola, alzata 6 mm, 5 boundary layer.....	33
Figura 48: Risultati della simulazione di flussaggio (lato aspirazione).....	35
Figura 49: Flussaggio lato aspirazione, alzata 2 mm, campo di velocità.....	36
Figura 50: Flussaggio lato aspirazione, alzata 4 mm, campo di velocità.....	36
Figura 51: Flussaggio lato aspirazione, alzata 8 mm, campo di velocità.....	37
Figura 52: Flussaggio lato aspirazione, streamlines.....	37
Figura 53: Risultati della simulazione di flussaggio (lato scarico).....	38
Figura 54: Flussaggio lato scarico, alzata 2 mm, campo di velocità.....	39
Figura 55: Flussaggio lato scarico, alzata 4 mm, campo di velocità.....	39
Figura 56: Flussaggio lato scarico, alzata 7 mm, campo di velocità.....	39
Figura 57: Flussaggio lato scarico, streamlines.....	40
Figura 58: Schema a blocchi del motore ad accesso ottico.....	42
Figura 59: Ciclo trascinato, traccia sperimentale di pressione.....	43
Figura 60: Risultati OpenWAM, pressioni e portate.....	44
Figura 61: Risultati OpenWAM, temperature e portate.....	45
Figura 62: Risultati OpenWAM, temperature e portate (2).....	45
Figura 63: Risultati OpenWAM, portata in ingresso ed in uscita.....	46
Figura 64: Ciclo trascinato, portata di blow-by.....	48
Figura 65: Ciclo trascinato, traccia di pressione.....	49
Figura 66: Ciclo trascinato, diagramma di indicatore.....	49
Figura 67: Ciclo trascinato, massa intrappolata in camera.....	50
Figura 68: Ciclo trascinato, test operativi, dettaglio diagramma d'indicatore.....	52
Figura 69: Test operativi, Caso 1, traccia di pressione.....	53
Figura 70: Test operativi, Caso 2-3, traccia di pressione.....	54
Figura 71: Test operativi, Caso 4-5, traccia di pressione.....	54
Figura 72: Test operativi, Caso 6, traccia di pressione.....	55
Figura 73: Test operativi, Caso 7, traccia di pressione.....	56
Figura 74: Ciclo trascinato, BND di pressione, portate in ingresso ed uscita.....	57
Figura 75: Ciclo trascinato, BND di pressione, traccia di pressione.....	57
Figura 76: Ciclo trascinato, BND di pressione, diagramma di indicatore.....	58
Figura 77: Ciclo trascinato, BND di pressione, massa intrappolata in camera.....	58
Figura 78: Dettaglio refinement di candela e iniettore.....	59
Figura 79: Ciclo con combustione, traccia sperimentale di pressione.....	61
Figura 80: Ciclo con combustione, traccia sperimentale della MFB.....	62
Figura 81: Ciclo con combustione, risultati OpenWAM, pressione e portate.....	63
Figura 82: Ciclo con combustione, risultati OpenWAM, temperature e portate.....	63
Figura 83: Ciclo con combustione, risultati OpenWAM, portate in ingresso e uscita.....	64
Figura 84: Fase di aspirazione e compressione, boundary di temperatura.....	66
Figura 85: Fase di aspirazione e compressione, boundary di pressione.....	67

Figura 86: Direzione getti dell'iniettore.....	67
Figura 87: Andamento di lambda.....	68
Figura 88: Massa di combustibile evaporata.....	68
Figura 89: Wallfilm.....	69
Figura 90: Andamento massa in camera con combustibile iniettato.....	70
Figura 91: Confronto massa di combustibile evaporata.....	71
Figura 92: Confronto wallfilm.....	71
Figura 93: Confronto lambda.....	72
Figura 94: Tumble ed intensità di turbolenza.....	73
Figura 95: Componenti del moto di tumble.....	73
Figura 96: Volumi di controllo.....	74
Figura 97: Andamento della turbolenza in camera.....	74
Figura 98: Distribuzione 3D della turbolenza a SA.....	75
Figura 99: Andamento del lambda in camera.....	75
Figura 100: Distribuzione 3D del lambda a SA.....	76
Figura 101: Combustione, traccia di pressione.....	78
Figura 102: Andamento MFB.....	78
Figura 103: Campo 3D del lambda.....	79
Figura 104: Campo 3D della velocità laminare di fiamma.....	80

1 - Introduzione

1.1 - Motore in studio

Il motore a combustione interna (MCI) è, e con tutta probabilità rimarrà nel futuro prossimo, il motore più utilizzato nell'ambito del trasporto, sia per quanto riguarda i cosiddetti light-duty vehicle (LDV, veicoli per lo più ad uso personale), che per quanto riguarda gli heavy-duty vehicle (HDV, veicoli adibiti per lo più al trasporto di materie prime, e.g. autoarticolati, camion, ...). La necessità di continuare ad utilizzare tali mezzi, unita alla consapevolezza ed alla crescente attenzione rivolta alle emissioni di inquinanti diretti ed anidride carbonica, ha spinto l'evoluzione dei MCI sempre con maggior urgenza, alla ricerca di soluzioni più efficienti, più sostenibili, meno costose. Gli studi sperimentali al banco e quelli numerici hanno da sempre lavorato in maniera sinergica alla ricerca di tali soluzioni, ma le numerose nuove tecnologie introdotte richiedono un nuovo studio nella morfologia dei fenomeni dentro camera col fine di sviluppare modelli ad hoc da integrare nelle simulazioni. I motori ad accesso ottico si presentano come chiave di volta del problema, ma, data la loro natura e i materiali impiegati, hanno un comportamento diverso da quelli commerciali, e richiedono quindi una minuziosa caratterizzazione.

La presente tesi ha come obiettivo la caratterizzazione completa di un motore ad accesso ottico 4 cilindri ad accensione comandata con portata di blow-by non trascurabile; tale motore è presente nei laboratori dell'ente CNR-STEM con sede a Napoli.

Un motore ad accesso ottico è un tipo di MCI che, come si intuisce dal nome, permette di osservare cosa sta succedendo all'interno della camera di combustione durante tutto l'arco del ciclo; per meglio comprendere il funzionamento ed il layout di questo motore sono riportati alcuni render 3D dello stesso nelle Figure 1-3. In Figura 1 è mostrata una vista in prospettiva del suddetto motore: sulla destra in azzurro sono visibili i condotti di aspirazione, al centro si nota la testata, sulla sinistra i condotti di scarico in rosso. Solo uno dei cilindri è effettivamente collegato e operativo. Si nota inoltre sulla destra la telecamera che, tramite uno specchio posizionato nel cilindro, registrerà cosa avviene all'interno della camera di combustione. Si tratta di un motore che permette di ispezionare cosa succede proprio durante la combustione: esso è quindi uno strumento molto importante per continuare ad ottimizzare il funzionamento di un MCI. In Figura 2 vediamo l'angolo opposto rispetto alla figura precedente. Da questa angolazione è ben visibile il collettore di aspirazione in alto ed il suo collegamento alla testata, come anche il foro di passaggio presente nel cilindro che permette alla videocamera di registrare la combustione in camera. In Figura 3 sono riconoscibili tutti i componenti fondamentali di un MCI: catena di aspirazione sulla destra, candela e iniettore che si affacciano in camera di combustione, valvole di aspirazione e scarico con relative camme, catena di scarico sulla sinistra, distribuzione sul retro.

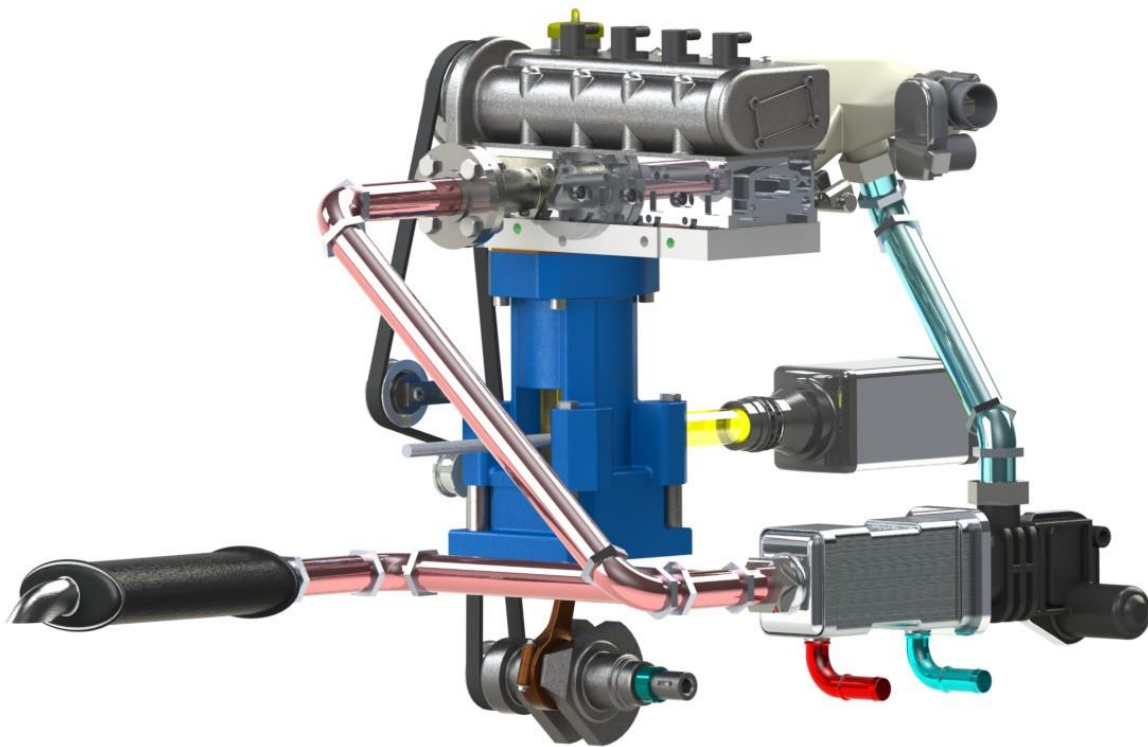


Fig. 1: Vista in prospettiva del MCI ad accesso ottico

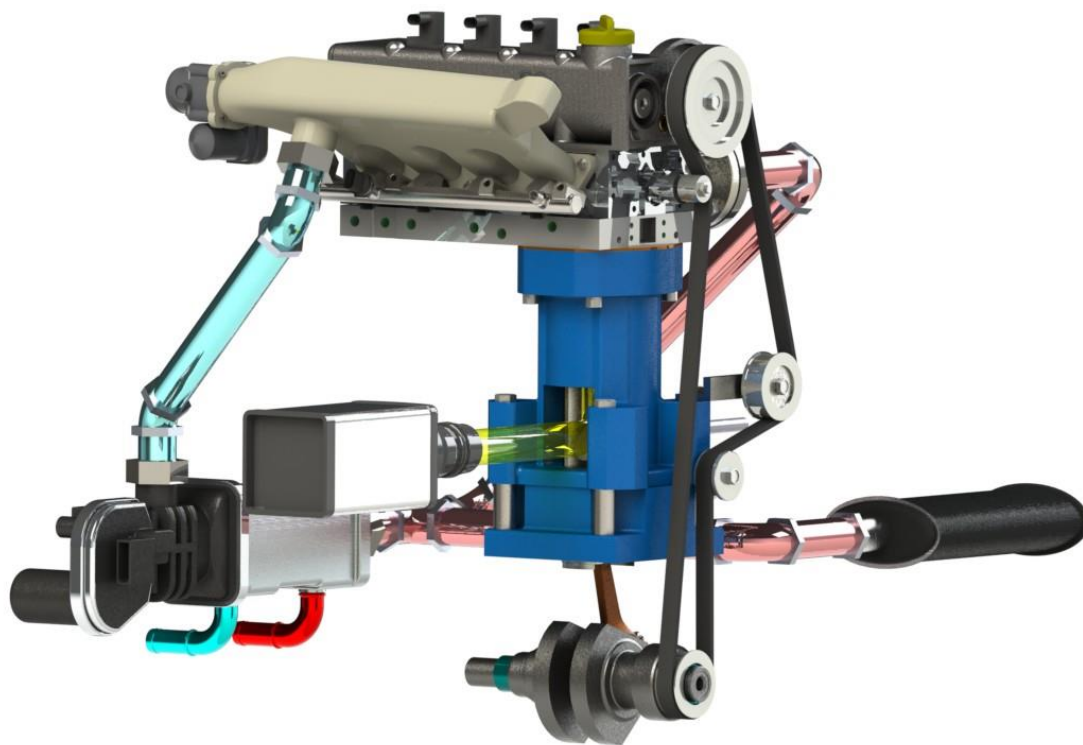


Fig. 2: Vista in prospettiva del MCI ad accesso ottico (2)

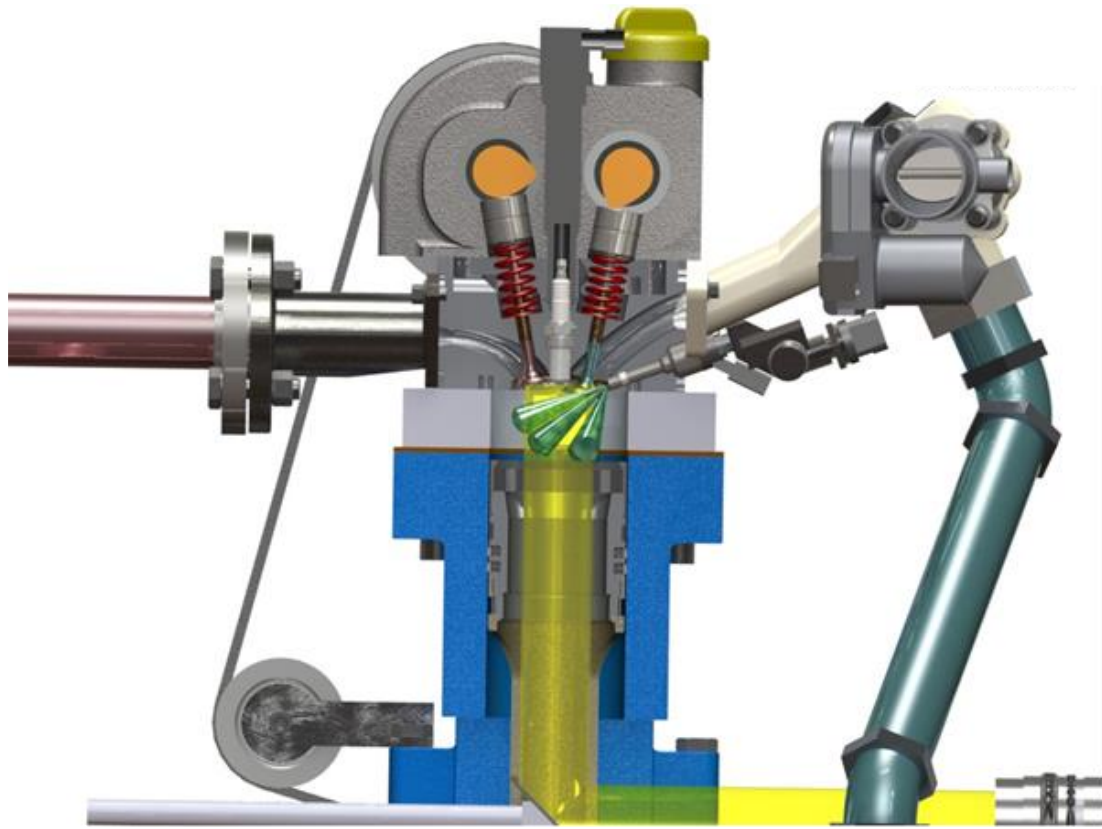


Fig. 3: Sezione del motore in corrispondenza dell'unico cilindro operativo

1.2- Analisi CFD

L'analisi CFD (Computational Fluid-Dynamics, fluidodinamica computazionale) si occupa di simulare problemi complessi in cui un fluido interagisce con un altro fluido, un solido, un gas. La simulazione risolve le equazioni di continuità, quantità di moto ed energia, fornendo una soluzione approssimata del problema; il grado di approssimazione (che sarà sempre e comunque presente) dipende dalla qualità del setup in termini di mesh e modelli utilizzati (questi temi saranno approfonditi meglio in seguito, nel corso dei relativi capitoli). Il vantaggio principale di un tale approccio rispetto alla creazione di un prototipo fisico della macchina in studio risiede in due motivi principali:

- Possibilità di analizzare nel dettaglio l'andamento e i campi 3D di grandezze termofluidodinamiche non altrimenti monitorabili
- Riduzione di tempi e costi di test di una macchina (al prezzo di una approssimazione più o meno grande, come detto in precedenza)

L'analisi CFD si divide in tre fasi:

- Pre-processing: viene inquadrato il problema che si vuole analizzare, si scelgono le feature da mantenere e quelle da rimuovere, si realizza la mesh, si attivano i modelli, si completa il setup della simulazione;
- Solving: impostati i calcoli, la potenza computazionale impiegata e il software/solutore scelto influenzano fortemente i tempi richiesti;
- Post-processing: si studiano gli output del programma in termini di risultati 2D e 3D; le grandezze calcolate sono tutte quelle specificate nella fase di pre-processing.

La Figura 4 mette in risalto la differenza fondamentale fra un'analisi CFD ed una FEM (finite element method). Sulla sinistra un condotto di passaggio, sulla destra i due domini di interesse presenti: in rosso il dominio fluido (usato nella CFD), in giallo il dominio solido (usato nella FEM).

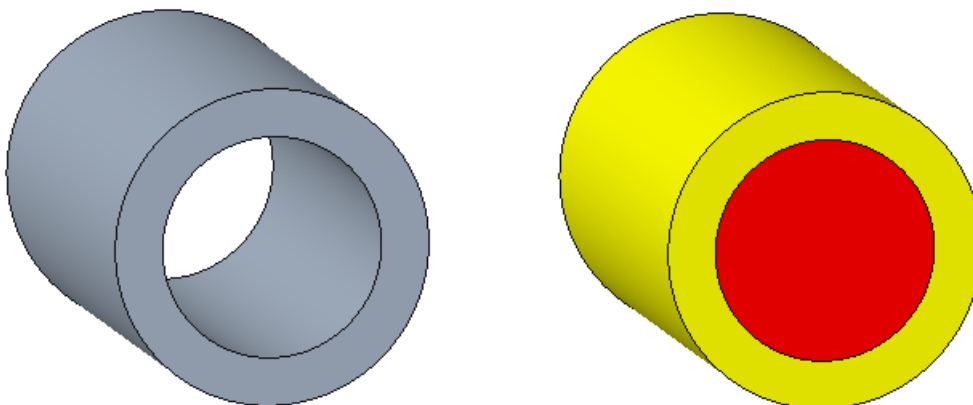


Fig. 4: Domini di un'analisi CFD e FEM

1.3- Il blow-by

Un importante limite di questo motore, che si tradurrà successivamente in un problema di integrazione nella simulazione CFD, è il fenomeno del blow-by. Con portata di blow-by si fa riferimento alla portata di fuga sempre presente tra cilindro e pistone. La Figura 5 mostra chiaramente tale fenomeno: a valvole chiuse la massa intrappolata in camera di combustione non dovrebbe aver modo di fuggire, ma date le alte pressioni raggiunte quello che si vede sperimentalmente è una limitata portata ai fianchi del pistone.

Solitamente gli organi di tenuta montati sui fianchi del pistone riescono a ridurre tale portata fino a renderla trascurabile, ma ciò non è vero nel caso di questo motore ottico: per avere un riferimento numerico è stato valutato che, dal momento in cui si chiudono le valvole di aspirazione (IVC, intake valve closing) al momento in cui il pistone raggiunge il punto più vicino alla testa (TDC, top dead center) per poi invertire il moto, quasi il 20% della massa intrappolata è uscita dalla camera. Quello che può sfuggire ad una prima analisi è che non è uscita solo aria, ma bensì una miscela di aria e carburante, il che crea in camera una carica con un titolo diverso rispetto a quello di progetto (senza tener conto di tale fenomeno). Va sicuramente fatto notare che parte di quella stessa massa persa rientrerà in camera durante la fase di espansione (è stato stimato che al netto a fine ciclo si ha una massa persa di circa il 6% rispetto ad IVC), ma il problema di miscelamento e condizioni di combustione permane in quanto sacche più o meno ricche di combustibile entrano in camera in istanti più avanzati del ciclo, il che potrebbe causare mancata combustione di queste masse di combustibile o loro tardiva combustione. Come già detto in precedenza, tale fenomeno è solitamente trascurabile nei motori commerciali e la sua corretta implementazione e verifica nel software CFD ha mostrato non pochi ostacoli.

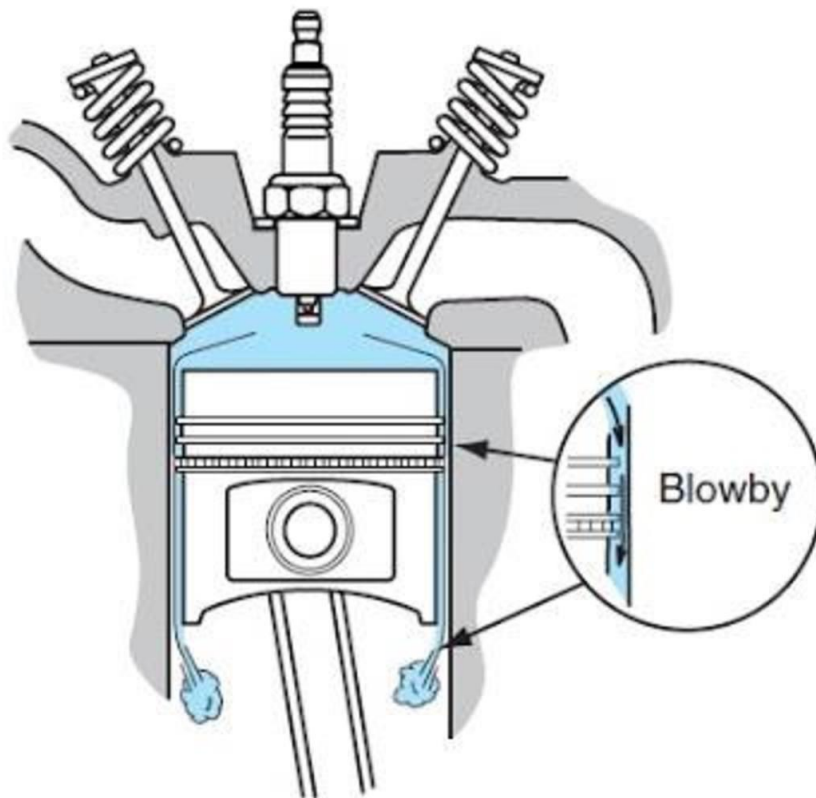


Fig. 5: Blow-by nei MCI

1.4 - Software utilizzati

1.4.1 - CREO Parametric

Il software “CREO Parametric” rientra nel pacchetto offerto da “PTC CREO”, uno dei programmi CAD (Computer Aided Design) più diffusi al mondo: si tratta di un software per il design di componenti 3D, le cui feature sono definite una in catena all'altra e dipendono fortemente dalle precedenti (proprio perché è un design di tipo parametrico; opposta è invece la modellazione diretta, in cui l'utente può modificare più o meno a piacere una feature, senza che questa vada ad influenzare le altre).

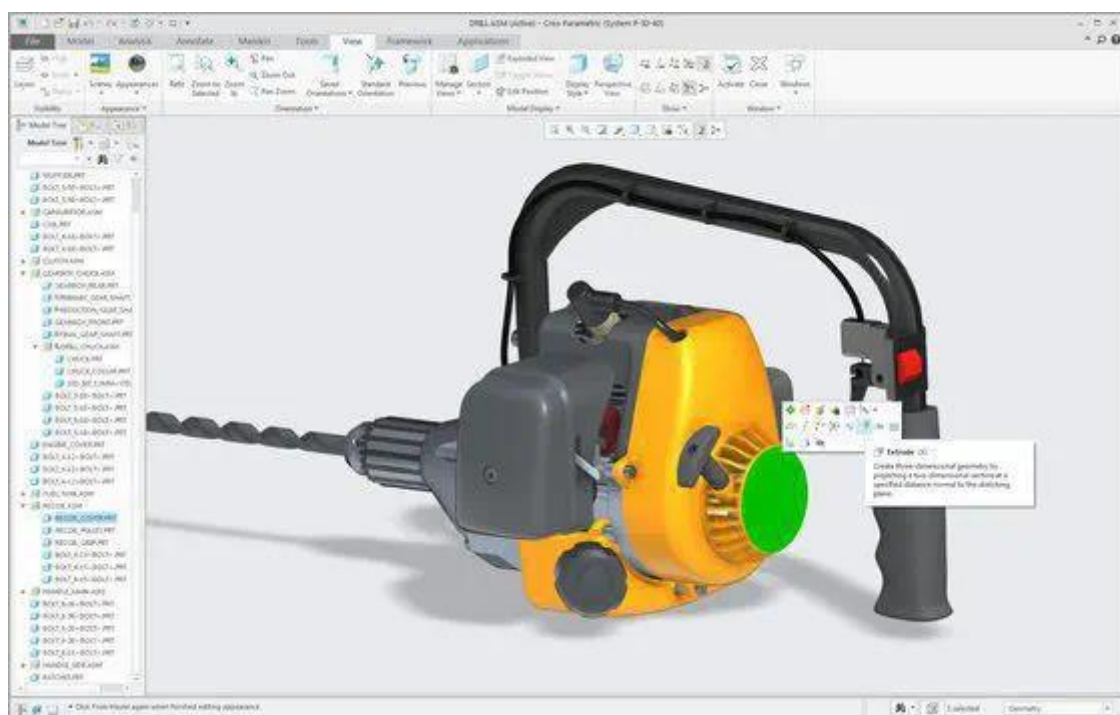


Fig. 6: Schermata di lavoro di CREO Parametric

In Figura 6 è visualizzata la schermata di lavoro del software: in alto è presente la barra multifunzione con tutte le varie opzioni di modellazione, sulla sinistra vediamo l'albero delle feature, che rappresenta la “storia” del modello (se andiamo a rigenerarlo, il software andrà a ripercorrere in ordine, una dopo l'altra, tutte le righe presenti nell'albero).

Il software è stato utilizzato per ricavare il dominio fluido del motore in studio, il quale è stato poi esportato nel formato STL (stereolithography) e caricato in AVL FIRE.

1.4.2 - AVL FIRE

Il software “AVL FIRE” è stato utilizzato per l’analisi CFD del motore in studio.

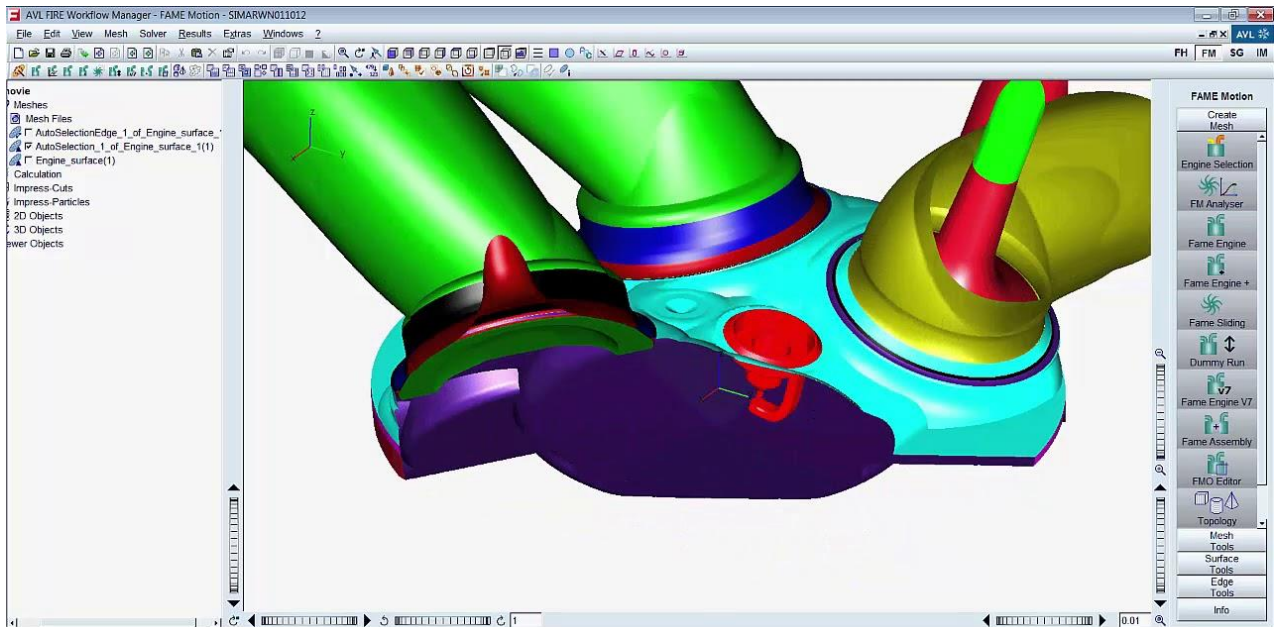


Fig. 7: Schermata di lavoro di AVL FIRE

In Figura 7 è visualizzata la schermata di lavoro del software: sulla sinistra sono presenti gli elementi caricati nel campo di lavoro, il modulo per il setup delle simulazioni, il postpro per i calcoli terminati; sulla destra i vari menù a tendina permettono di lavorare e modificare la mesh secondo le proprie esigenze.

Il software è stato utilizzato (sia per la fase iniziale di flussaggio sia per la successiva con ciclo trascinato e con combustione) per la realizzazione delle mesh (con gli applicativi FAME HEXA per le mesh statiche e FAME ENGINE PLUS per le mesh dinamiche), il setup delle simulazioni, l’analisi dei campi 3D in output.

1.4.3 - OpenWAM

Il software "OpenWAM" è un codice open-source monodimensionale sviluppato dall'Università Politecnica di Valencia con l'obiettivo di risolvere problemi termofluidodinamici in un circuito creato dall'utente.

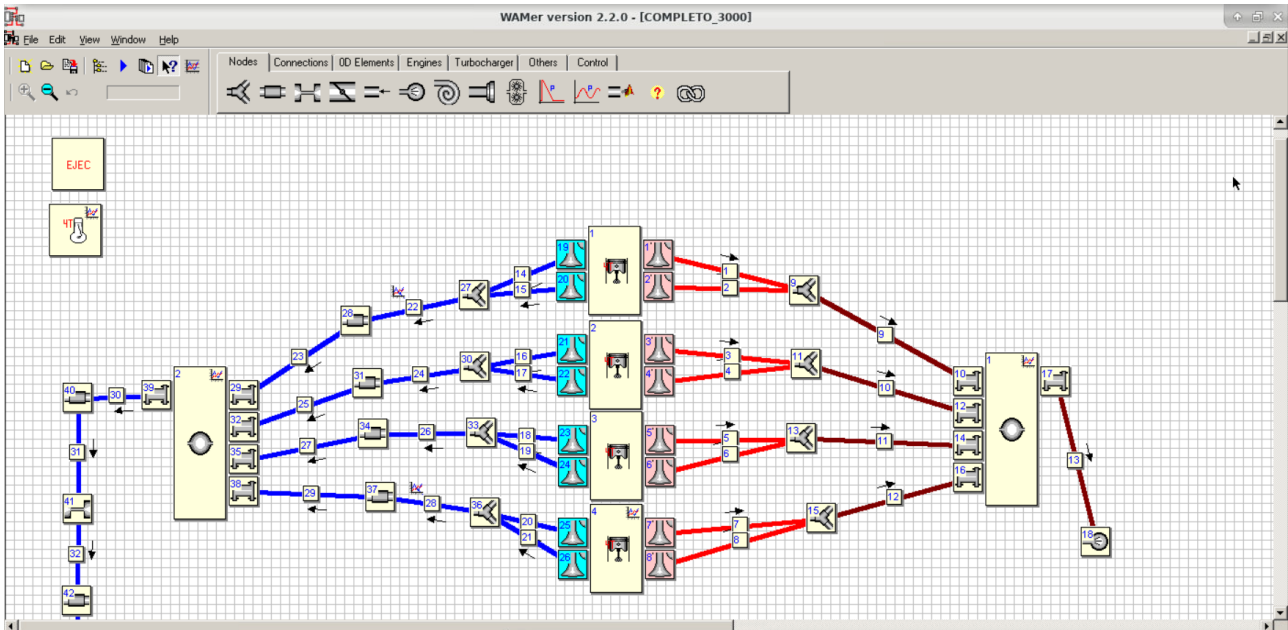


Fig. 8: Schermata di lavoro di OpenWAM

In Figura 8 è visualizzata la schermata di lavoro del software: in alto è visibile la barra di selezione dei componenti, al centro lo schema rappresentativo di un motore 4 cilindri.

Il software è stato utilizzato per ricavare le condizioni al contorno e iniziali per il ciclo trascinato e con combustione.

1.4.4 - MATLAB

Il software “MATLAB” è una piattaforma di programmazione utilizzata per:

- Analizzare i dati
- Sviluppare algoritmi
- Creare modelli

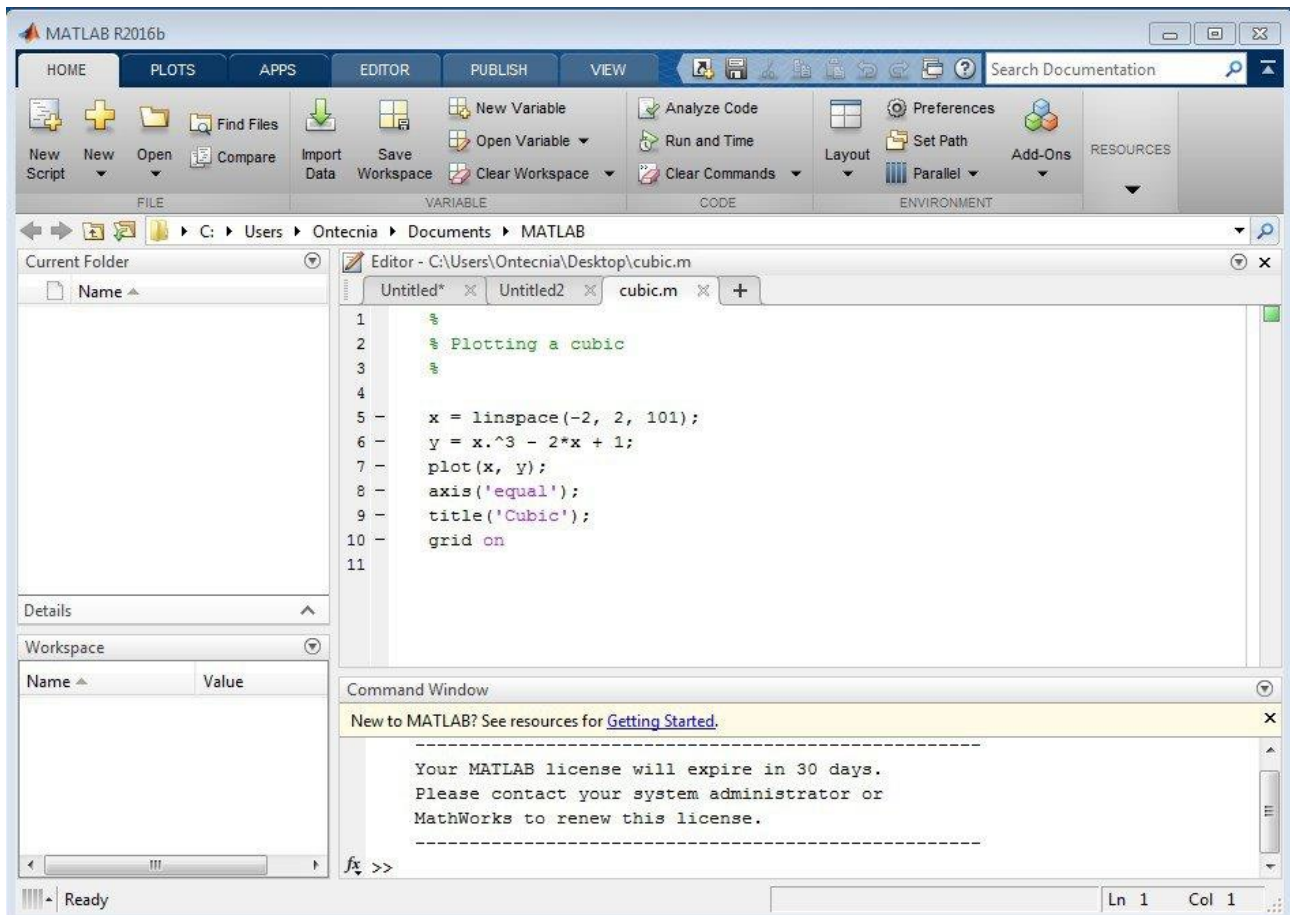


Fig. 9: Schermata di lavoro di MATLAB

In Figura 9 è visualizzata la schermata di lavoro del software: in alto è presente la barra multifunzione con le varie opzioni di programmazione, al centro il corpo dello script, in basso il workspace (dove vengono salvate le variabili utilizzate dal programma) e la command window (dove è possibile far eseguire comandi senza dover prima creare uno script).

Il software è stato utilizzato per l'analisi degli output 2D da AVL FIRE e OpenWAM.

2 - Individuazione del dominio fluido

Per poter realizzare una mesh del motore in esame e successivamente settare una simulazione, si ha bisogno per prima cosa di definire il “negativo” del motore stesso, ossia il dominio all’interno del quale si può muovere il fluido. Per fare ciò si è partiti da alcuni file CAD realizzati in SOLIDWORKS, i quali sono poi stati importati in CREO, modificati, assemblati ed infine esportati in formato STL, utile per l’importazione in un software CFD, in questa tesi, AVL FIRE.

2.1 - CAD di partenza

I file CAD di partenza sono stati forniti dall’ente CNR-STEM sotto forma di archivio SOLIDWORKS. A seguito di una prima scrematura dei pezzi utili per la simulazione CFD e di una pulizia grossolana di questi ultimi con lo scopo di eliminare dettagli costruttivi fuori dall’applicazione CFD (e.g., dadi, bulloni, testata motore), i pezzi utilizzati sono i seguenti:

- L’unione di testa motore, sede iniettore, sede candela, sede valvole e condotti (in Figura 10), estratta come selezione di superfici dal CAD della testata del motore;

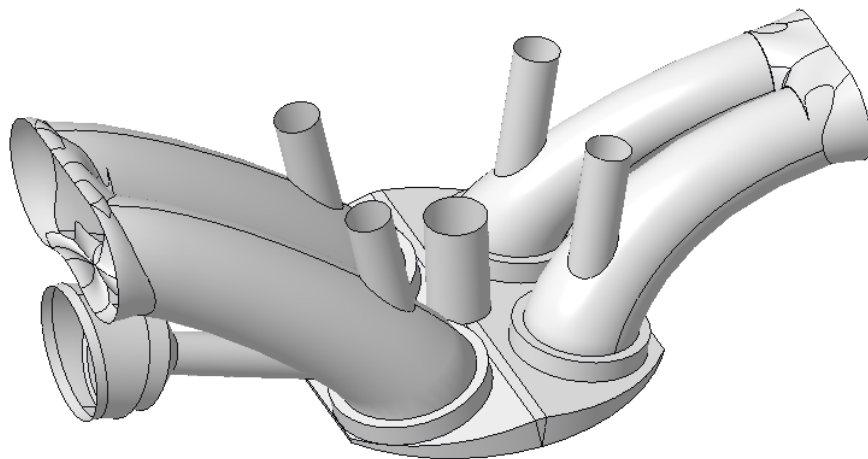


Fig. 10: Superficie della testa motore

- I collettori di aspirazione e scarico, rispettivamente in Figura 11 e 12;

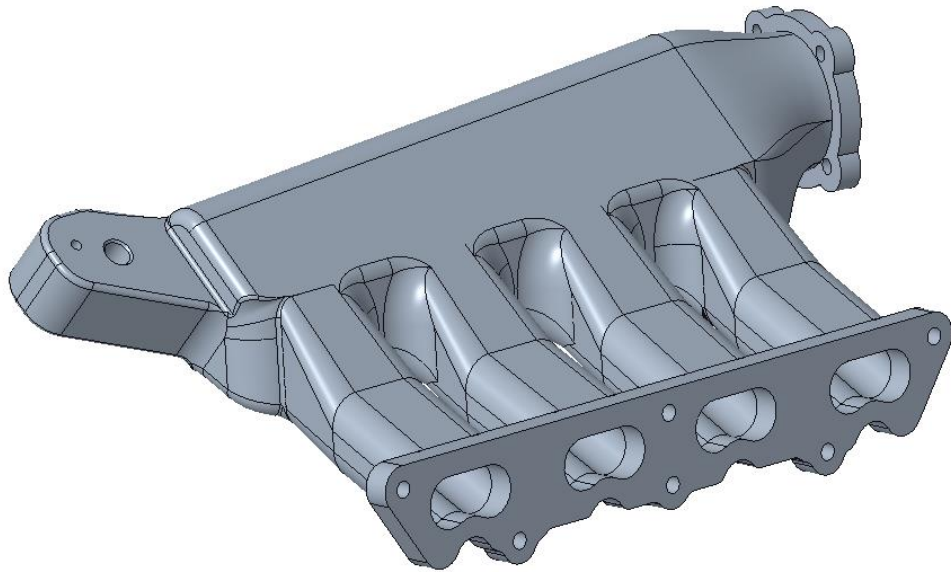


Fig. 11: Collettore di aspirazione

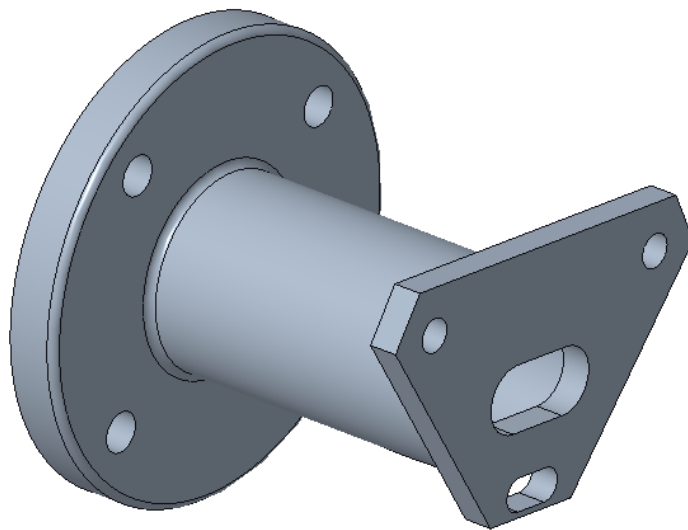


Fig. 12: Collettore di scarico

- Il cilindro in Figura 13, in cui è importante sottolineare la presenza della sezione di passaggio sulla base che permette l'accesso ottico alla camera di combustione;

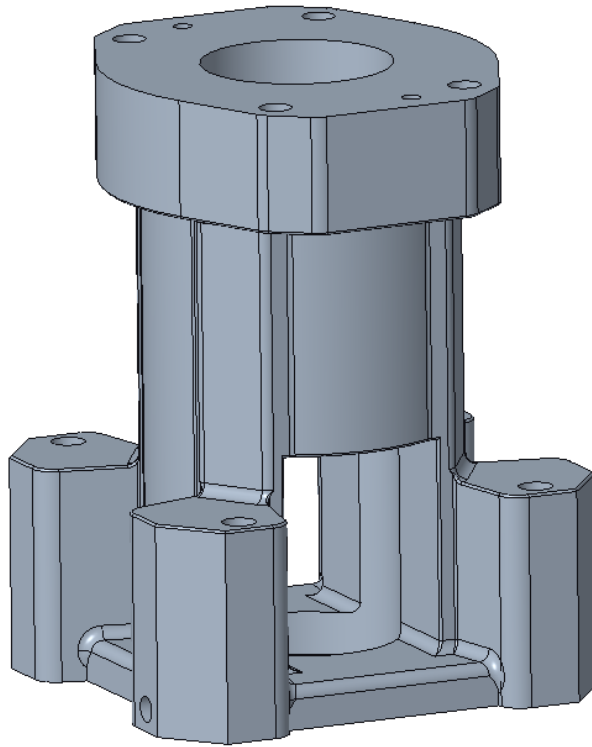


Fig. 13: Cilindro con accesso ottico

- Il pistone, in cui nell'esploso di Figura 14 sono visibili dall'alto: ghiera di chiusura, finestra in quarzo e corpo del pistone;

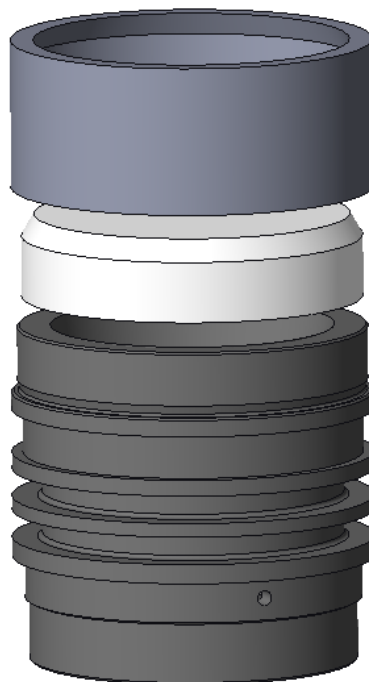


Fig. 14: Esploso del pistone per MCI ad accesso ottico

- Le valvole di aspirazione (sx) e scarico (dx) in Figura 15;

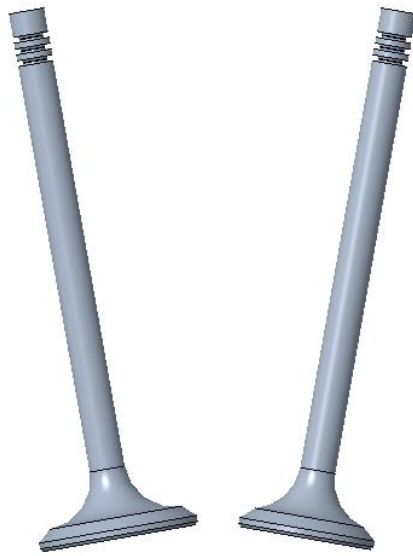


Fig. 15: Valvole di aspirazione e scarico

- Iniettore GDI e candela a singolo elettrodo, rispettivamente in Figura 16 e Figura 17 (le quote sono in mm);

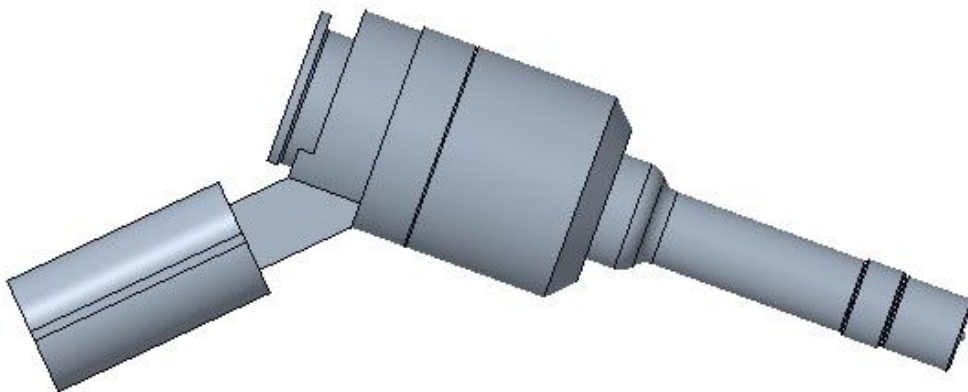


Fig. 16: Iniettore GDI

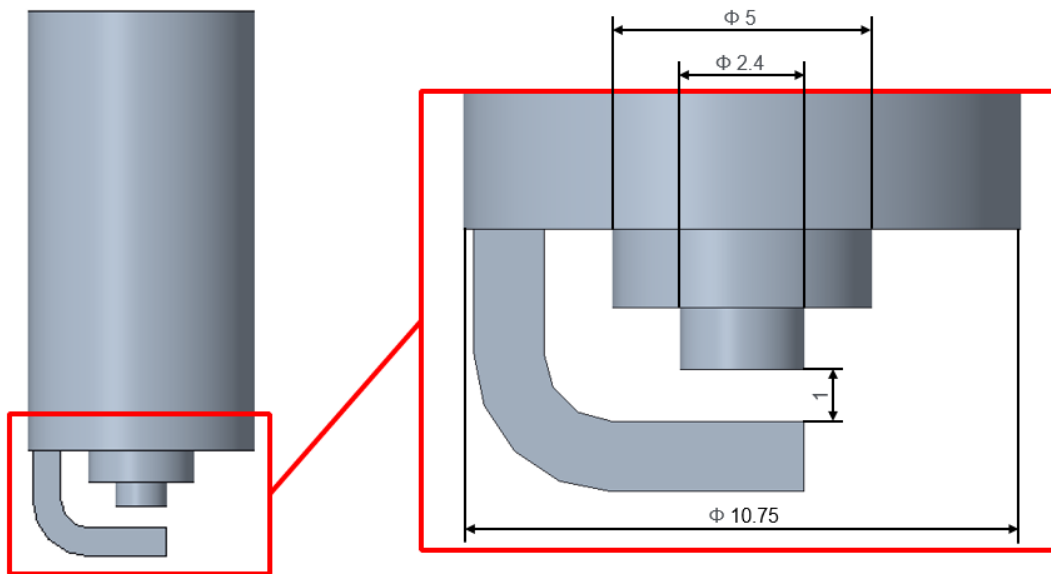


Fig. 17: Candela

- Organi di tenuta montati sui fianchi del pistone (in Figura 18), partendo dall'alto: fascia guida in PTFE, o-ring in gomma, fascia in Teflon-Bronzo;

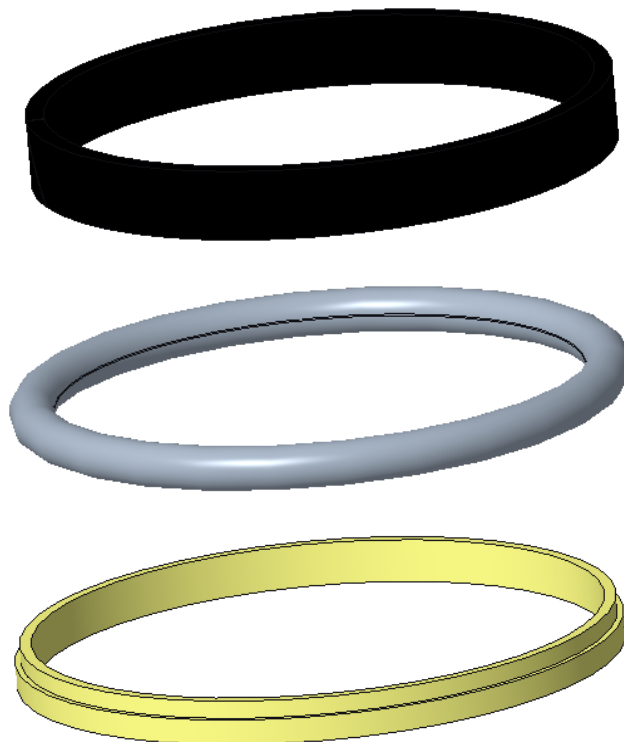


Fig. 18: Organi di tenuta

Dall'assemblaggio di cilindro e pistone è stata ricavata una superficie, visibile in Figura 19, la quale rappresenta i meati di passaggio tra pistone e cilindro. Al volume racchiuso da tale superficie va poi sottratto tramite una operazione booleana il volume occupato dagli organi di tenuta, i quali sono alloggiati nei vuoti toroidali visibili in periferia. Il volume risultante è utile nel definire alcune grandezze necessarie a valutare la portata di blow-by del motore.

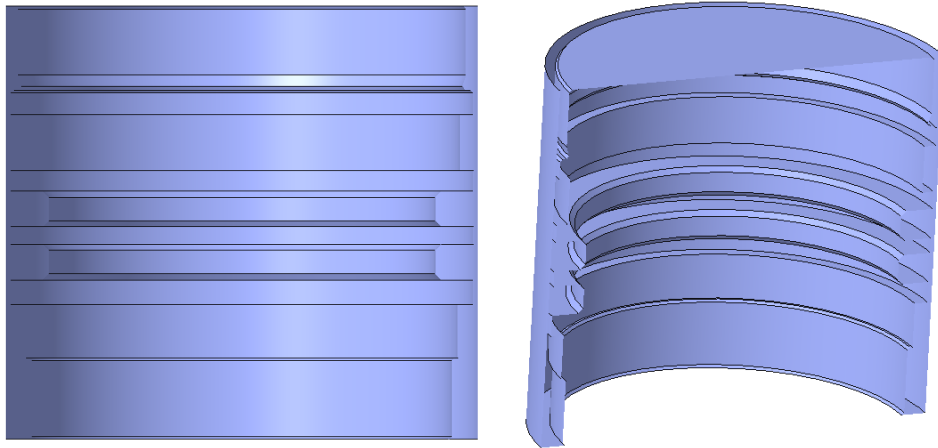


Fig. 19: Meato di passaggio pistone-cilindro

Si riporta infine in Figura 20 uno screen del primo assembly realizzato del motore, in modo da avere un'idea di massima del suo layout. I componenti solidi rappresentati in grigio, le superfici sono in bianco. Le striature che si notano su cilindro, candela e iniettore sono dovute al fatto che i componenti montati hanno lo stesso diametro delle loro sedi, quindi il software segnala il "problema" in questo modo.

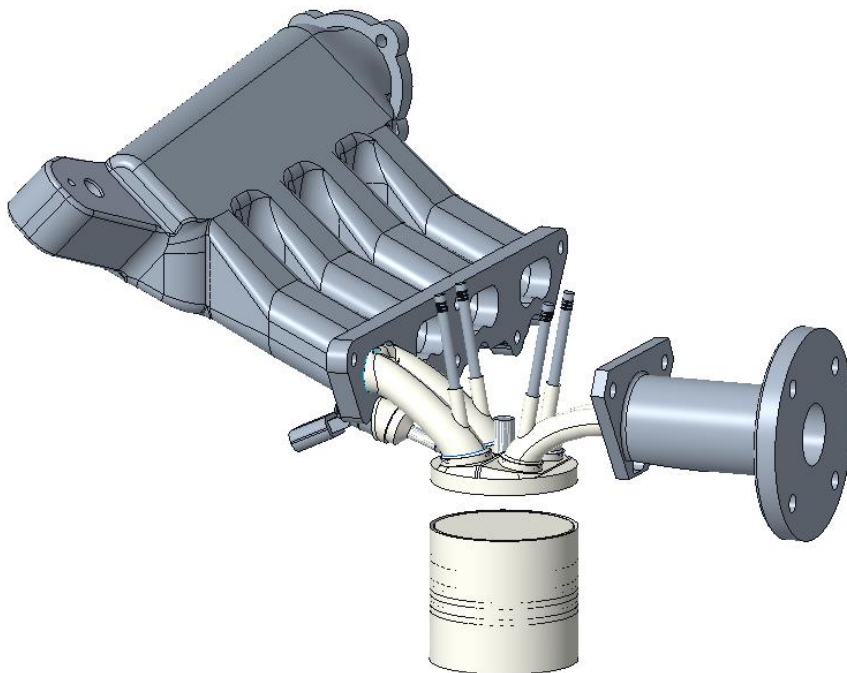


Fig. 20: Primo assembly del motore

2.2 - Modifica dei componenti

Riordinati i modelli disponibili, si è passati alla modifica di quest'ultimi e alla realizzazione del CAD rappresentativo del dominio utile al fluido.

Primo passo è stata l'estrazione dei due collettori, ottenuti con sottrazione booleana dei modelli di partenza, il risultato è visibile in Figura 21 e 22. Per quanto riguarda il collettore di aspirazione, si è deciso di tagliare il CAD all'ultima parte del collettore stesso, quello che lo collega al condotto di aspirazione e, quindi, alla camera di combustione. La presenza di queste zone nell'analisi CFD (si specifica che più geometria includiamo, più la mesh sarà pesante, più il calcolo sarà oneroso) è giustificata dal fatto che sono utili nella regolazione del flusso e delle eventuali onde di pressione che si possono creare nei condotti.

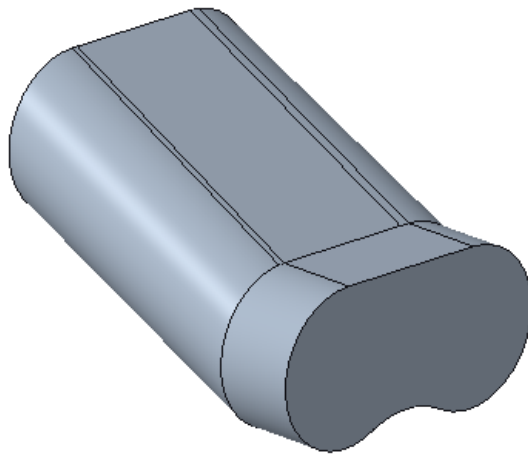


Fig. 21: Volume fluido del collettore di aspirazione

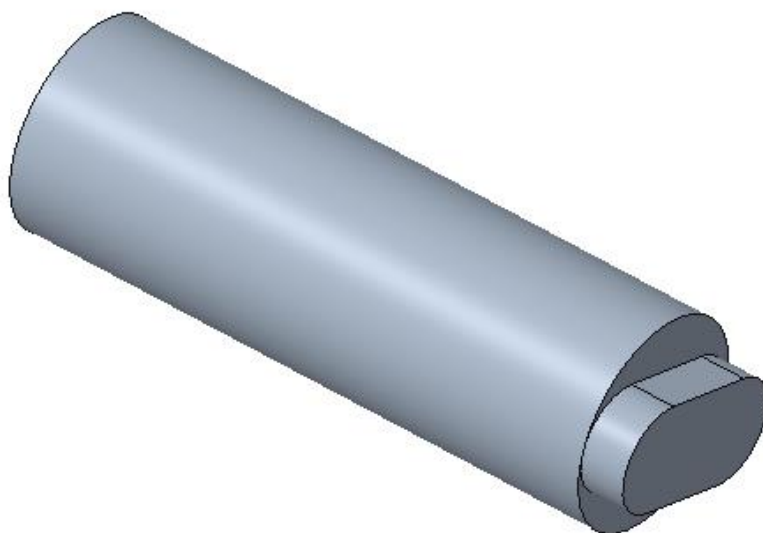


Fig. 22: Volume del collettore di scarico

La realizzazione della testa e dei condotti è stata sicuramente la parte più impegnativa di questa prima fase del lavoro. Andando per step, le attività portate a termine sono state:

- calcolo e aggiunta del volume della camera di combustione in testa al pistone
- modifica della superficie di partenza con aggiunta di feature chiaramente visibili da alcune fotografie del motore reale ma assenti nel CAD originale
- correzione, chiusura e solidificazione della superficie
- aggiunta del meato di passaggio (ai fianchi del pistone) responsabile del fenomeno di blow-by (solitamente tale fenomeno è trascurabile nelle simulazioni CFD, ma nel caso in considerazione la portata in uscita non è marginale), candela, iniettore, valvole e relative sedi

Il calcolo del volume della camera di combustione è stato realizzato utilizzando la formula classica del rapporto di compressione:

$$RC = \frac{V_0 + V_D}{V_0}$$

Dove:

RC : rapporto di compressione [-]

V_0 : volume della camera di combustione [mm³]

V_D : cilindrata [mm³]

E' possibile ricavare la seguente formula:

$$V_0 = \frac{V_D}{RC - 1}$$

Data la geometria del motore (in termini di alesaggio e corsa), è possibile determinare tale volume rimanente in testa al pistone quando ci si trova al punto morto superiore (TDC); inoltre, il cielo del pistone ha una geometria estremamente semplificata, quindi il volume della camera di combustione si traduce in un cilindro da aggiungere sotto la testa (si veda Figura 23). Cambiando l'altezza di questo cilindro è possibile cambiare il rapporto di compressione (RC) del motore. Ciò naturalmente non è sempre vero: solitamente si lavora con geometrie molto più articolate, assenti in questo caso per via della testa in quarzo. Allo stesso modo sono anche assenti le caratteristiche tasche valvola: si tratta di scavi sul cielo del pistone che evitano un eventuale impatto tra le valvole e il pistone in fase di risalita (si pensi ad una condizione di incrocio valvole, in cui lo scarico sta terminando, la fase di aspirazione sta per iniziare e il pistone è molto vicino al TDC).

Per quanto riguarda le feature ridisegnate per rendere più realistico il dominio fluido, è stata aggiunta una bombatura in testa e modificato l'imbocco dell'iniettore; in quest'ultimo, il motivo che ha spinto a fare tale modifica è stata la volontà di dare all'iniettore stesso più spazio possibile. I confronti tra la geometria di partenza e il risultato finale sono mostrati nelle Figure 24-26. In particolare in Figura 24 è rappresentata una vista frontale della superficie su cui si appoggia l'iniettore. Il suo posizionamento e la fasatura dell'iniezione (che avviene durante la fase di aspirazione, mentre attraversiamo l'alzata massima delle valvole) rischiano di portare ad una grossa quantità di wall impingement (ossia carburante che colpisce le pareti, non riesce ad evaporare velocemente e rischia di creare delle sacche molto ricche, con conseguente peggioramento delle condizioni di combustione), quindi si è cercato di dargli più spazio possibile.

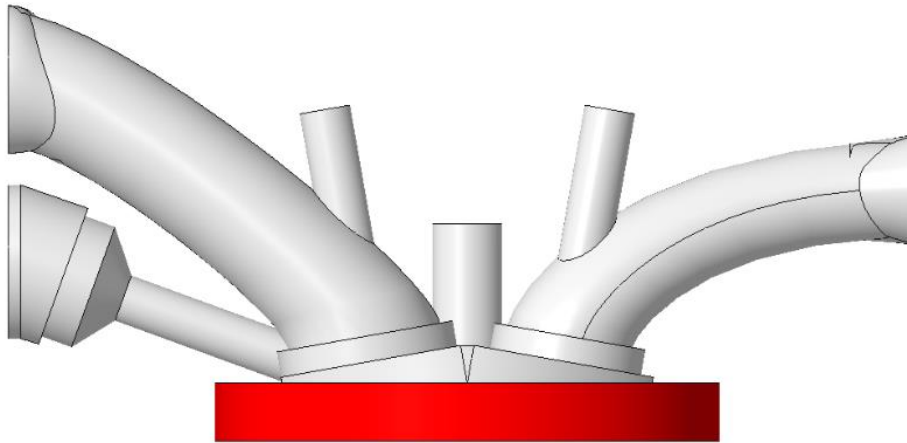
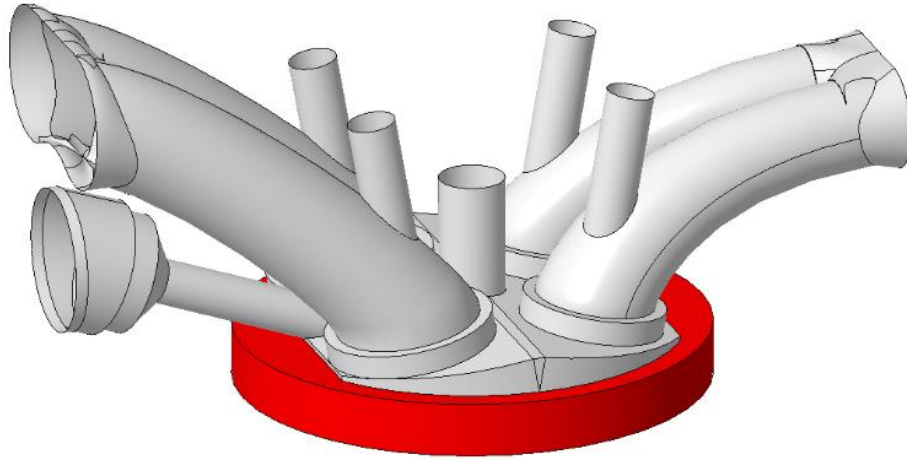


Fig. 23: Volume della camera di combustione del motore

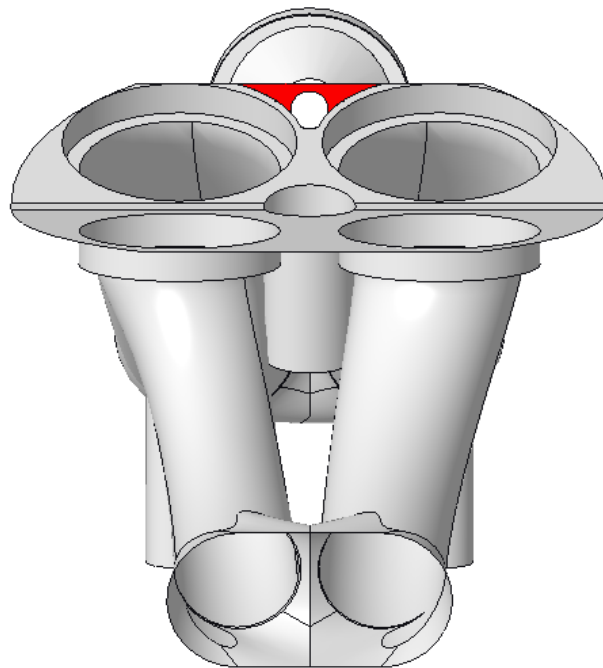


Fig. 24: Modifica della zona d'iniezione, vista frontale

Passando alla Figura 25, con una vista dal basso è visibile la modifica fatta alla geometria di imbocco in modo da renderlo il più graduale possibile. Modifica secondaria apportata è stata quella del diametro dell'iniettore, in quanto quello usato al CNR aveva un diametro minore rispetto a quello inizialmente rappresentato nel CAD.

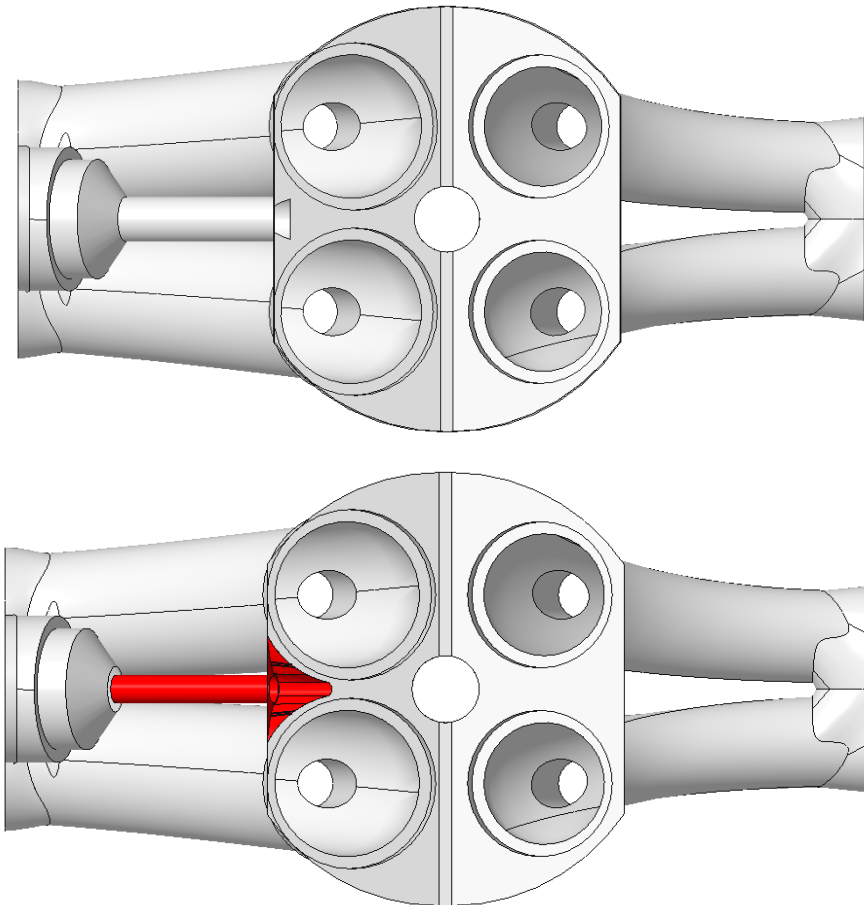


Fig. 25: Modifica della zona d'iniezione, vista dal basso

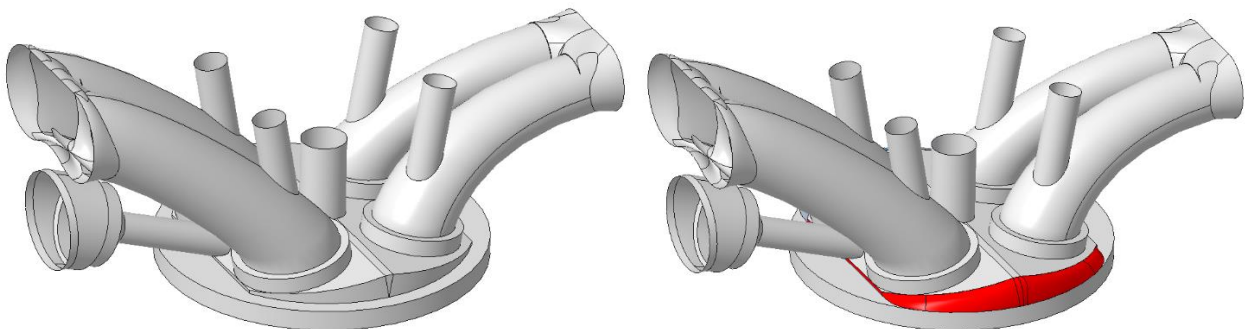


Fig. 26: Bombatura sulla testa

La figura 26 mostra la bombatura aggiunta sulla testa di modo da rendere il CAD più simile ad una tipica testa motore.

Apportate queste modifiche, la testa era pronta per essere chiusa e solidificata. Purtroppo, la qualità del CAD di partenza e l'esportazione del file in più formati aveva portato alla creazione di alcuni strappi, in particolari sulla superficie dei condotti. È stato necessario ricucire tali strappi cercando di mantenere il più possibile la geometria reale. Nelle Figura 27 è visibile una patch a forma di mezzaluna aggiunta all'imbocco del condotto di aspirazione. Nella Figura 28 è corretto uno strappo molto più piccolo nella medesima zona.

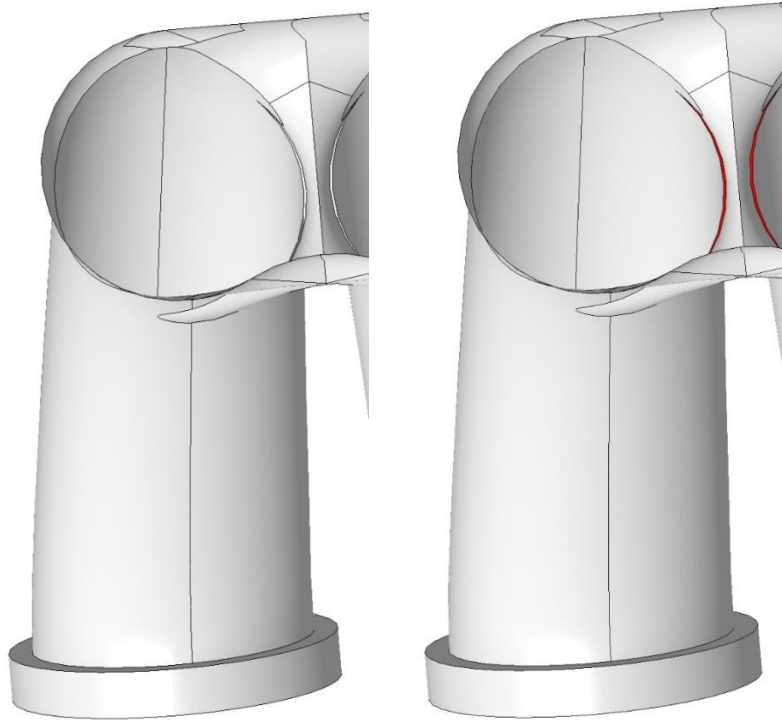


Fig. 27: Patch sul condotto di aspirazione

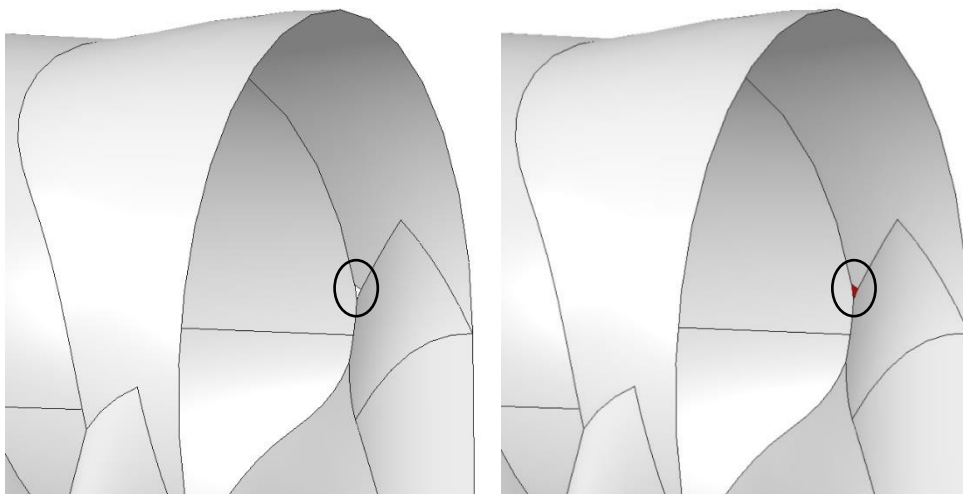


Fig. 28: Patch sul condotto di aspirazione (2)

Dal lato dello scarico è stato poi notato un gradino (e un conseguente cambio di diametro repentino) nell'ultima parte del condotto. Si è deciso di aggiungere una rampa che portasse dal diametro minore a quello maggiore con una certa gradualità (si veda Figura 29).

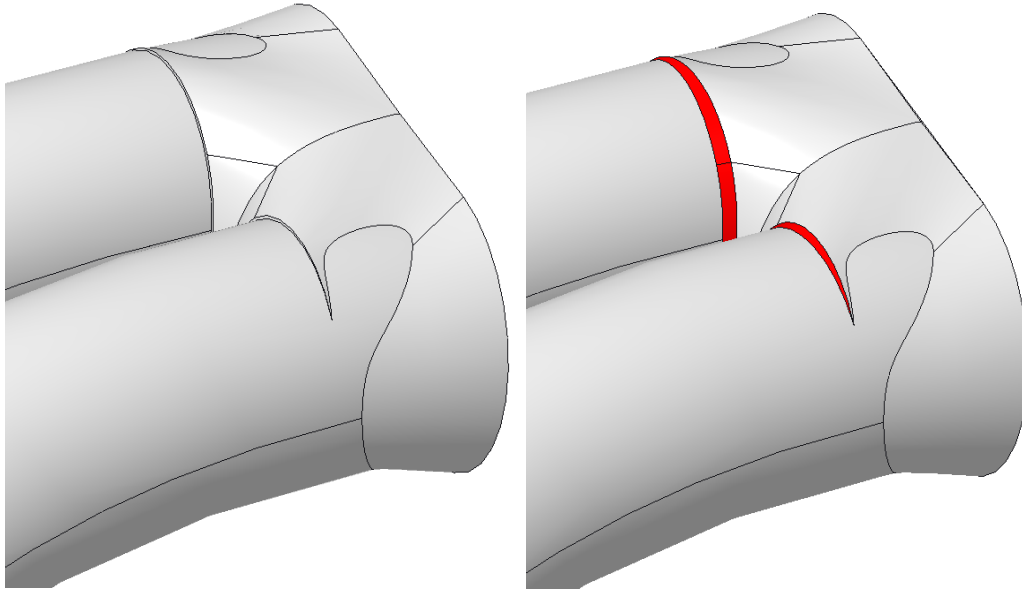


Fig. 29: Rampa sul condotto di scarico

La superficie era quindi pronta per essere unita e solidificata su CREO. Non è stato possibile fare ciò direttamente poiché CREO non riusciva a gestire la solidificazione di tutta la testa, quindi si è proceduto tagliando i condotti di aspirazione e solidificando la geometria rimanente. Con un analogo procedimento si è creato anche il solido dei condotti di aspirazione, in seguito assemblato sul resto della testa. I singoli componenti e il loro assemblaggio sono visibili in Figura 30 e 31.

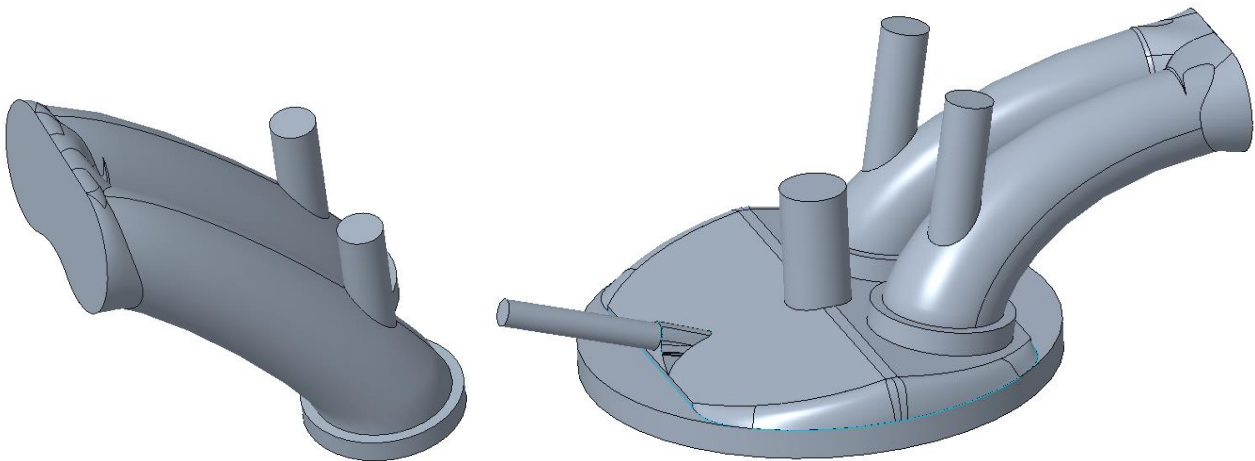


Fig. 30: Solido dei condotti di aspirazione e testa

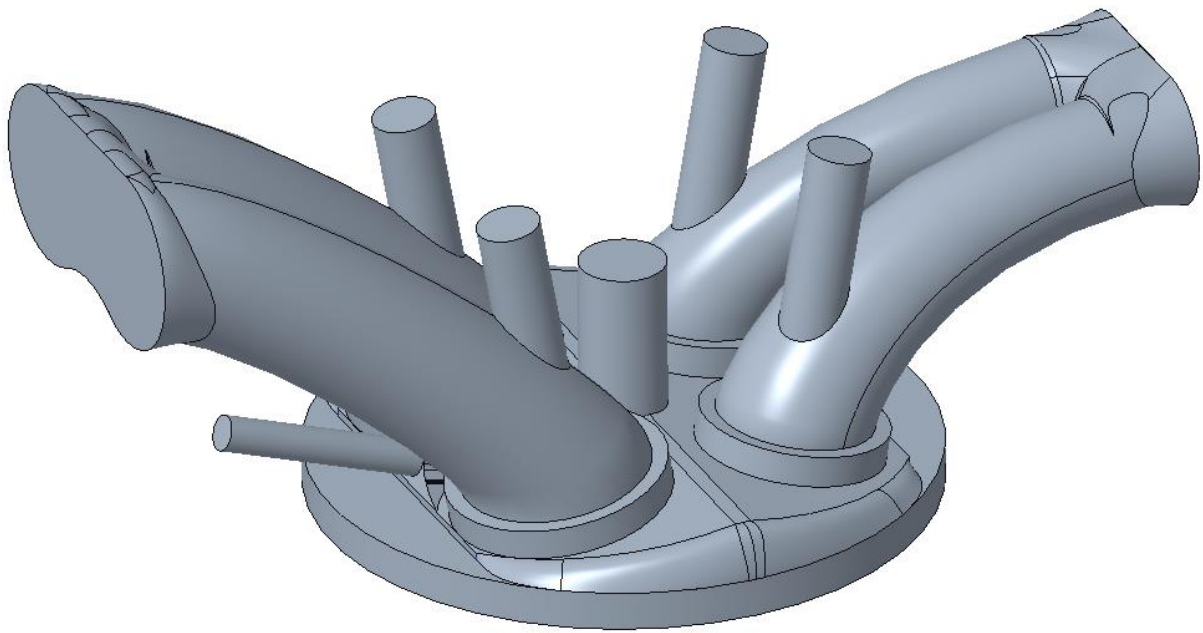


Fig. 31: Assemblaggio dei condotti di aspirazione sulla testa

Si riportano ora in rapida carrellata, nelle Figure 32-37, gli screen con aggiunta/sottrazione booleana dei vari componenti ancora da montare sulla testa.

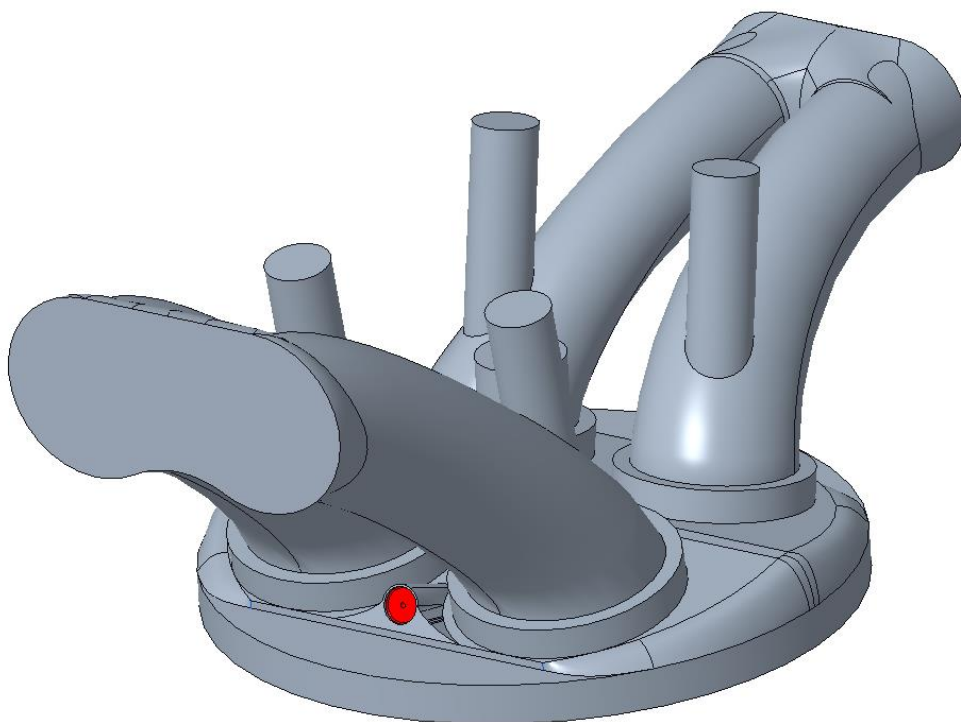


Fig. 32: Sottrazione booleana del volume dell'iniettore

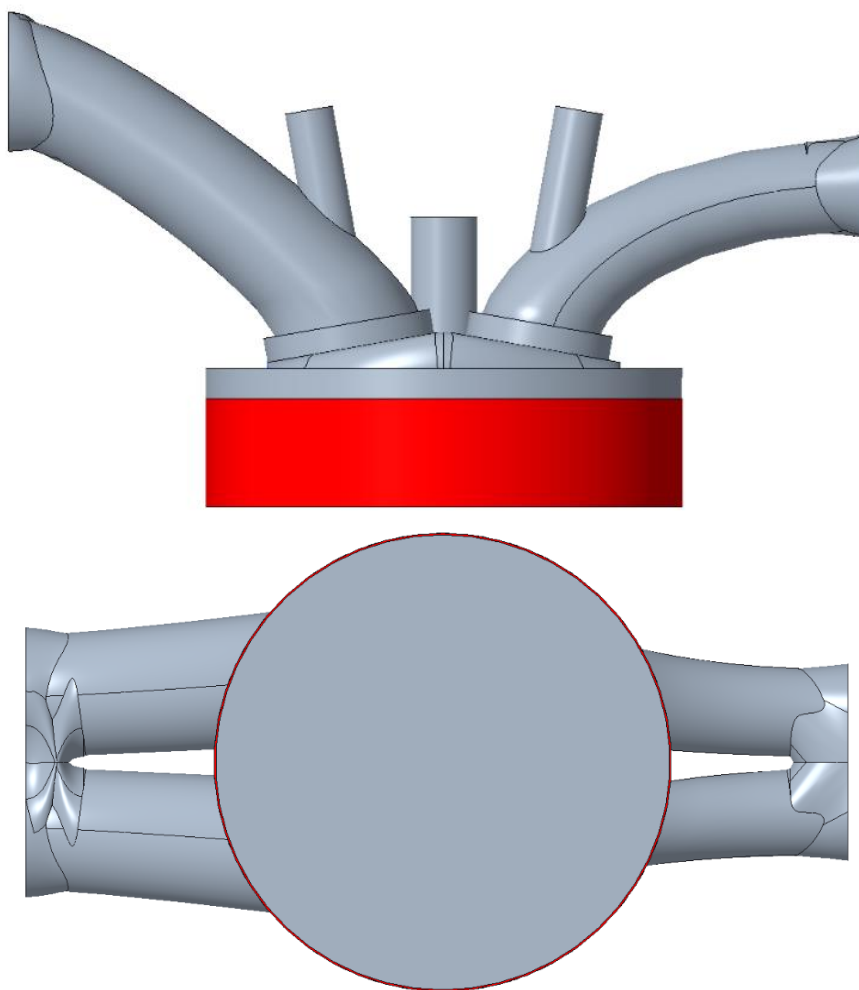


Fig. 33: Aggiunta del volume tra i fianchi del pistone ed il cilindro

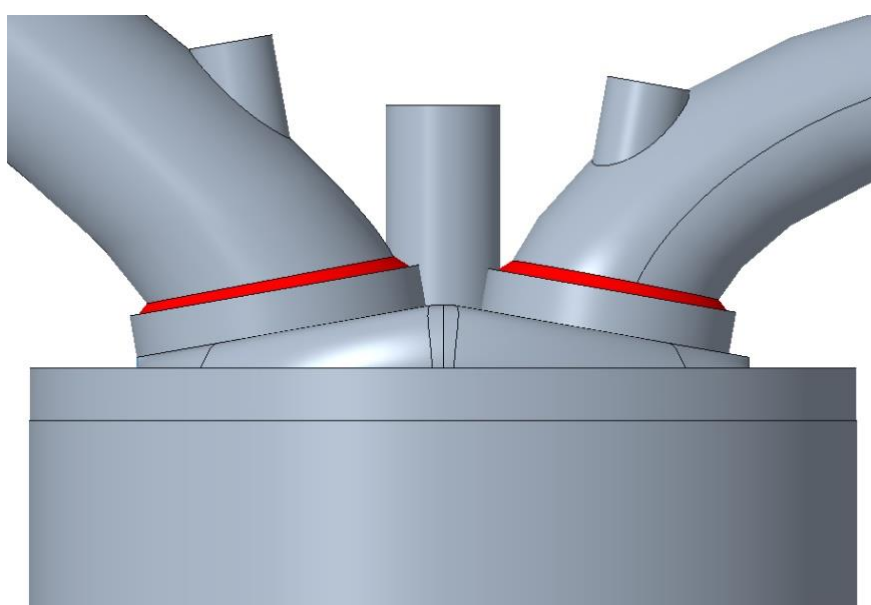


Fig. 34: Modifica della sedi valvole

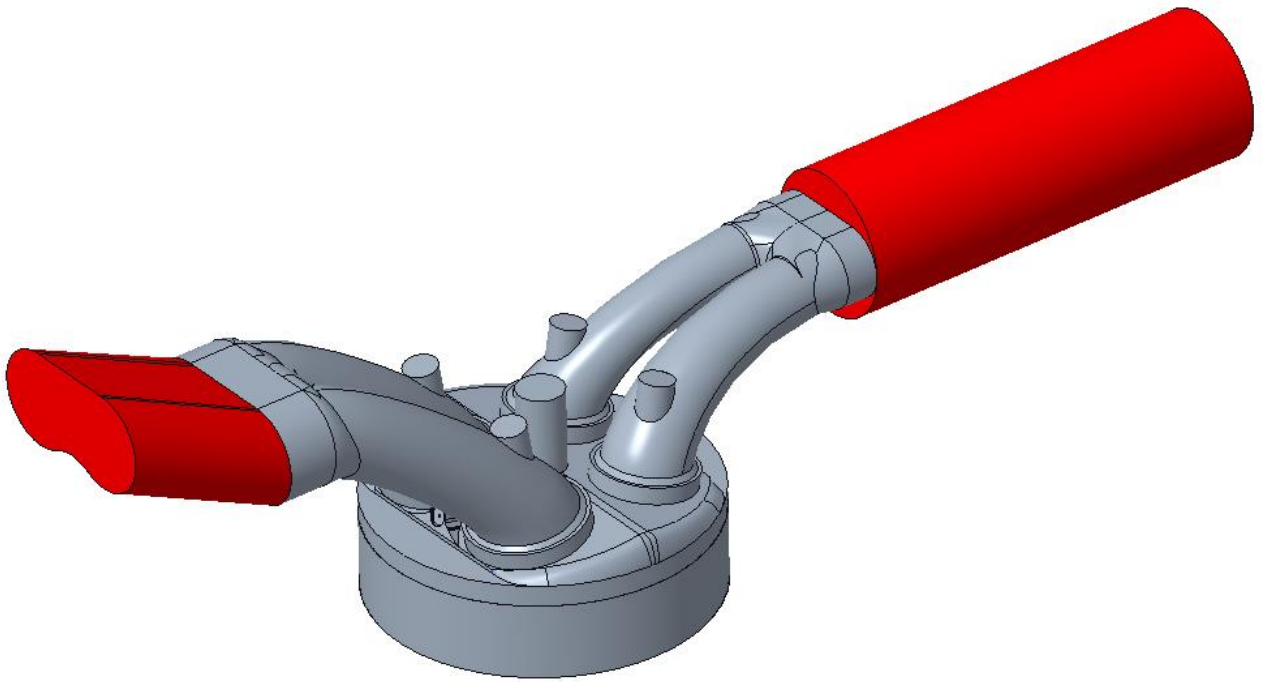


Fig. 35: Aggiunta dei volumi dei collettori di aspirazione e scarico

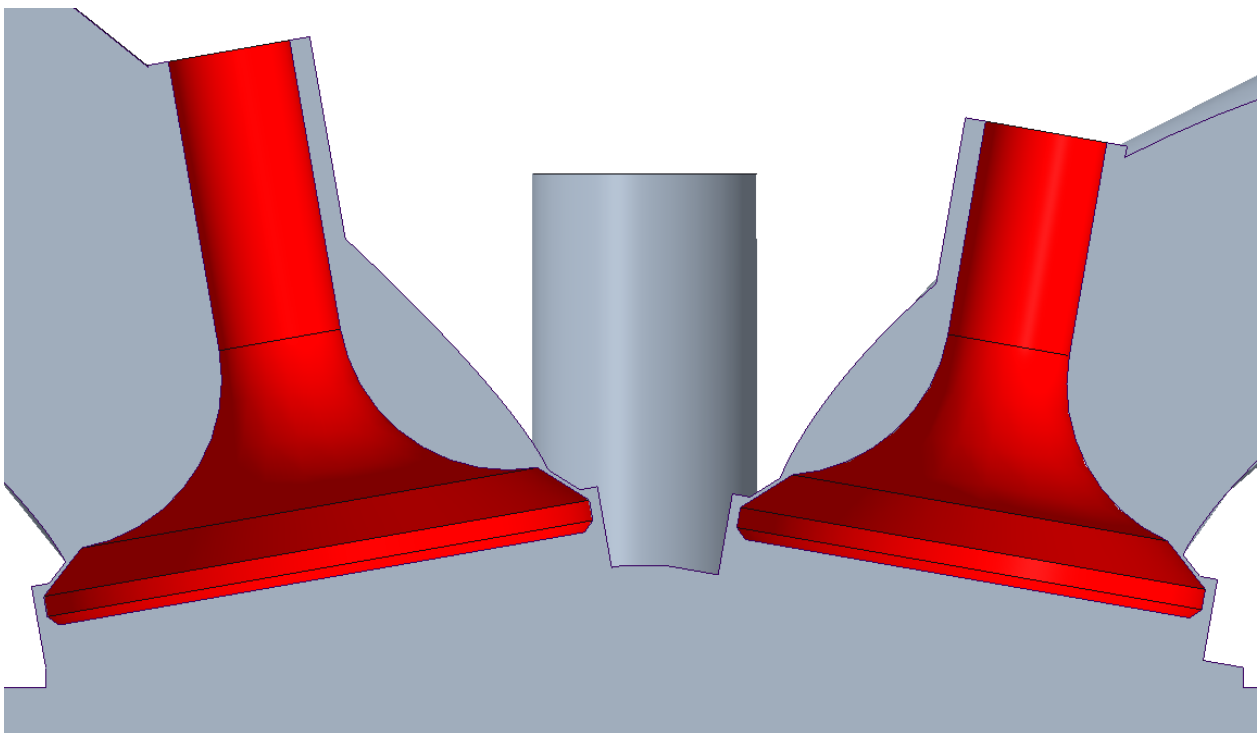


Fig. 36: Sottrazione booleana del volume delle valvole

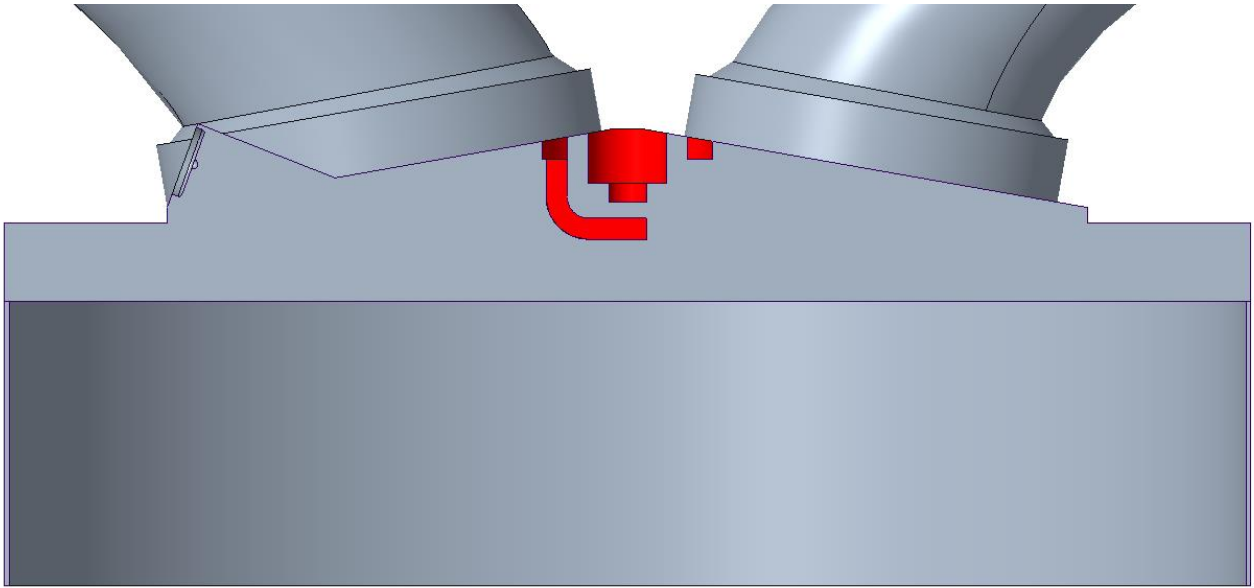


Fig. 37: Sottrazione booleana del volume della candela

La Figura 38 mostra il risultato finale delle elaborazioni su CREO.

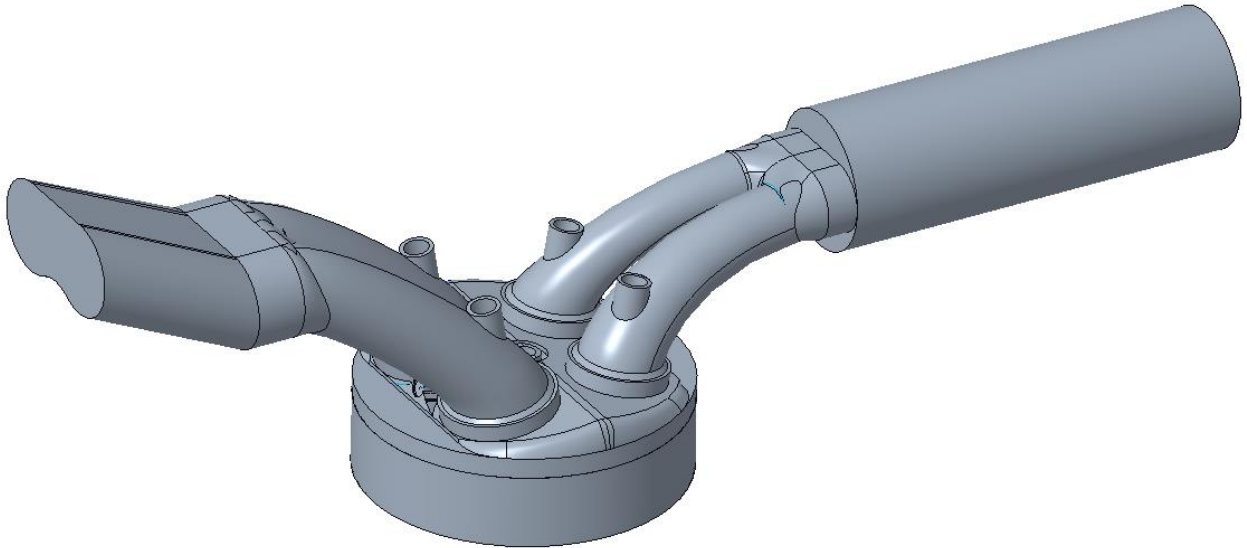


Fig. 38: Geometria finale del motore

2.3 - Esportazione in formato STL

CREO ha la possibilità di salvare il file in formato STL, che come detto è il formato utile per il software CFD. Nel creare il file STL c'è bisogno di settare due parametri fondamentali che andranno a definire la qualità finale dell'esportazione:

- Altezza corda: impone la massima distanza consentita tra la superficie del modello CAD (così come progettato) e la faccia triangolare più vicina del file STL risultante. Più è basso questo valore, più sarà alta la risoluzione del file
- Controllo angolo: impone l'angolo massimo consentito tra i vettori normali di due triangoli vicini nel file STL risultante e va considerato come un parametro che "rifinisce" la mesh più di quanto il precedente parametro consentirebbe altrimenti. In CREO è definito come un numero compreso tra 0 e 1, in cui valori maggiori specificano una risoluzione più alta.

Questi sono i due parametri presenti in tutti i software, ma alcuni programmi CAD (CREO compreso) offrono un'impostazione extra chiamata "passo" che indica la lunghezza massima della sfaccettatura del triangolo.

Il setup utilizzato per l'esportazione è il seguente:

- Altezza corda = 0.05
- Controllo angolo = 0.5
- Dimensione passo = (-) (lasciato al programma)

Il file esportato (visibile nella Figura 39) è formato da 43 470 triangoli. La differenza nella tonalità d'azzurro mostra quanto sia infittita la geometria nelle varie zone (i condotti, ossia le zone con una curvatura più "critica", sono naturalmente più scuri).

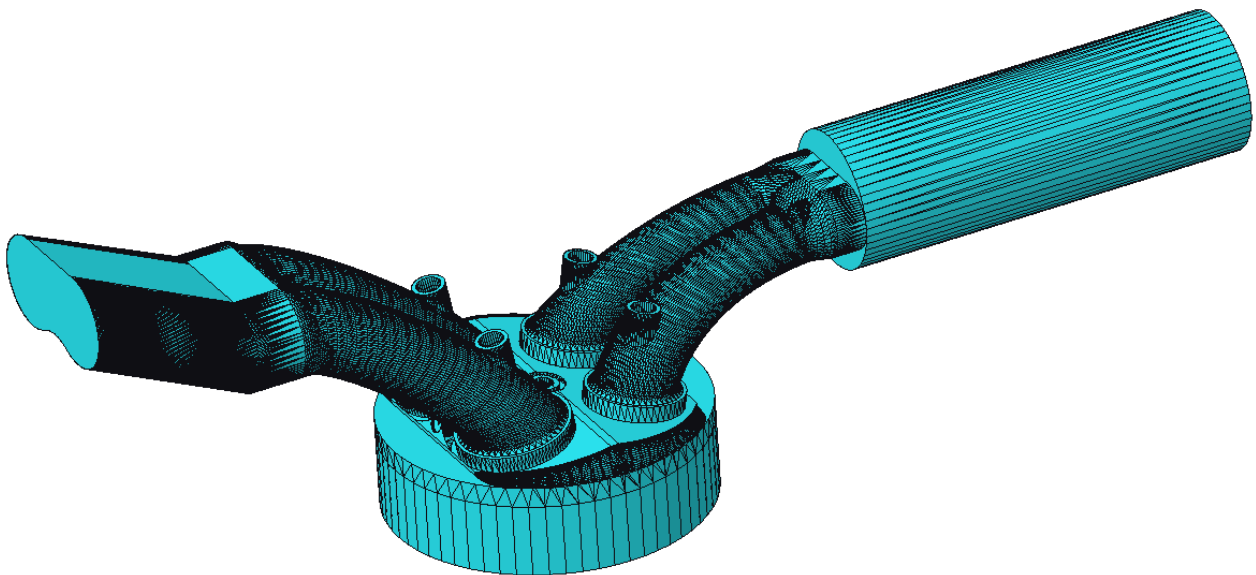


Fig. 39: STL del dominio fluido del motore in studio

3 - Flussaggio

Il flussaggio è una delle attività fondamentali per caratterizzare il comportamento di un motore; in particolare lo scopo è determinare i coefficienti di scarico (C_D) attraverso le valvole, i quali essenzialmente dipendono dalla geometria in considerazione. Ottenuti i C_D è possibile calcolare la portata effettiva in ingresso/uscita tramite la seguente formula:

$$\frac{dm}{dt} = C_D \cdot A_{ref} \cdot p_m \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{1}{R T_m} \cdot \left[\left(\frac{p_v}{p_m}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_v}{p_m}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}$$

Dove:

- A_{ref} : area di passaggio [mm^2] di riferimento (si vedano Figure 40-41)
- p_m, T_m : pressione [Pa] e temperatura [K] nell'ambiente di monte (da cui arriva il flusso)
- p_v : pressione [Pa] nell'ambiente di valle (verso cui viaggia il flusso)
- k : indice della politropica [-] (caratteristico del fluido in uso)
- R : costante universale dei gas [$\text{J}/(\text{mol K})$]

Il coefficiente C_D può assumere valori compresi tra 0 e 1, quindi agisce come fattore riduttore della portata che teoricamente potrebbe passare attraverso il cambio di sezione.

Quello che nella pratica si fa per calcolare i coefficienti di efflusso è allestire una prova su banco di flussaggio, misurando le portate in input e output. Ottenute tali portate è possibile inserirle nella formula vista ad inizio capitolo e, invertendo la formula stessa, valutare i C_D alle varie alzate. Si tratta di una attività che richiede, naturalmente, di avere a disposizione il motore e un banco su cui testarlo. Altro "limite" della prova sperimentale è il fatto che solitamente i banchi di flussaggio sono attrezzati per valutare la portata solo in una delle due direzioni possibili del flusso, ed in particolare esclusivamente dai condotti verso il cilindro. D'altra parte, un software CFD richiede la realizzazione di una mesh per ogni alzata che si voglia simulare, la preparazione di un setup di simulazione e, infine, tempo macchina. Un vantaggio di questo approccio è però la possibilità di scegliere la direzione del flusso semplicemente cambiando le pressioni in ingresso e uscita alla macchina. Quello a cui siamo più interessati è calcolare i C_D nella direzione di lavoro "preferenziale" della macchina, quindi dal condotto di aspirazione al cilindro e dal cilindro al condotto di scarico; ci sono delle leggere differenze nei C_D tra flusso diretto e inverso, legate al fatto che in un caso il fluido è accompagnato dalla geometria della valvola ad entrare nel cilindro, mentre nell'altro incontra il piattello della valvola e da lì cerca di trovare la sua strada verso l'ambiente a pressione minore, ma le due curve risultanti sono all'incirca sovrapponibili, e nella pratica spesso si usa una singola curva (quella attiva per più tempo).

Nel capitolo successivo si andranno ad analizzare le feature specifiche di una mesh per flussaggio. Non si scenderà nei dettagli del procedimento che ha portato alla sua generazione, ma per chiarezza si riporta una spiegazione delle feature di base:

- Boundary: sono le superfici della geometria, quelle che permettono di andare ad individuare e dividere i vari componenti (valvole, candela, pistone, ...) all'interno della mesh.
- Edge: sono gli spigoli attraverso cui vogliamo passi forzatamente la mesh; è fondamentale inserirli all'interfaccia tra componenti e in tutte quelle zone che vogliamo cogliere con alta precisione.

- Refinement: sono zone particolarmente ostiche della mesh che richiedono una dimensione massima delle celle della griglia più bassa. Creare un refinement nei pressi di iniettore e candela permette di cogliere con maggiore precisione i fenomeni collegati al loro funzionamento (vaporizzazione del combustibile nel caso dell'iniettore, accensione e formazione del fronte di fiamma nel caso della candela).

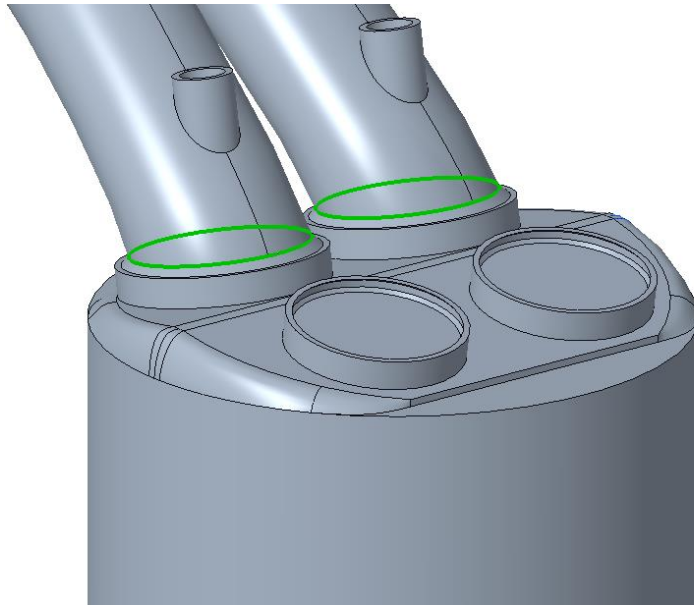


Fig. 40: Area di passaggio di riferimento dei condotti di aspirazione

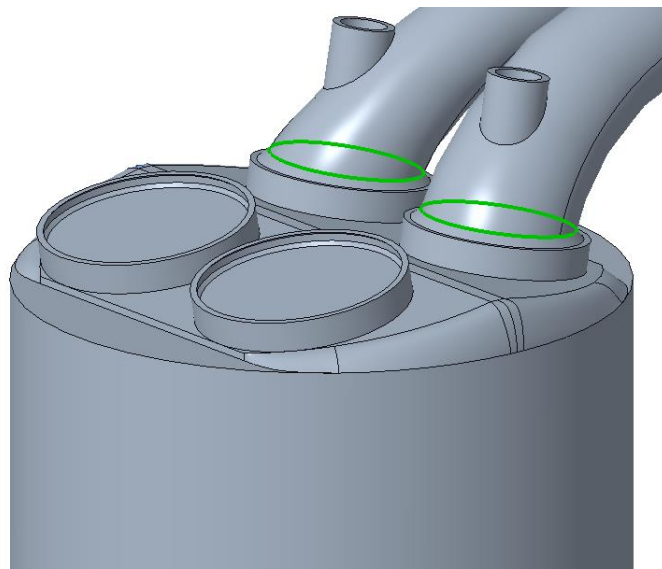


Fig. 41: Area di passaggio di riferimento dei condotti di scarico

3.1 - Caratteristiche di una mesh per flussaggio

Un punto da tener ben presente nella realizzazione di una qualsiasi mesh è che più geometria si vuole tenere, più celle saranno necessarie per andarla a cogliere in maniera accettabile, più i calcoli saranno onerosi. Buona norma è quindi chiedersi che tipo di simulazione si vuole realizzare e dove è possibile tagliare i costi di calcolo. Nel caso di una simulazione di flussaggio quello che si fa è andare a preparare due teste motore, una lato aspirazione e una lato scarico, in cui però siano state aggiunte due feature molto riconoscibili: un'emisfera collegata ai condotti e un allungamento notevole del cilindro (le quote dimensionali che definiscono queste modifiche sono dettate dall'esperienza). Lo scopo di queste aggiunte è stabilizzare il flusso in input e output, in modo che il moto del fluido non sia influenzato dalla geometria dell'ingresso o dell'uscita.

La Figura 42 mostra il disegno CAD di una testa per il flussaggio del lato aspirazione sulla sinistra, mentre sulla destra la stessa testa è messa in trasparenza e sono evidenziate le superfici di input (in rosso) e output (in blu). La Figura 43 è analoga, ma per il lato di scarico.

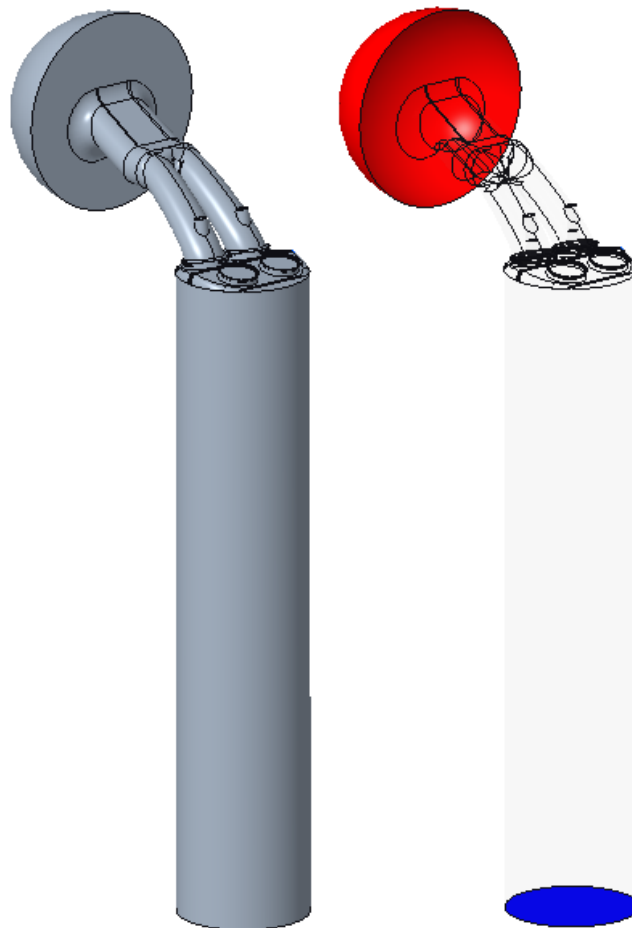


Fig. 42: CAD per il flussaggio del lato d'aspirazione

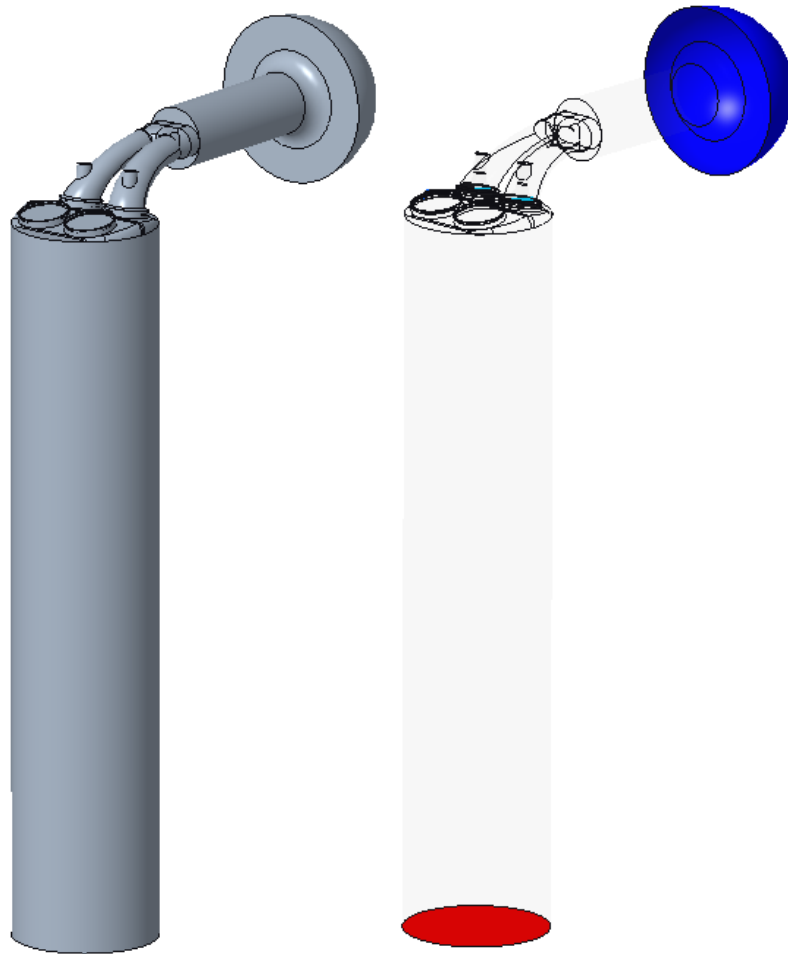


Fig. 43: CAD per il flussaggio del lato di scarico

Come già detto, idea fondamentale da avere in testa in questa fase dell'attività è "alleggerire" la geometria: sono stati rimosse le sedi di iniettore e candela, in quanto non interessanti ai fini della simulazione.

Preparate le geometrie, si procede a realizzare la mesh vera e propria con il modulo "FIRE FAME Hexa", applicativo utile per la generazione di mesh statiche (ossia che non evolvono durante la simulazione; se si sta simulando un ciclo motore naturalmente valvole e pistone seguiranno una legge di moto e una traiettoria nello spazio).

La Tabella 1 mostra le alzate simulate per i due casi e i relativi boundary layer utilizzati. Quest'ultimi sono, per l'appunto, dei layer che si trovano sulla superficie della geometria e servono per cogliere il comportamento del fluido nelle zone in cui dovrebbe avere un moto laminare. Il numero di boundary layer utilizzati è crescente con l'alzata e segue un criterio di esperienza.

Alzate Analizzate (mm)	1	2	4	6	7	8
# BND Layer Aspirazione	4	4	4	5	5	6
# BND Layer Scarico	4	4	5	6	6	-

Tab. 1: Alzate analizzate e boundary layer utilizzati

Un confronto tra la Tabella 1 e la Figura 44 rende evidente come siano state simulate alzate maggiori rispetto al range effettivamente utile alla caratterizzazione del motore. Il motivo di ciò è che solitamente quando si fanno attività di flussaggio non si ha la legge di alzata delle valvole, quindi la procedura standard è andare fino ad alzate molto alte (anche 12-14 mm) per poi tagliare all'ultimo valore utile.

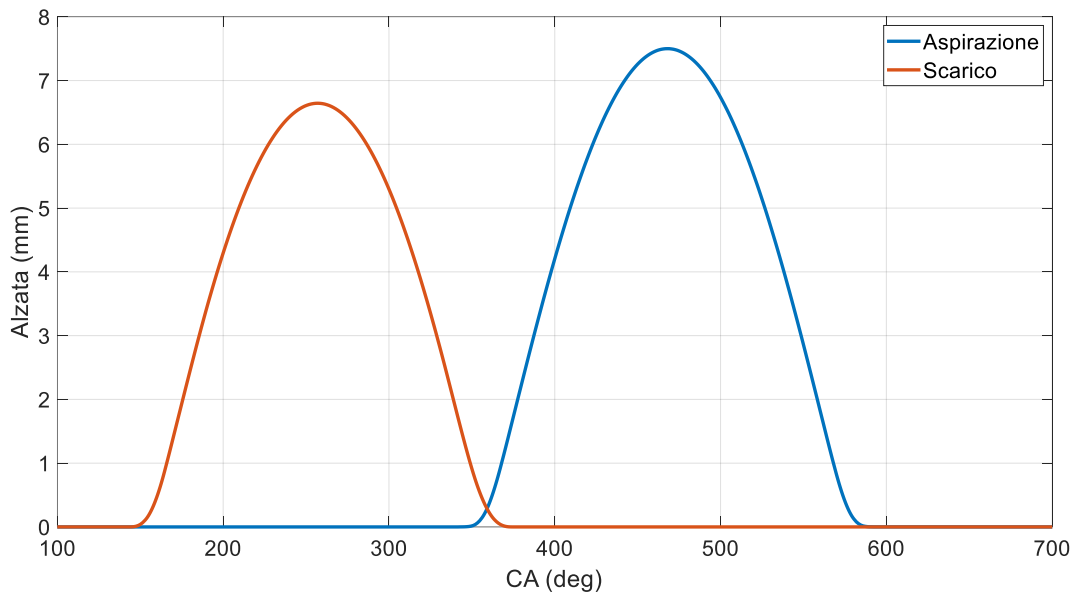


Fig. 44: Legge di alzata delle valvole

La Tabella 2 mostra un resoconto delle dimensioni delle celle fissate per le boundary e i refinement, si riporta quella per il lato di aspirazione, ma è analogo il setup per lo scarico.

Refinement	Dimensione massima celle (mm)	Distance (mm)
(Generale)	(6)	-
BND_inlet	6	-
BND_outlet	3	-
BND_testa	0.750	10
BND_valvole	0.750	1
BND_condotto	0.750	14
REF_biforcazione_condotto	0.750	-
REF_occhielli	0.750	-
REF_tenute	0.750	-
REF_sottovalvole	0.375	-

Tab. 2: Dimensione celle per simulazione di flussaggio (lato aspirazione)

Per concludere la creazione della mesh è stato aggiunto un refinement a tre livelli sul cilindro allungato: la prima zona è utile per cogliere il moto del fluido subito sotto le valvole, mentre la seconda è una zona di collegamento alla terza, entrambe con lo scopo di ridurre il numero complessivo delle celle. Setup e risultato sono mostrati in Tabella 3 e Figura 45. Nel refinement si va ad individuare nello spazio un cilindro di fissate dimensioni all'interno del quale le celle non potranno superare una data grandezza.

Refinement Cilindrico	Dimensione massima celle (mm)	Raggio del cilindro (mm)	Altezza cilindro (mm)
Zona 1	0.750	30	40
Zona 2	1.5	30	40
Zona 3	3	30	157.5

Tab. 3: Refinement cilindrico per la simulazione di flussaggio

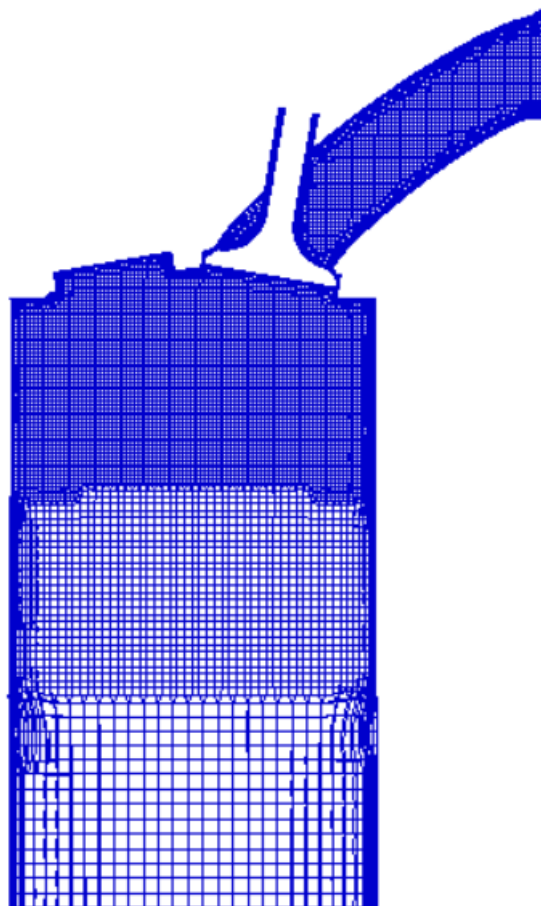


Fig. 45: Refinement cilindrico per la simulazione di flussaggio

Si riportano infine un paio di screen del risultato finale in Figura 46-47 che mostrano molto chiaramente l'influenza che il numero di boundary layer ha sulla mesh.

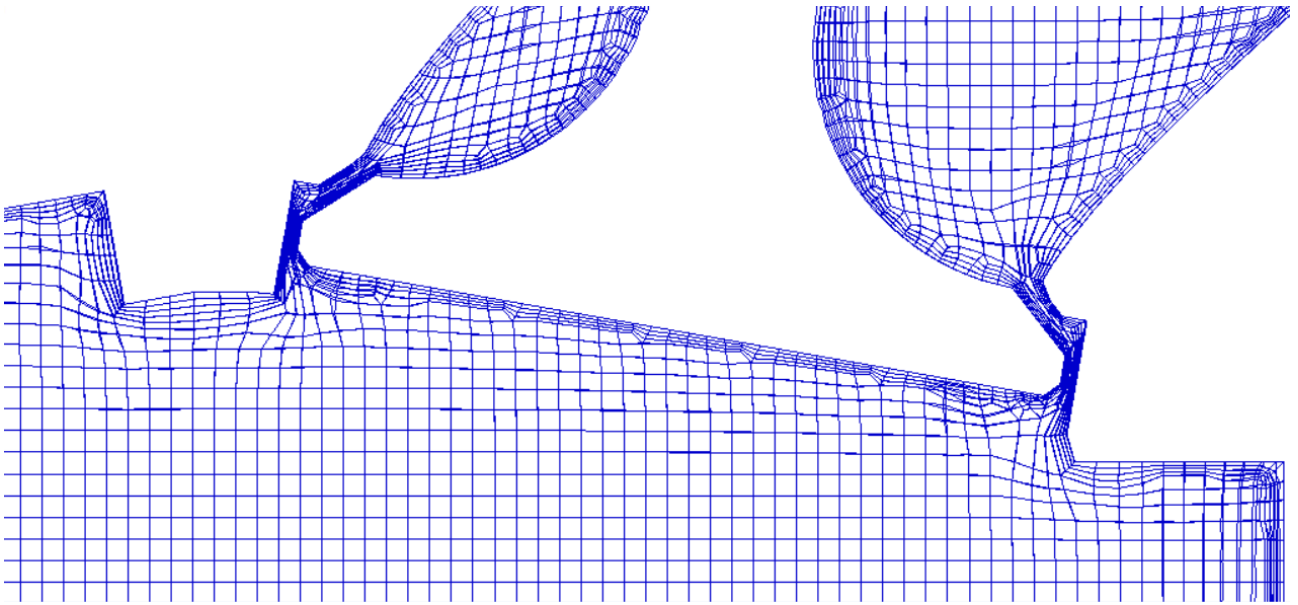


Fig. 46: Taglio valvola, alzata 1 mm, 4 boundary layer

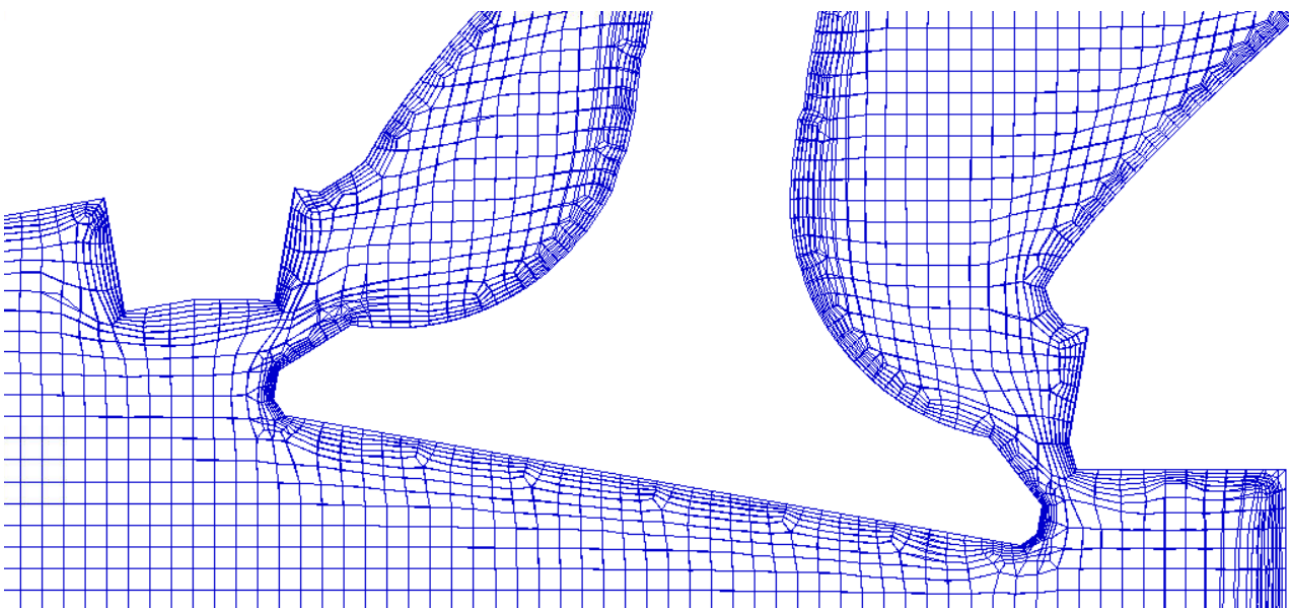


Fig. 47: Taglio valvola, alzata 6 mm, 5 boundary layer

3.2 - Setup della simulazione

I punti focali del setup sono riportati in Tabella 4, mentre in Tabella 5 sono presenti i fattori di sottorilassamento utilizzati.

Parametri di simulazione	
Numero di celle	1.2-1.7 Mln
Dimensione base celle (mm)	6
Dimensione minima celle (mm)	0.375
Solutore	Steady state
Fluido	Aria, comprimibile
Modello di turbolenza	RANS k-z-f
Funzione di parete	Hybrid Han & Reitz
Temperatura (° C)	25 (uniforme)
Pressione in ingresso (mbar)	1000
DeltaP aspirazione/scarico (mbar)	115/175

Tab. 4: Flussaggio, setup dei principali parametri di simulazione

Fattori di sottorilassamento	
Momentum	0.4
Pressure	0.1
Turbulent kinetic energy	0.2
Turbulence dissipation rate	0.2
Energy	0.4

Tab. 5: Flussaggio, fattori di sottorilassamento

Appunto da fare sulle boundary di input e output è che (come visto in precedenza) nel caso di aspirazione la BND di input è la superficie della semisfera e la BND di output è il fondo del cilindro, mentre nel caso di scarico abbiamo la situazione opposta; in entrambi i casi è stata imposta la direzione delle portate in ingresso e uscita perpendicolari alle boundary stesse. È importante poi notare che la procedura standard preveda almeno 25000 iterazioni, ma per questioni di tempo si è scelto di partire con 12000 iterazioni, controllando poi che i residui fossero bassi e costanti per un buon numero di iterazioni e che allo stesso tempo le portate in ingresso ed uscita avessero raggiunto l'equilibrio.

3.3 - Risultati

I risultati per il lato aspirazione sono riportati nelle Figure 48-52.

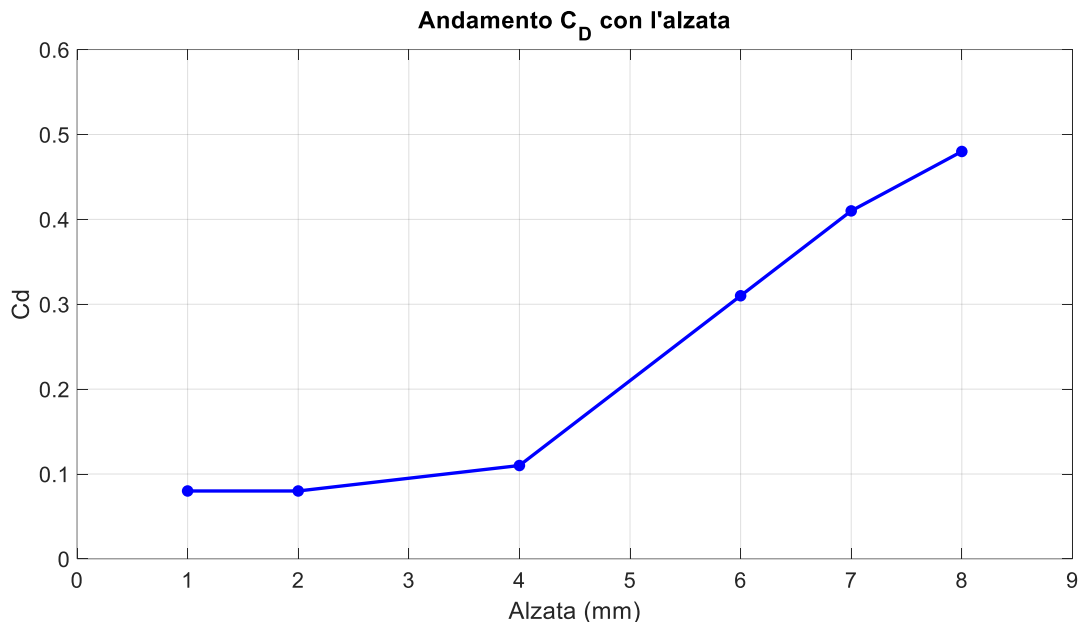


Fig. 48: Risultati della simulazione di flussaggio (lato aspirazione)

Quello che si nota subito in Figura 48 è il comportamento costante del C_D fino ad alzata 4 mm, collegato alla geometria della prima parte dell'estrusione dei condotti dalla testa: subito sotto la tenuta è presente una zona cilindrica il cui effetto netto è quello di limitare la sezione di passaggio utile al fluido. Il risultato è che, nonostante la valvola continui ad aprirsi, la portata elaborata non riesce ad aumentare, almeno non fino a quando non viene superata la zona cilindrica. Da lì in poi il comportamento è quello atteso, nonostante il valore massimo sia più basso rispetto a quello che si vede solitamente.

Dai risultati 3D (Figure 49-52) è possibile osservare i campi di velocità, che mostrano il modo in cui il fluido si muove una volta entrato nel cilindro. Come si vede abbastanza chiaramente nelle figure a 2 e 4 mm, nelle prime fasi di alzata si crea un vortice di tumble molto forte in camera, vortice che però viene velocemente spento nel momento in cui la valvola arriva ad alzate più alte.

Come ulteriore prova è stata lanciata una simulazione con alzata 14 mm, in modo da vedere se, come comunemente accade in letteratura, la curva di Figura 48 andasse a plafonare. Tale condizione non è raggiunta, e questo fenomeno è probabilmente legato alla presenza del collarino cilindrico che quindi limita la portata sia alle alte che alle basse alzate. Questo test non è stato riportato nei risultati in quanto primo di reale significato (se la valvola raggiungesse davvero un'alzata di 14 mm andrebbe ad affondare nel pistone).

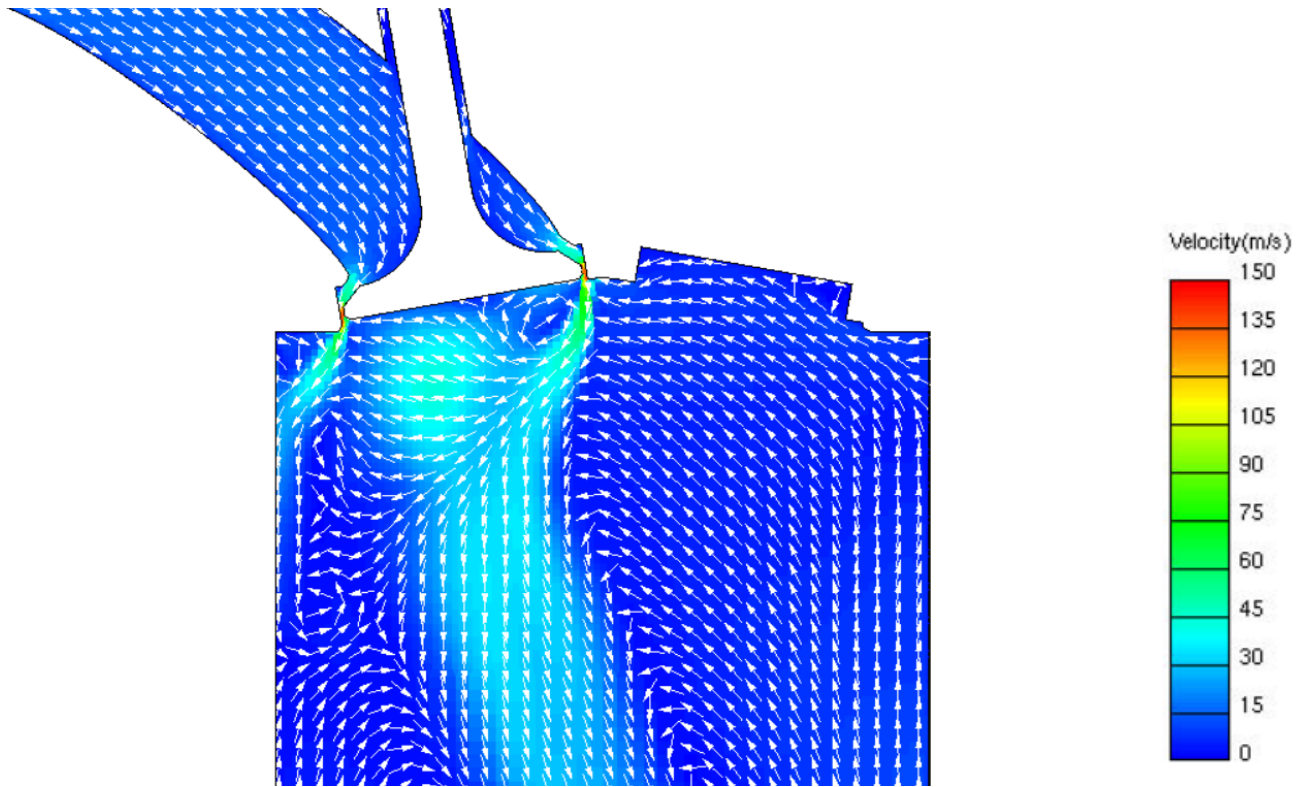


Fig. 49: Flussaggio lato aspirazione, alzata 2 mm, campo di velocità

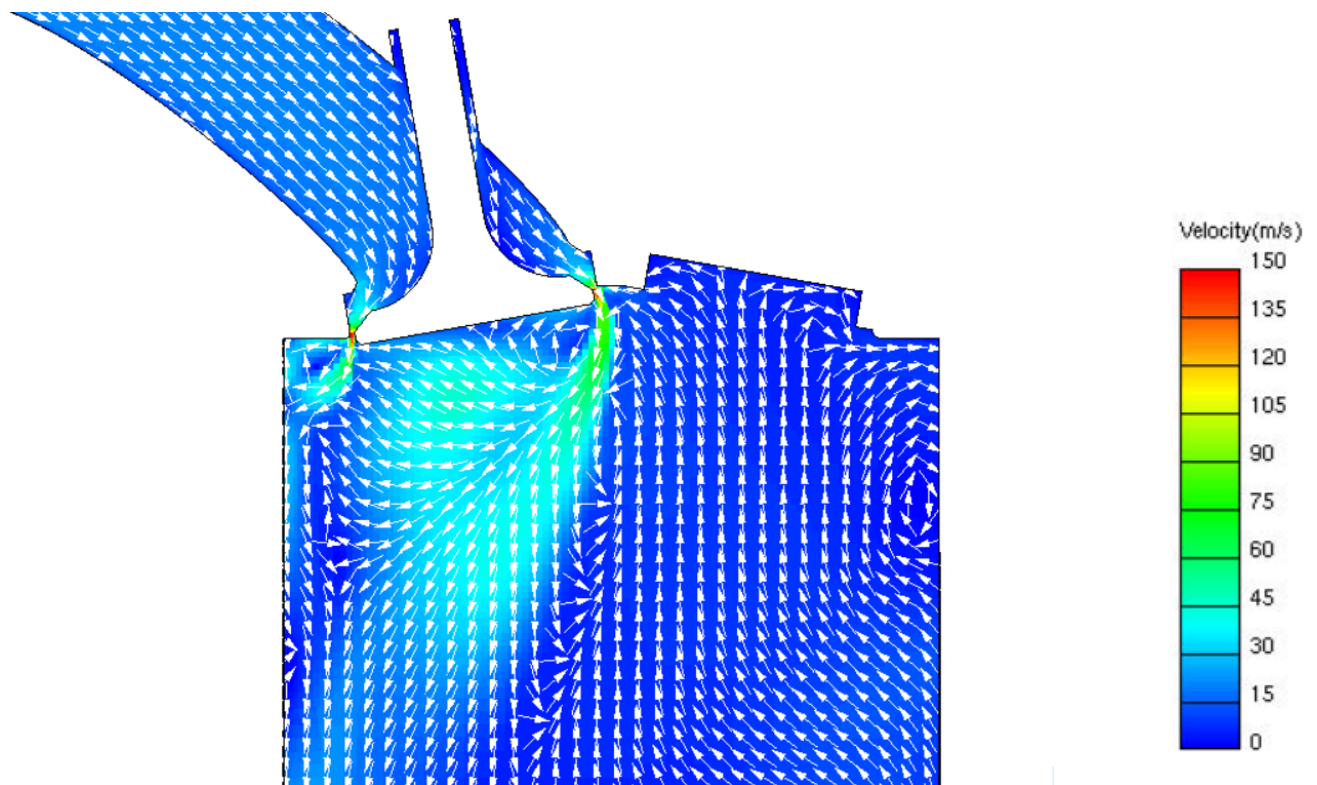


Fig. 50: Flussaggio lato aspirazione, alzata 4 mm, campo di velocità

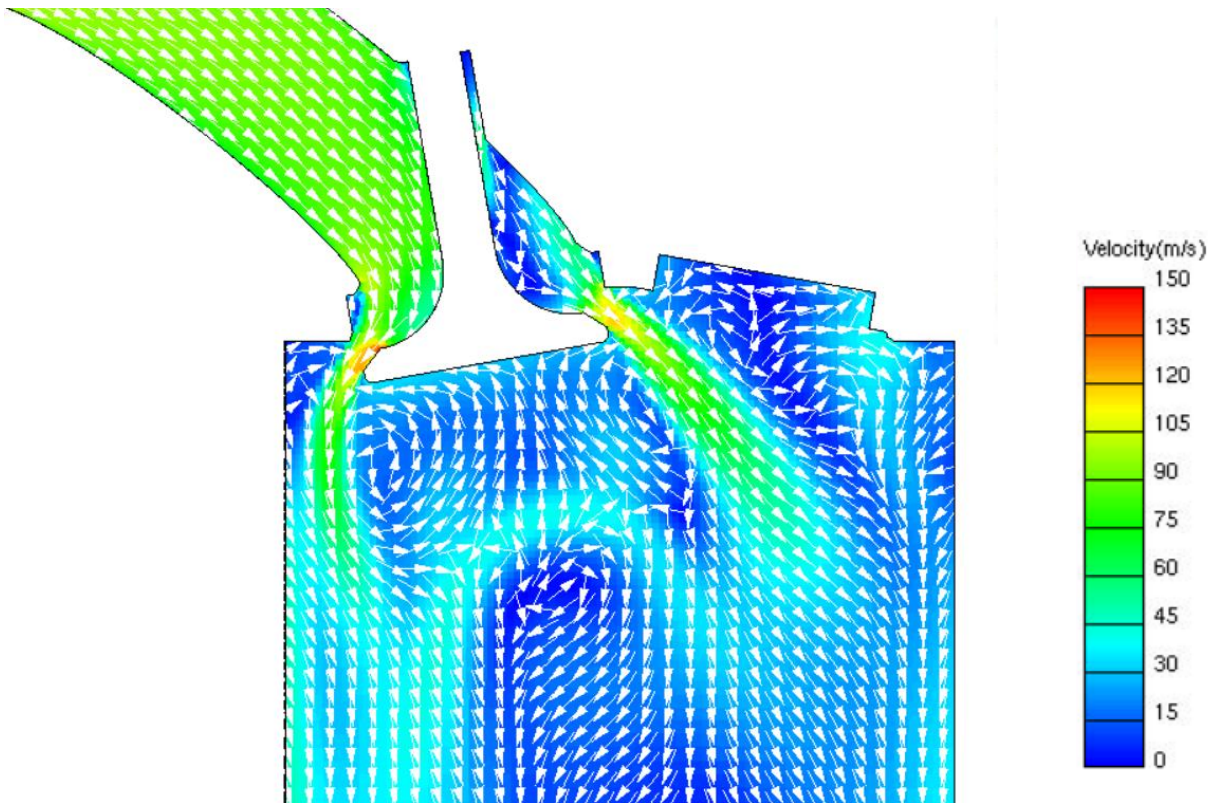


Fig. 51: Flussaggio lato aspirazione, alzata 8 mm, campo di velocità

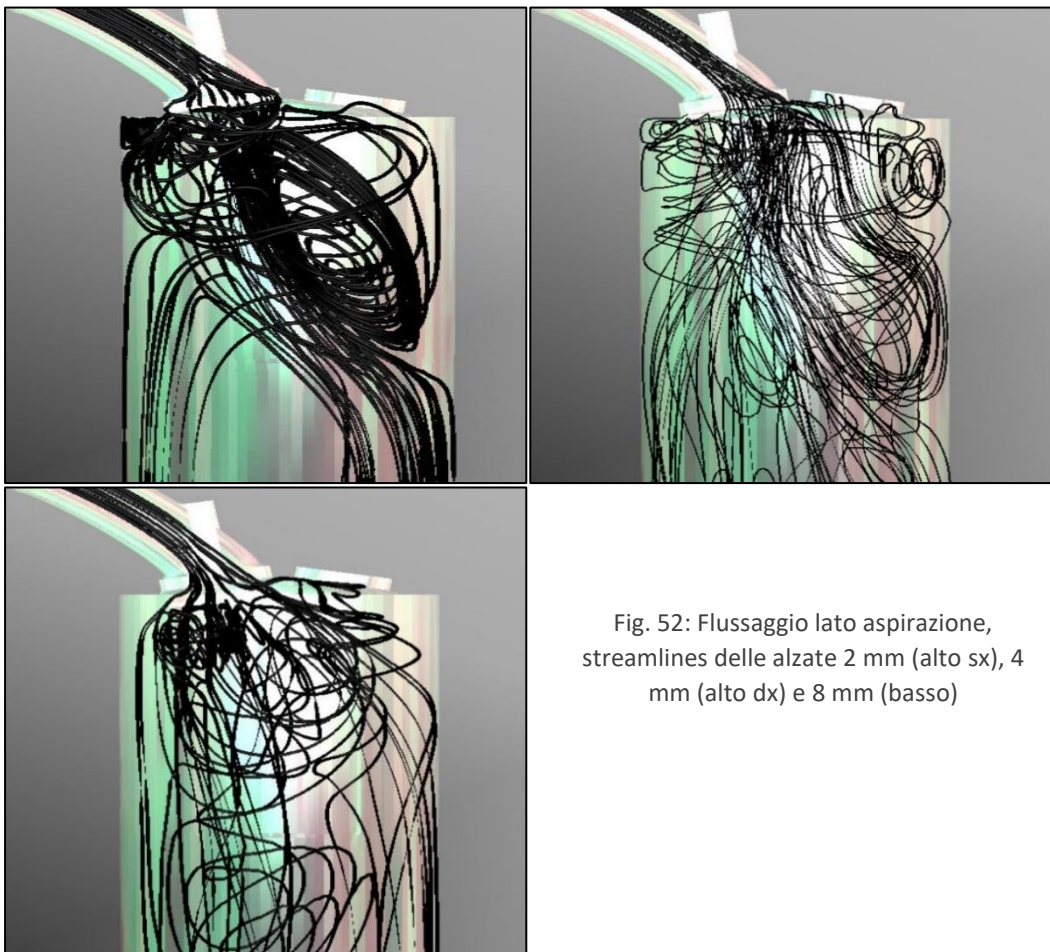


Fig. 52: Flussaggio lato aspirazione, streamlines delle alzate 2 mm (alto sx), 4 mm (alto dx) e 8 mm (basso)

Nelle Figure 53-57 è svolta la medesima analisi per il lato di scarico.

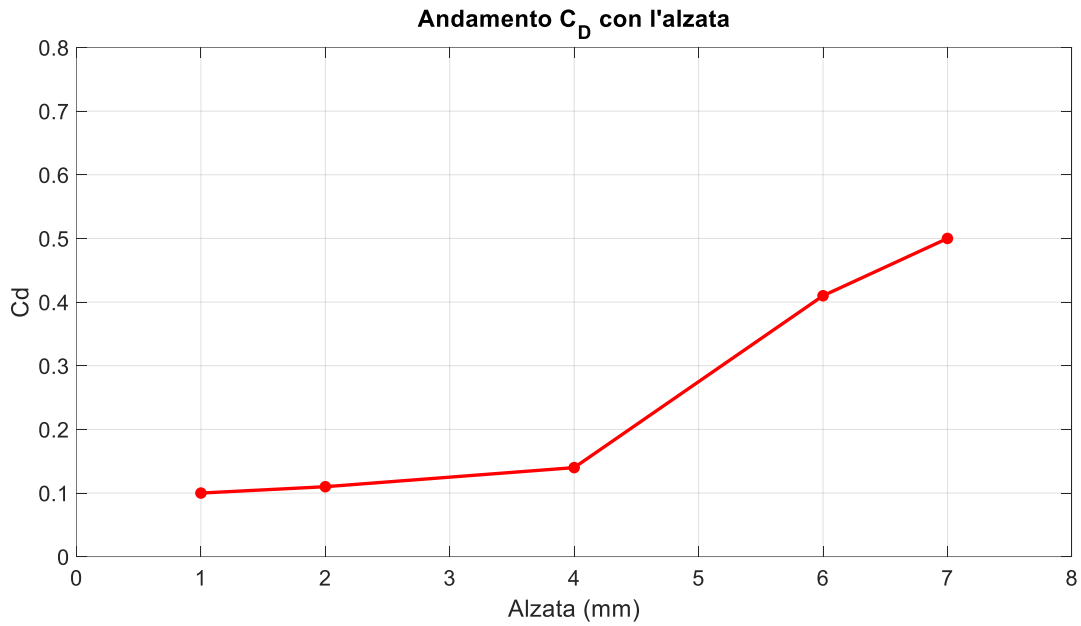


Fig. 53: Risultati della simulazione di flussaggio (lato scarico)

Per quanto riguarda l'andamento del C_D (Figura 53), i commenti fatti sul lato aspirazione valgono chiaramente anche per la parte di scarico. Guardando invece i risultati 3D (Figure 54-57), quello che si può notare è che inizialmente il moto del fluido avviene principalmente lungo una ristretta vena fluida, la quale poi si allarga man a mano che la valvola si avvicina alla sua alzata massima. Si vede poi, come atteso, una zona di fluido fermo al passaggio dai condotti al collettore di scarico (si veda Figura 56, sezione A-A) dovuto alla geometria del sistema.

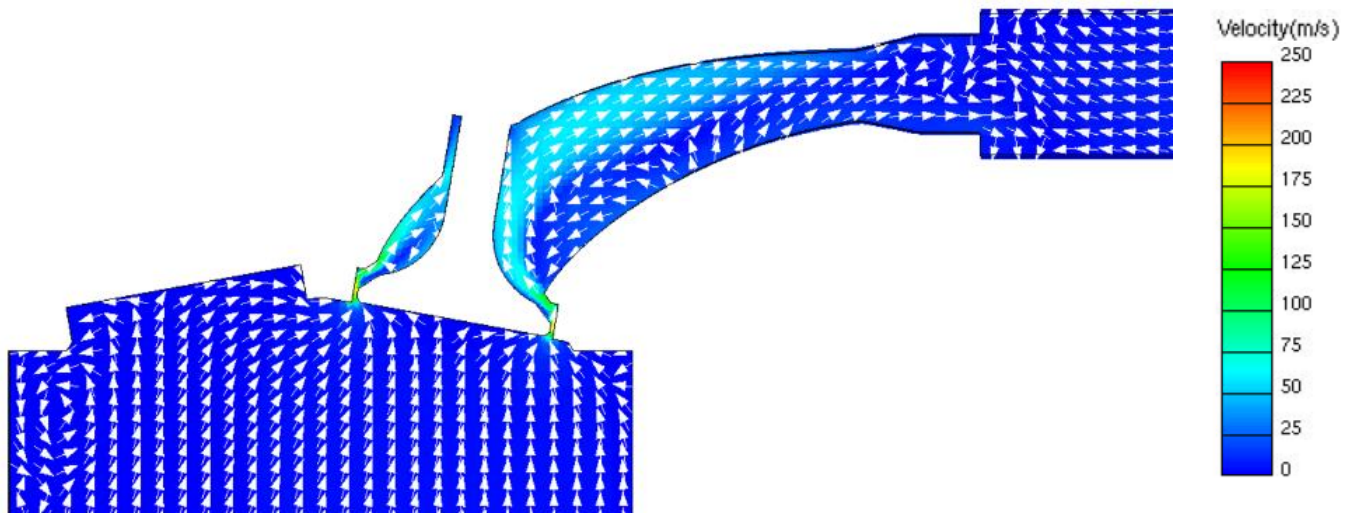


Fig. 54: Flussaggio lato scarico, alzata 2 mm, campo di velocità

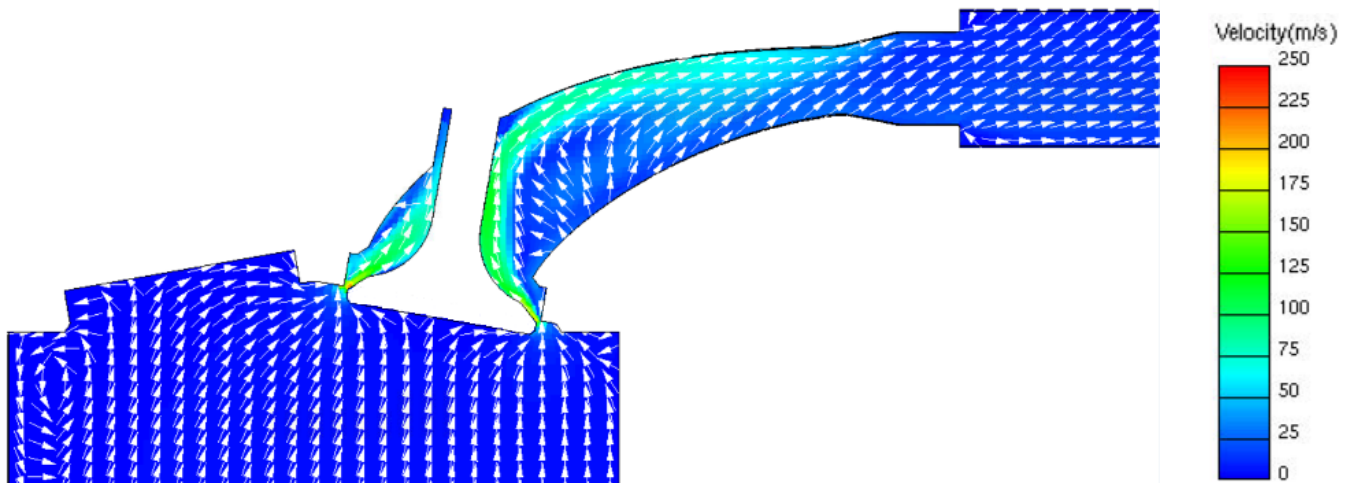


Fig. 55: Flussaggio lato scarico, alzata 4 mm, campo di velocità

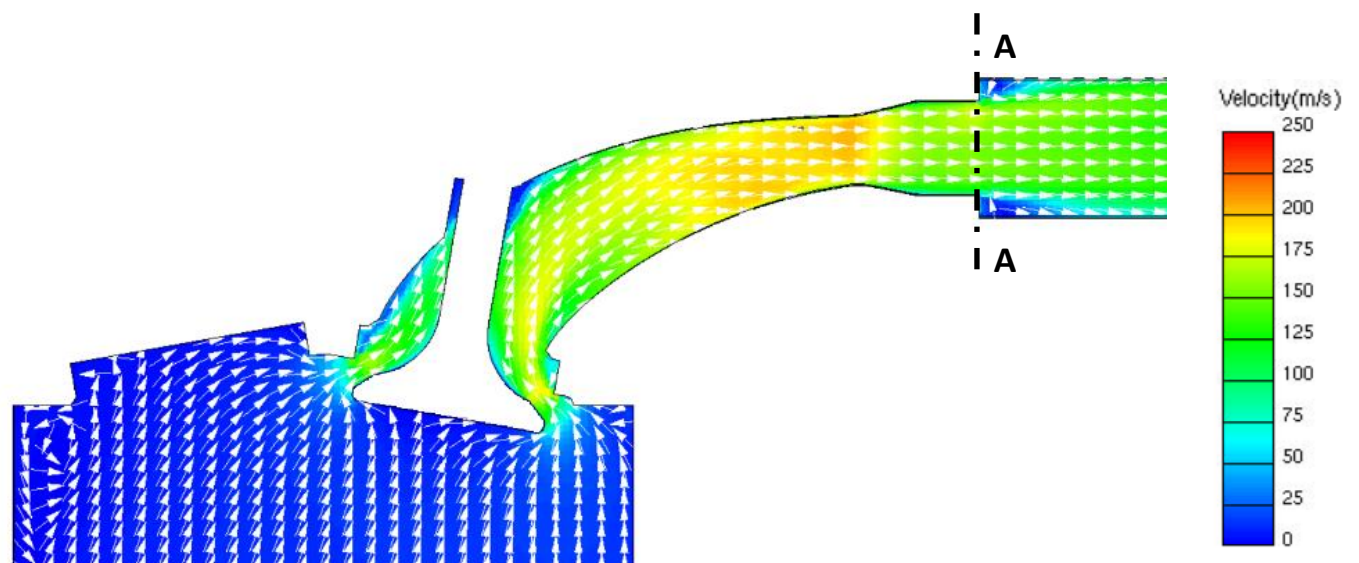


Fig. 56: Flussaggio lato scarico, alzata 7 mm, campo di velocità

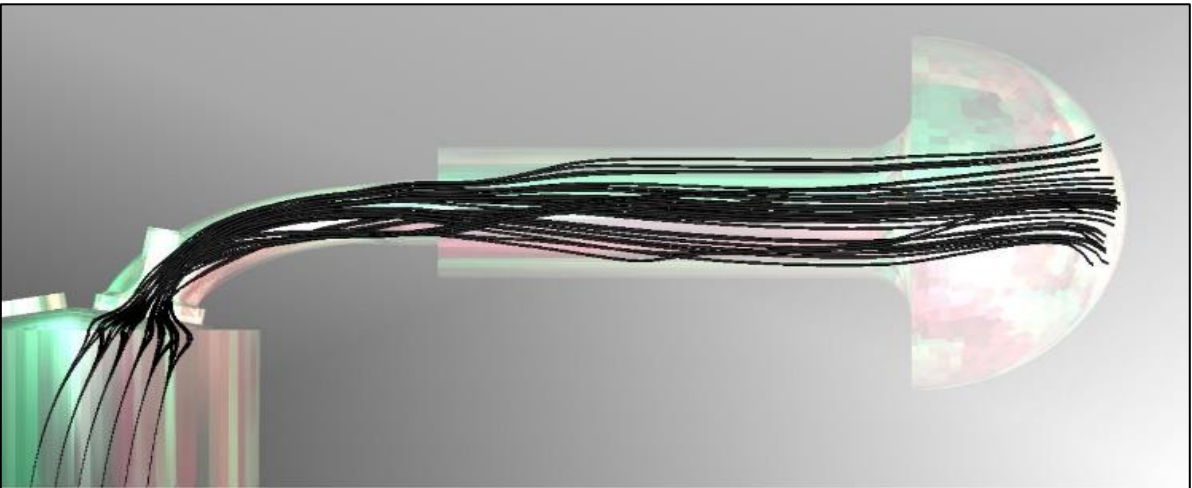
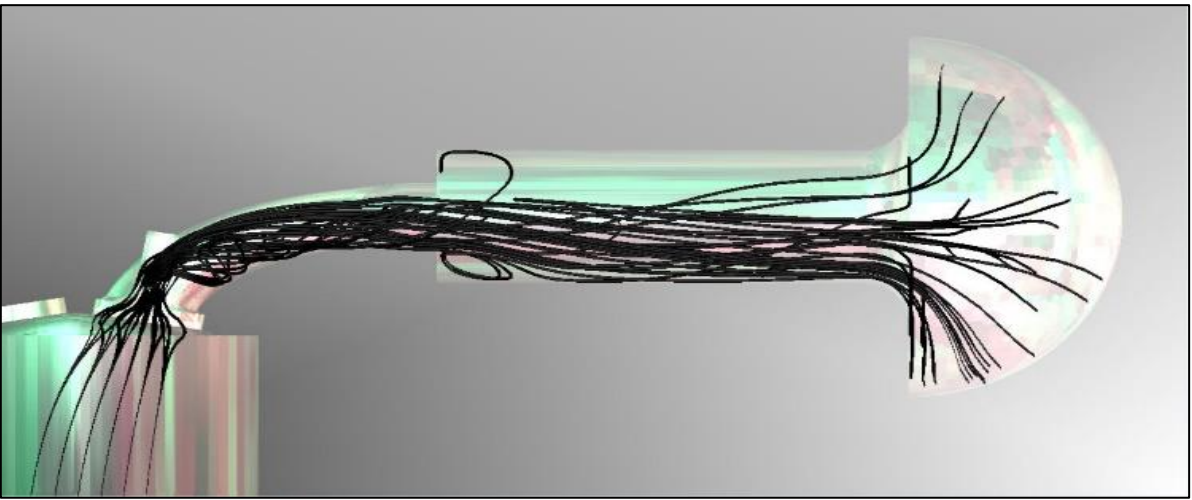
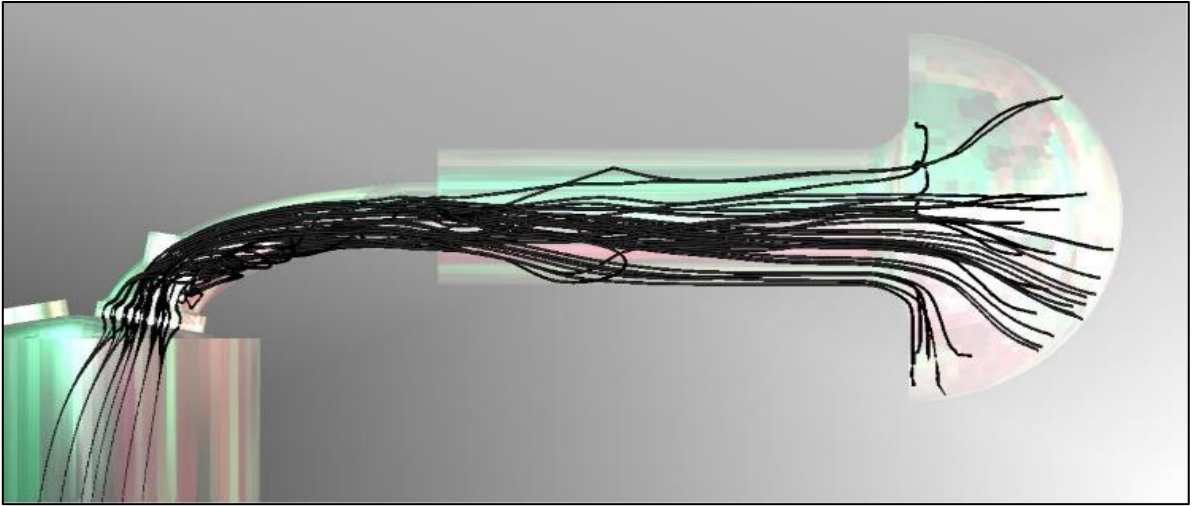


Fig. 57: Flussaggio lato scarico, streamlines delle alzate 2 mm (alto), 4 mm (centro) e 7 mm (basso)

4 - Simulazione di un ciclo trascinato

Calcolati i coefficienti di scarico si è effettuato il setup effettivo per simulare il motore in studio. Primo passo, come già fatto per l'attività di flussaggio, è stato quello di realizzare la mesh da utilizzare nel software CFD. A differenza dell'attività di flussaggio, dove le condizioni iniziali e al contorno erano fissate dall'esperienza, era necessario ricavarle. È stato utilizzato il software opensource OpenWAM, un codice monodimensionale sviluppato dal politecnico di Valencia, realizzando uno schema a blocchi del motore. Dagli output del codice 1-D è stato possibile ricavare i dati di input e le condizioni al contorno necessarie al lancio della simulazione 3-D del motore in trascinato.

4.1 - Realizzazione della mesh

Non si scenderà nei dettagli del procedimento per la realizzazione della griglia. Le differenze sostanziali rispetto alla mesh generata per l'attività di flussaggio sono le seguenti:

- Il fondo del cilindro non è stato allungato come nel caso del flussaggio. Si chiude con una corona di spessore 0.3 mm che è una boundary attraverso cui esce/entra massa anche a valvole chiuse (portata di blow-by: sperimentalmente si è notato che durante la compressione si ha una perdita di massa che però viene in parte recuperata durante la fase di espansione);
- Non sono presenti le due emisfere collegate ai condotti interni, poiché si trattava di feature specifiche richieste dalla simulazione di flussaggio;
- Sono state aggiunte nuovamente le geometrie di candela e iniettore, con i loro relativi edge e refinement;
- In fase di realizzazione della mesh è stato imposto il movimento delle valvole in modo che seguissero la legge imposta dalle camme (presente in Figura 44 del precedente capitolo). Particolare attenzione va rivolta all'alzata residua lasciata tra valvola e tenuta, posta pari a 0.25 mm (differenza da segnalare al software durante il setup per la mesh). La necessità di lasciare questa alzata residua è legato al fatto che qualsiasi software CFD non può creare delle celle con volume nullo (0.25 mm è l'altezza minima che FIRE riesce a gestire senza dare errori);
- Così come per le valvole, è stata inserita anche la legge di moto del pistone (in base a lunghezza di biella, corsa e asse di moto), in modo che la mesh vada ad espandere/comprimere la camera di combustione correttamente.

Una volta modificato il setup, è stata ottenuta la nuova mesh da utilizzare per le simulazioni in trascinato.

4.2 - Modello motore in OpenWAM

Il modello realizzato in OpenWAM è riportato nella Figura 58. I componenti riconoscibili, procedendo da sinistra verso destra, sono:

- Il blocco da cui entra l'aria dall'ambiente esterno (si tratta di un polmone a fissata temperatura e pressione);
- Il collettore di aspirazione;
- La biforcazione del condotto di aspirazione poco dopo l'attacco al collettore;
- Le valvole di aspirazione (qui insieme alla legge d'alzata è stato inserito l'andamento del C_D ; stessa cosa per il lato di scarico);
- Il cilindro (è stato riportato l'unico cilindro operativo);
- Le valvole di scarico;
- L'unione del condotto di scarico poco prima dell'attacco al "collettore";
- Lo scarico in ambiente.

Non essendo presente un vero e proprio collettore di scarico e avendo riscontrato dei problemi in fase di simulazione, è stato aggiunto un condotto (il collegamento 4 in Figura 58) di lunghezza e diametro equivalente alla linea che dai condotti di scarico entro testa porta fino allo scarico in ambiente.

I due blocchi presenti nell'angolo in alto a sinistra sono quelli necessari al lancio della simulazione e alla specifica del tipo di motore. Nel passare da un ciclo trascinato ad una combustione sarà proprio in quei blocchi che si andrà a definire la quantità di combustibile iniettato e la legge di rilascio calore.

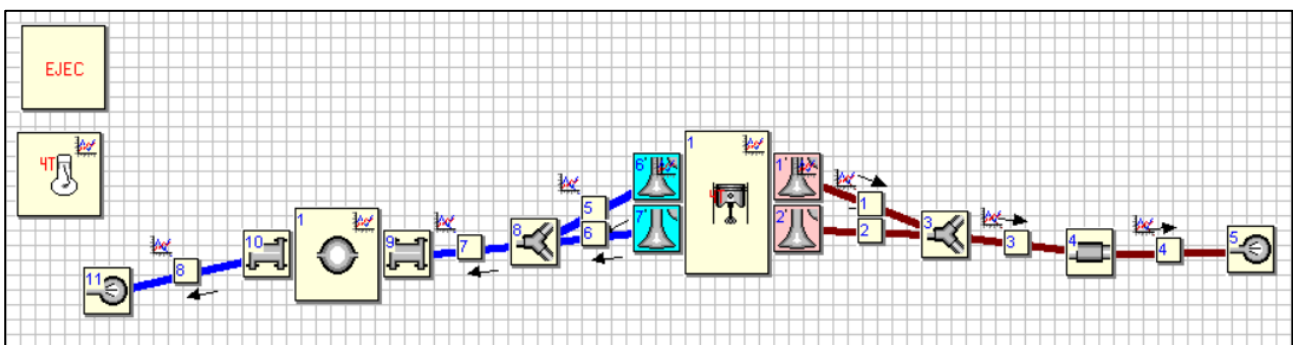


Fig. 58: Schema a blocchi del motore ad accesso ottico

In Tabella 6 sono riportate le condizioni iniziali date ai vari componenti: più vicine sono queste condizioni alla realtà, più velocemente il codice andrà a convergenza. Scopo dell'attività è valutare le condizioni al contorno e iniziali del motore, quindi sono stati attivati numerosi scarichi di dati lungo tutta la catena, di modo da poter confrontare gli output con i dati sperimentali disponibili.

	Temperatura (° C)	Pressione (bar)
Collettore d'aspirazione	25	1
Condotti di aspirazione	30	1
Pistone	110	-
Cilindro	100	-
Testa	90	-
Condotti di scarico	50	0.9
Ambiente	25	1

Tab. 6: Ciclo trascinato, condizioni iniziali OpenWAM

4.2.1 - Dati sperimentali

Trattandosi di un ciclo trascinato, il dato utilizzato per confrontare i risultati della simulazione monodimensionale è la traccia di pressione misurata al banco e rappresentata in Figura 59.

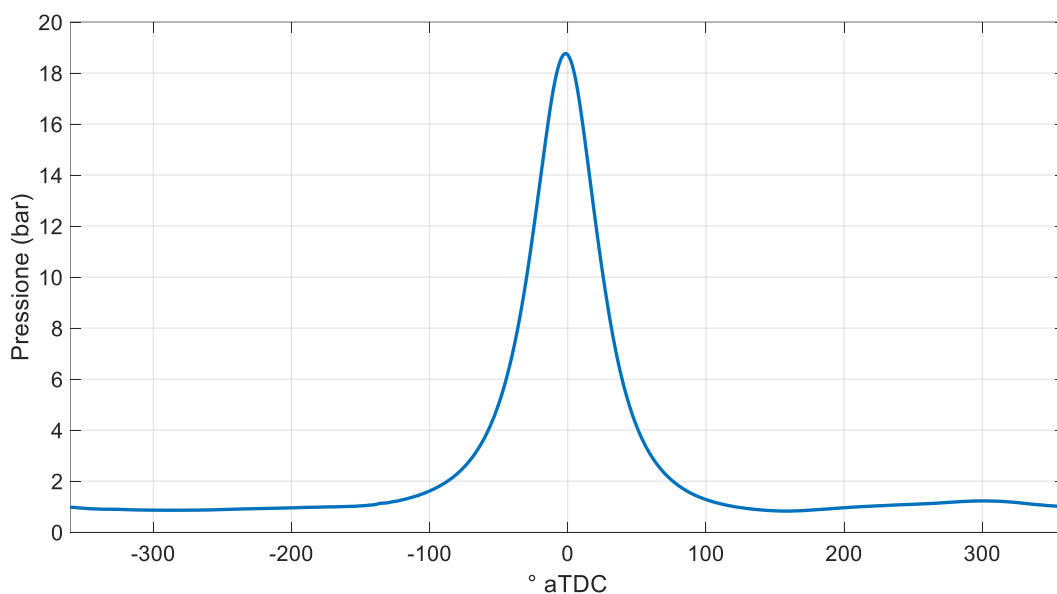


Fig. 59: Ciclo trascinato, traccia sperimentale di pressione

Si può notare che il picco di pressione è leggermente anticipato rispetto all'angolo 0. Questo fenomeno è comunemente chiamato "loss angle": a causa di scambio termico a parete e blow-by (molto importante in questo specifico motore), il picco di pressione viene raggiunto prima dell'effettiva fine della fase di compressione; l'anticipo angolare del TDC effettivo viene appunto chiamato "loss angle".

4.2.2 - Risultati del modello OpenWAM

La Figura 60 mostra un confronto tra la pressione valutata da OpenWAM e quella misurata sperimentalmente al banco. Nella zona bassa sono riportate anche le pressioni nell'ambiente di aspirazione e di scarico, le quali si aggirano sempre intorno alla pressione ambientale. Sul picco è visibile una differenza di circa 5 bar, imputabile al fatto che nella simulazione monodimensionale non si sta considerando il blow-by, quindi è presente più aria in camera a fine compressione. In doppia scala è rappresentata anche la portata attraverso input e output ("In Flow" e "Ex Flow" rispettivamente). Per il sistema di riferimento di OpenWAM, la portata in output è positiva se uscente dalla camera, viceversa per la portata in input. È evidente in entrambi i casi che non appena si apre la valvola si ha del backflow nei primi istanti. Punto critico che ha richiesto particolare attenzione è la "gobba" che la simulazione vede all'incrocio delle valvole, come se ci fosse rientro di aria dallo scarico, cosa evidentemente non vera come si vede dall'andamento della portata di scarico. Quello che succede in quella zona è un incremento della pressione dovuto al fatto che l'azione di compressione del pistone è più forte rispetto allo svuotamento della camera; conseguenza diretta è la risalita momentanea della portata di scarico fino all'esaurirsi di questo fenomeno e alla chiusura della valvola stessa.

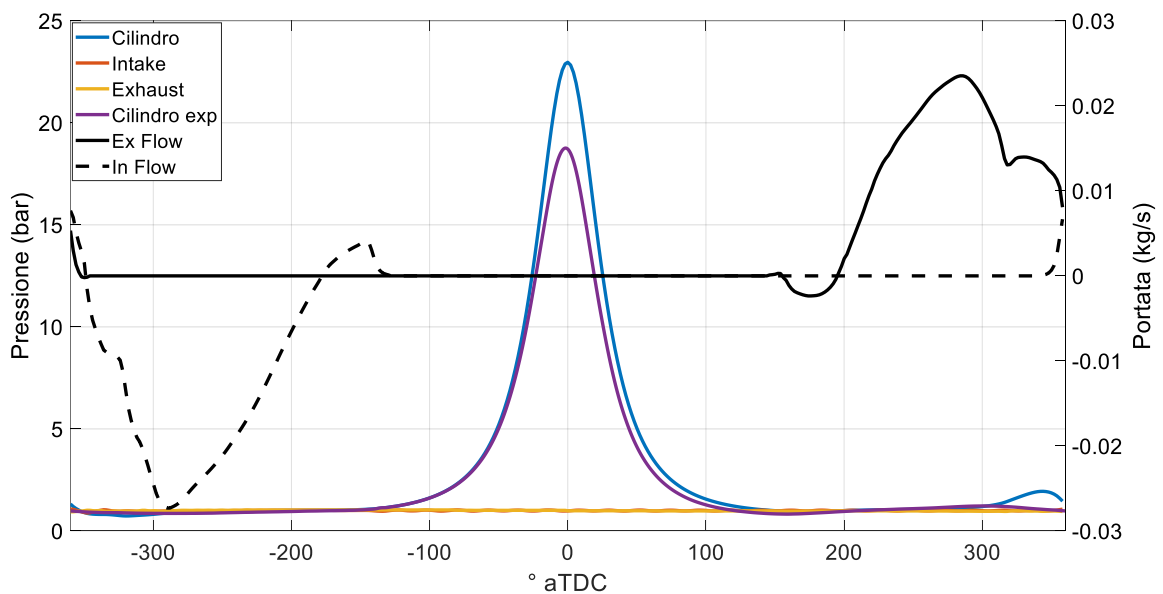


Fig. 60: Risultati OpenWAM, pressioni e portate

La Figura 61 mostra l'andamento della temperatura nel cilindro, nei condotti di aspirazione ("Intake") e nei condotti di scarico ("Exhaust"). È lasciata in sovrapposizione la portata in ingresso/uscita, di modo da notare che nella stessa zona in cui si vedeva la pressione momentaneamente risalire, anche la temperatura ha un picco locale.

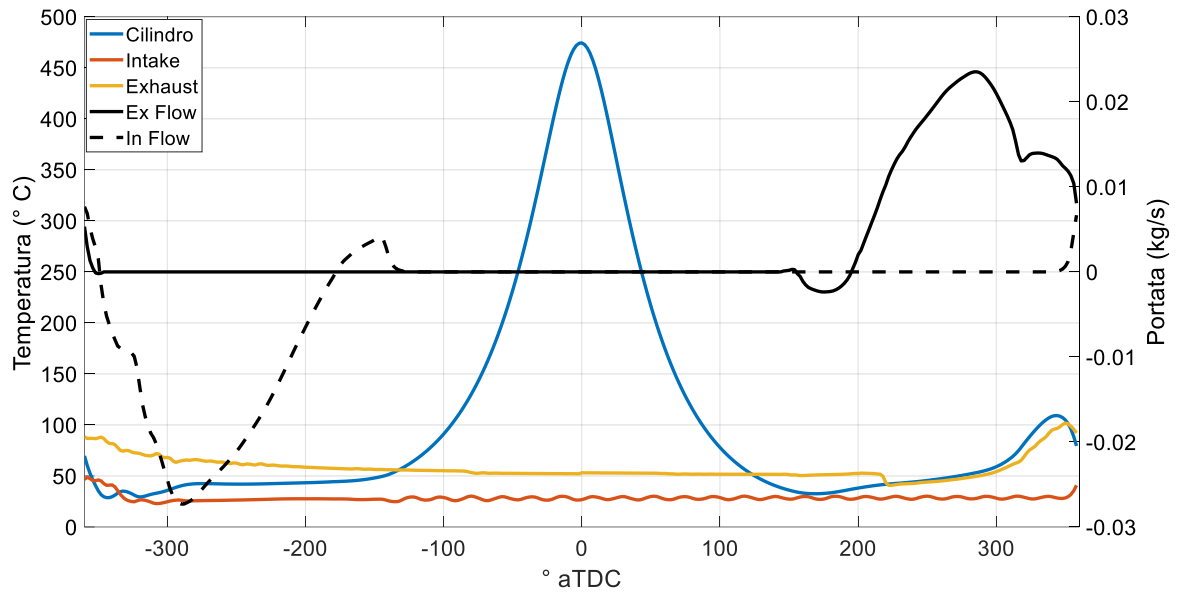


Fig. 61: Risultati OpenWAM, temperature e portate

La Figura 62 mostra nel dettaglio l'andamento della temperatura nei due ambienti di aspirazione e scarico.

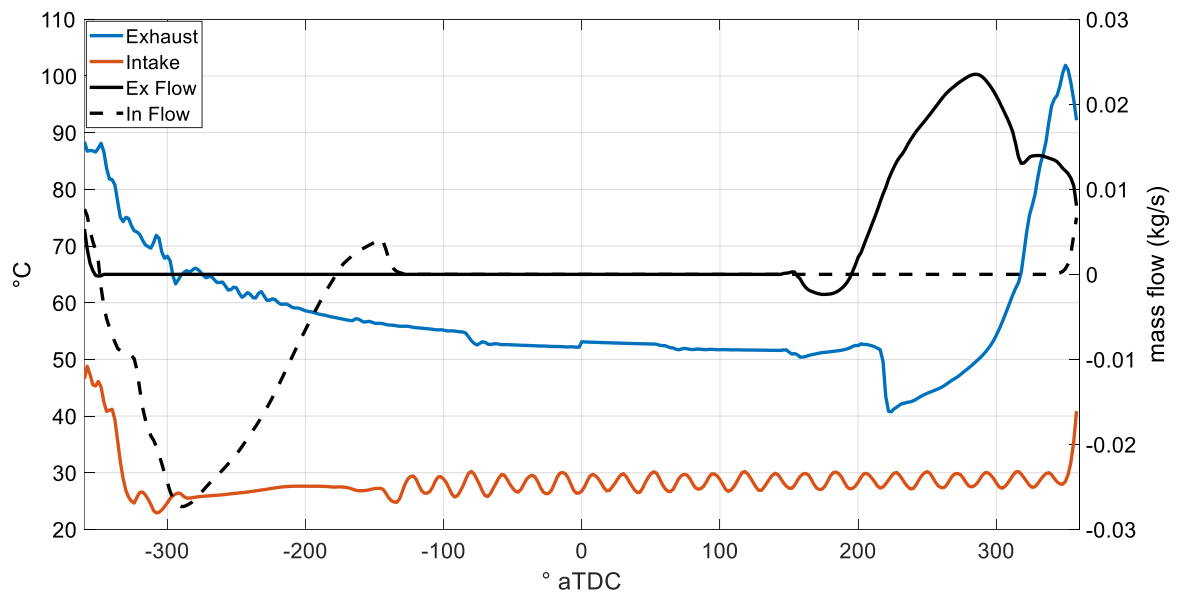


Fig. 62: Risultati OpenWAM, temperature e portate (2)

La Figura 63 rappresenta l'andamento della portata attraverso le boundary di inlet e di outlet, ossia le boundary che collegano la mesh all'ambiente. Al di fuori dalle zone di apertura delle valvole le portate sono state poste pari a 0.

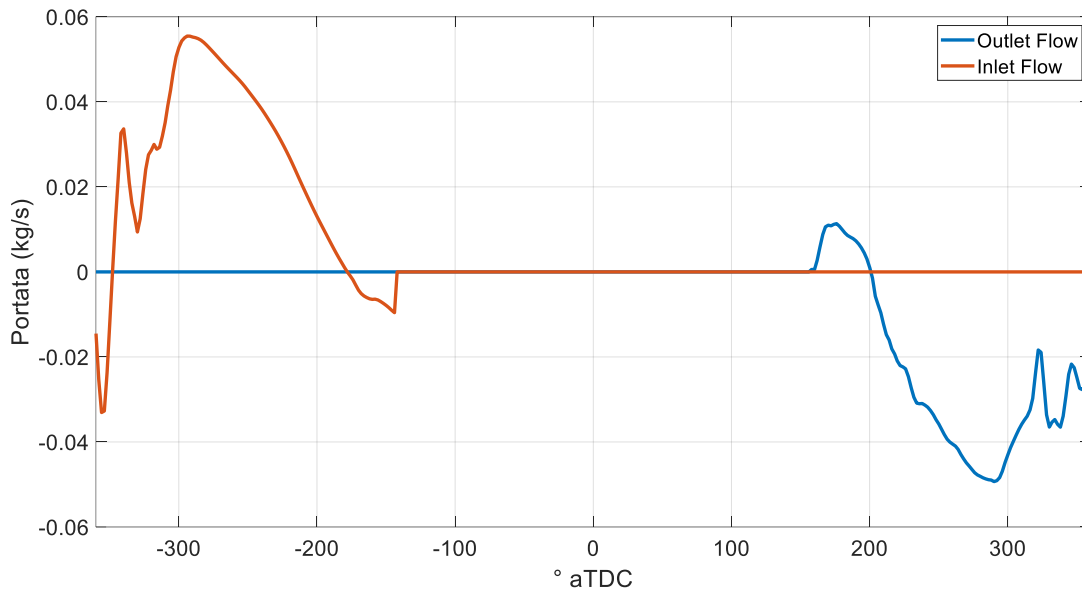


Fig. 63: Risultati OpenWAM, portata in ingresso ed in uscita

I dati quindi disponibili per lanciare la simulazione in trascinato sono:

- Le temperature delle boundary (queste in realtà sono state fissate su un criterio d'esperienza);
- L'andamento della temperatura dei 3 ambienti di interesse (intake, cilindro, exhaust). Avendo a disposizione l'intero ciclo, si possono facilmente individuare le condizioni iniziali in ogni istante di tempo;
- Le portate attraverso le boundary di inlet e outlet.

4.3 - Simulazione 3D CFD

Scopo di questa parte dell'attività era cercare di cogliere al meglio l'andamento della pressione in camera misurato sperimentalmente al banco. Non è stato un processo tanto scontato ed immediato quanto ci si potrebbe aspettare da un ciclo senza combustione: da una parte il trascinato non porta dietro le criticità legate allo spray, alla formazione della miscela in camera e alla taratura della legge di rilascio calore, ma dall'altra solitamente non si fanno analisi CFD di un tale ciclo, né si prende in considerazione la portata di blow-by, che invece gioca un ruolo fondamentale in questo motore.

La Tabella 7 riporta il setup di base della simulazione (con 720 l'angolo in cui si avrebbe l'inizio della fase utile di espansione).

	CA (deg) aTDC	
Angolo inizio simulazione	140	
Angolo fine simulazione	870	
Passo	Angolare (deg)	Temporale (s)
Fino a 142 CA (deg) aTDC	0.005	4.2×10^{-7}
Fino a 358 CA (deg) aTDC	0.5	4.2×10^{-5}
Fino a 362 CA (deg) aTDC	0.05	4.2×10^{-6}
Fino a 870 CA (deg) aTDC	0.5	4.2×10^{-5}

Tab. 7: Ciclo trascinato, setup di base

In Tabella 8 sono riassunte le condizioni al contorno ed iniziali utilizzate per la prima simulazione. Le condizioni al contorno fissate sono le temperature di tutte le boundary facenti parte della geometria. Nel caso in cui la boundary sia collegata con l'esterno (scambia massa con l'ambiente) è stata anche data in input la legge che tale portata segue (si veda Figura 63 per le boundary di Input e Output, Figura 64 per la boundary di blow-by). Le condizioni iniziali sono essenzialmente le temperature e pressioni a cui i 3 ambienti in considerazione si trovano all'istante in cui ha inizio la simulazione.

La Figura 64 mostra la portata di blow-by imposta sull'omonima boundary. È stata ricavata tramite un codice 0-D e impostata nel setup di FIRE. La portata è negativa quando uscente dalla camera, positiva se entrante.

La Tabella 9 riporta i fattori di sottorilassamento utilizzati nella simulazione.

Condizioni al contorno		
	Temperatura (° C)	Altro
Valvole di scarico	87	-
Valvole di aspirazione	67	-
Inlet	30	Tabella di portata in massa
Outlet	50	Tabella di portata in massa
Blow-by	107	Tabella di portata in massa
Pistone	107	-
Cilindro	87	-
Testa	97	-
Condotti di scarico	47	-
Condotti di aspirazione	37	-
Candela	140	-
Condizioni iniziali		
	Temperatura (° C)	Pressione (bar)
Cilindro	40	1.045
Condotti di scarico	55	1
Condotti di aspirazione	30	1

Tab. 8: Ciclo trascinato, condizioni al contorno ed iniziali

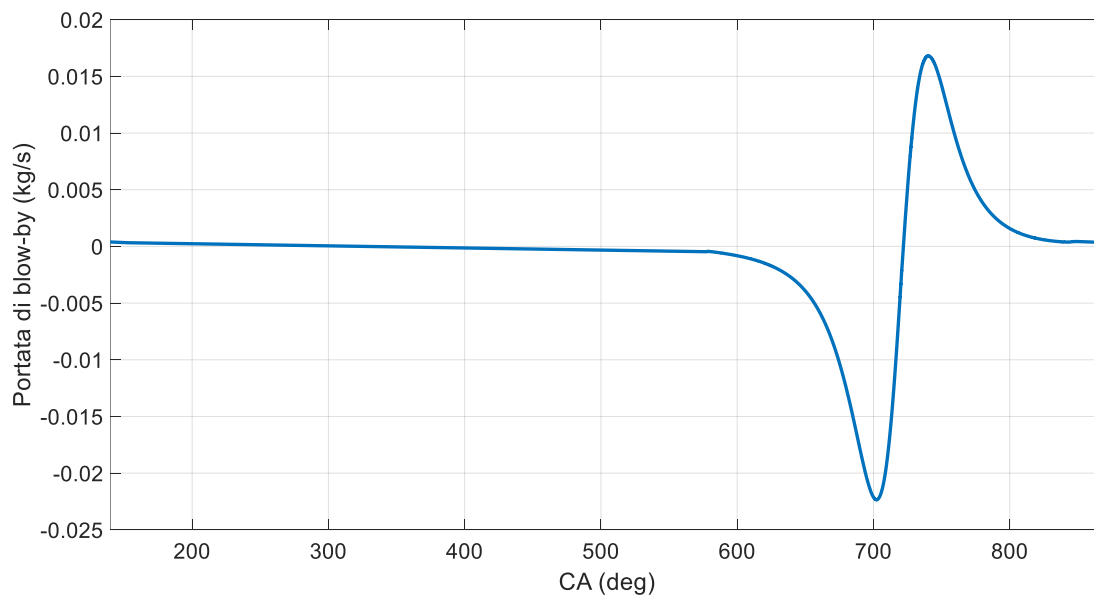


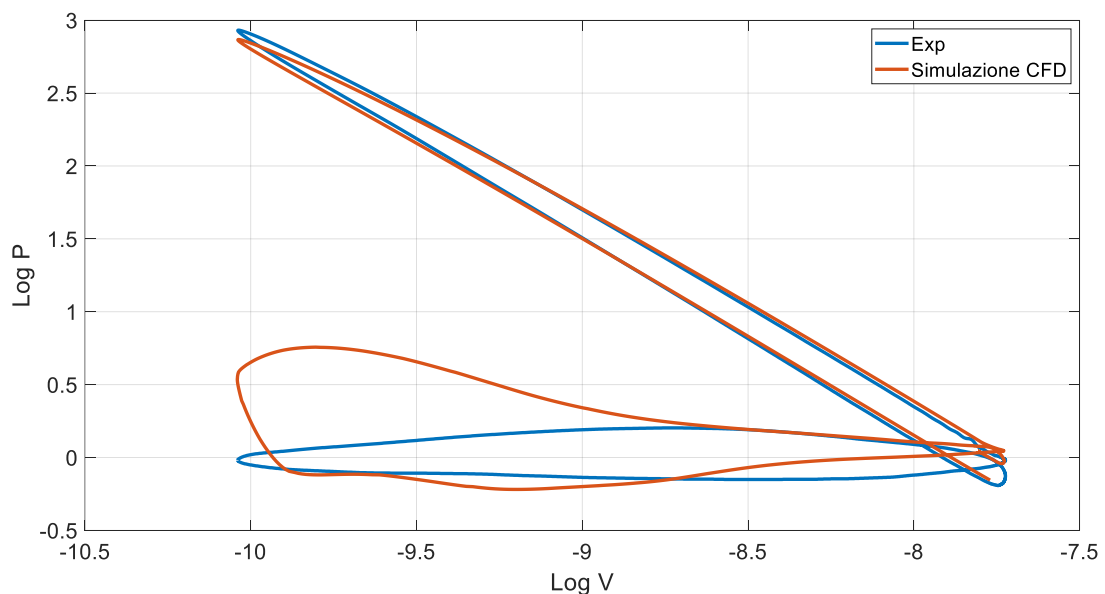
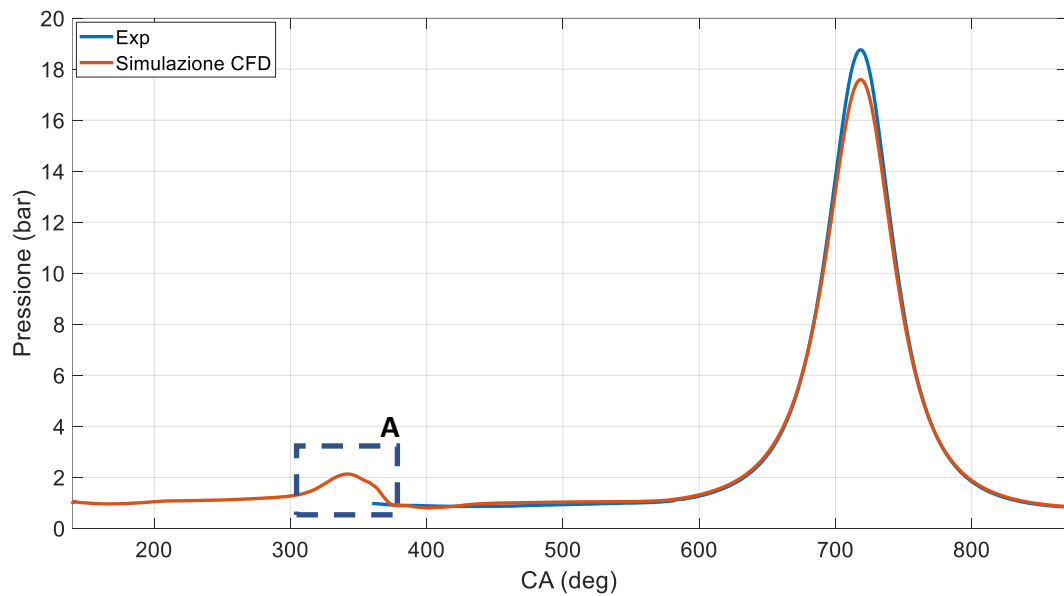
Fig. 64: Ciclo trascinato, portata di blow-by

Fattori di sottorilassamento	
Momentum	0.4
Pressure	0.4
Turbolent kinetic energy	0.1
Turbolence dissipation rate	0.1
Energy	0.8

Tab. 9: Ciclo trascinato, fattori di sottorilassamento

4.4 - Risultati

La Figura 65 mostra un confronto tra la pressione misurata sperimentalmente e quella raggiunta in camera durante la simulazione. Partendo da sinistra, si può innanzitutto notare come quel leggero picco di pressione (dettaglio A in figura) in corrispondenza dell'incrocio sia presente anche in FIRE. Passando poi al picco in corrispondenza del TDC, si nota come si stia sottostimando la pressione di circa 1 bar. Al fine di capire meglio quali possano essere le motivazioni di tale errata stima, sono stati plottati anche il diagramma di indicatore (Figura 66) e l'andamento della massa intrappolata in camera (Figura 67).



In Figura 66 si nota sul diagramma di indicatore la differenza nell'area di pompaggio, sempre collegata al picco locale della pressione all'incrocio delle valvole. Altra cosa che si può notare è la differenza dell'inclinazione tra le due curve nelle zone di compressione ed espansione. Si ricorda che in quelle zone il gas subisce una compressione politropica che segue la formula:

$$P \times V^k = \text{cost.}$$

Dove:

- P = pressione del gas [Pa]
- V = volume del gas [mm³]
- k = indice della politropica [-] (caratteristico del fluido in uso)

Poiché si sta utilizzando un diagramma di indicatore e quindi una scala doppio-logaritmica, l'indice "k" è ciò che determina l'inclinazione della curva.

L'ultimo confronto fatto è riportato in Figura 67 dove, non avendo a disposizione i dati sperimentali, è stato usato come riferimento per la massa intrappolata il valore di massa valutata per il medesimo ciclo da GTPower, un software utilizzato dal CNR il cui output è ritenuto sufficientemente affidabile. Quello che si può vedere sono due andamenti molto allineati: il distacco diventa sostanziale verso la fine del ciclo. Per spiegare il trend di risalita della massa intrappolata visibile a fine ciclo bisogna ricordare che nel settore angolare 730-800° aTDC si ha rientro di massa dalla boundary di blow-by.

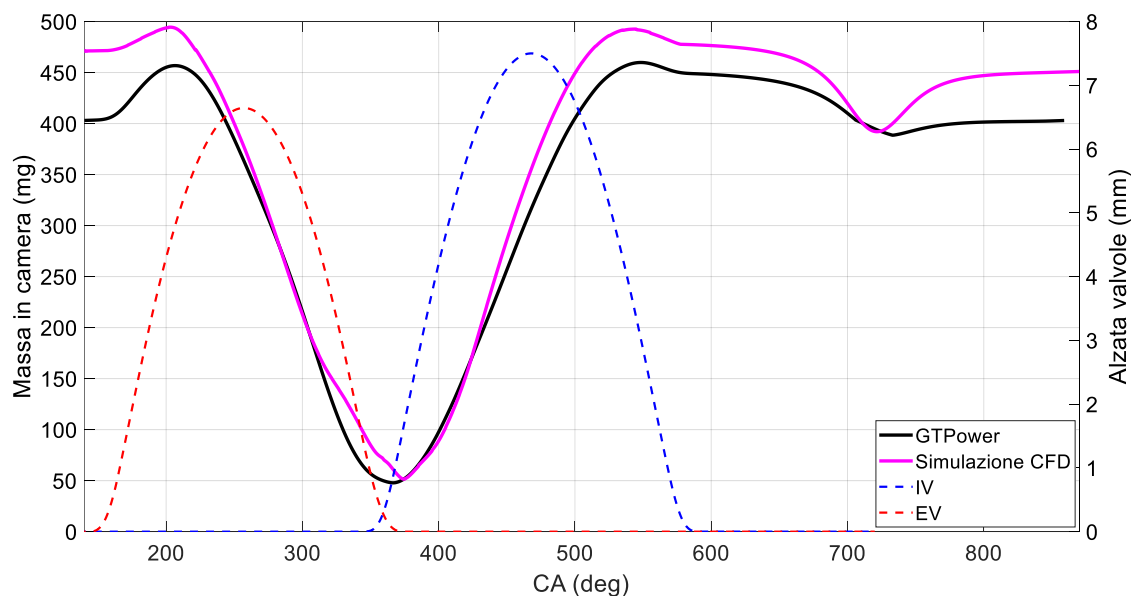


Fig. 67: Ciclo trascinato, massa intrappolata in camera

I risultati della prima simulazione mostrano come non si sia effettivamente lontani dal caso reale, ma c'è bisogno di lavoro di rifinitura per andare a comprendere meglio alcuni punti focali:

- quanto sia forte l'influenza delle condizioni iniziali e al contorno sull'output della simulazione
- il coefficiente "k" ed eventuali scambi termici eccessivi a parete
- l'affidabilità dell'integrazione del modello di blow-by come portata sulla boundary

Poiché, come già detto, si tratta di un motore particolare (testa piatta in quarzo, "collarini" che limitano la portata in ingresso ed uscita) simulato in trascinato, è stata ritenuta opportuna una fase di indagine dei possibili setup e modelli in uso.

4.5 - Simulazione 3D CFD, test operativi

Sono ora riportati in serie i test operativi fatti sul motore in studio per il ciclo trascinato. La Tabella 10 riassume tutti i test fatti, il caso “standard” è quello di default analizzato nel capitolo precedente. Al fine di facilitare la lettura, i test sono stati divisi per “approccio” ed analizzati singolarmente nei capitoli successivi.

Caso	RC	Temperatura boundary testa/cilindro/pistone (° C)	Pressione iniziale nel cilindro (bar)	Temperatura iniziale nel cilindro (° C)	Funzione di parete
Standard	10.6	97 / 87 / 107	1.045	40	Hybrid Han & Reitz
Caso 1	10.6	97 / 87 / 107	0.872	40	Hybrid Han & Reitz
Caso 2	10.6	140 / 110 / 200	0.872	40	Hybrid Han & Reitz
Caso 3	10.6	250 / 250 / 250	0.872	40	Hybrid Han & Reitz
Caso 4	10.6	97 / 87 / 107	0.872	30	Hybrid Han & Reitz
Caso 5	10.6	97 / 87 / 107	0.872	30	Hybrid Han & Reitz
Caso 6	10.3	140 / 110 / 200	1.045	40	Standard log-law
Caso 7	10.3	75 / 40 / 80	1.045	30	Hybrid Han & Reitz

Tab. 10: Ciclo trascinato, test operativi

4.5.1 - Modifica delle condizioni al contorno ed iniziali

In Figura 68 è riportato un dettaglio del grafico di Figura 66. Ciò che si può notare è che le condizioni iniziali del ciclo non corrispondono a ciò che il software CFD vede alla fine del ciclo stesso (e che quindi dovrebbero costituire le condizioni iniziali del ciclo successivo).

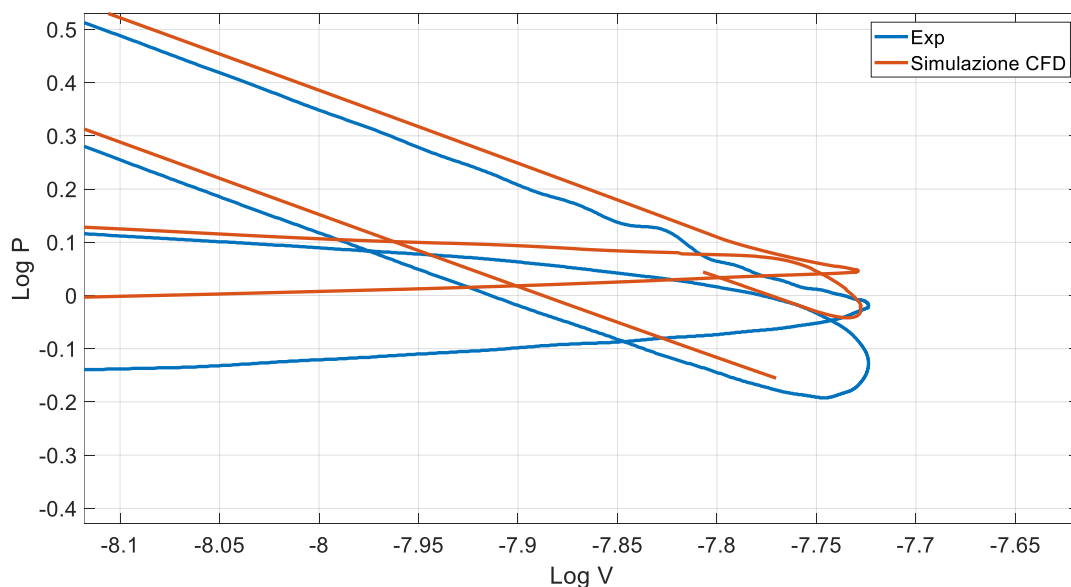


Fig. 68: Ciclo trascinato, test operativi, dettaglio diagramma d'indicatore

Il problema potrebbe quindi essere legato alle condizioni iniziali inserite nel setup. Il Caso 1 prevede un abbassamento della pressione iniziale del cilindro (da 1.045 bar a 0.872 bar, valore della pressione preso dalla curva sperimentale). Ciò che ci si aspetta è, data la minore pressione nel cilindro, una maggiore quantità di aria entrante e, quindi, intrappolata a TDC. Allo stesso tempo però la compressione ha inizio da una pressione più bassa: è logico aspettarsi un picco inferiore. Osservando la Figura 69, è proprio questa seconda evenienza che si verifica.

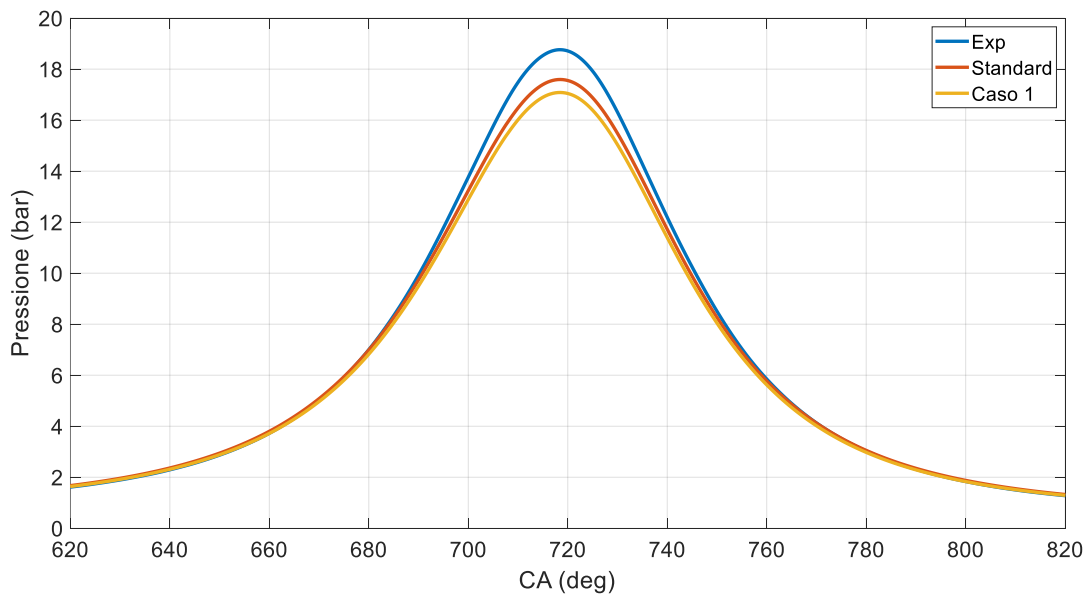


Fig. 69: Test operativi, Caso 1, traccia di pressione

I due test successivi hanno lo scopo di testare l'influenza della temperatura delle boundary. Il Caso 2 ha delle temperature di boundary per cilindro, pistone e testa più elevate rispetto al caso standard, ma ancora abbastanza vicine alla realtà. Nel Caso 3 si sono innalzate queste temperature a livelli insensatamente alti con lo scopo di vedere quale sia l'effetto sensibile di tale azione. Ciò che si attende è un incremento del picco di pressione: essendo le pareti che si affacciano alla camera di combustione più calde, esse cedono più calore al gas durante la prima fase del ciclo, ed allo stesso tempo ne assorbono meno in espansione. La Figura 70 mostra l'avvicinamento al picco di pressione desiderato (questo test è stato realizzato anche con la pressione iniziale nel cilindro più bassa rispetto al caso standard), ma probabilmente il bar di pressione che mancante non si trova in un problema di scambio termico a parete.

Si sono quindi abbassate sia la pressione sia la temperatura iniziale nel cilindro, tenendo ai valori standard le temperature delle boundary in un caso ed alzandole leggermente nell'altro, in modo da vedere anche l'effetto combinato delle modifiche. Partire da una temperatura nel cilindro più bassa significa avere una maggiore densità del gas e, combinata alla pressione iniziale più bassa, porta ad avere più massa intrappolata in camera. Ancora una volta, come si nota in Figura 71, si è guadagnato qualche decimo di bar, ma il problema che porta la traccia di pressione simulata a non essere sovrapposta alla sperimentale sembra non essere legato alle condizioni al contorno o iniziali.

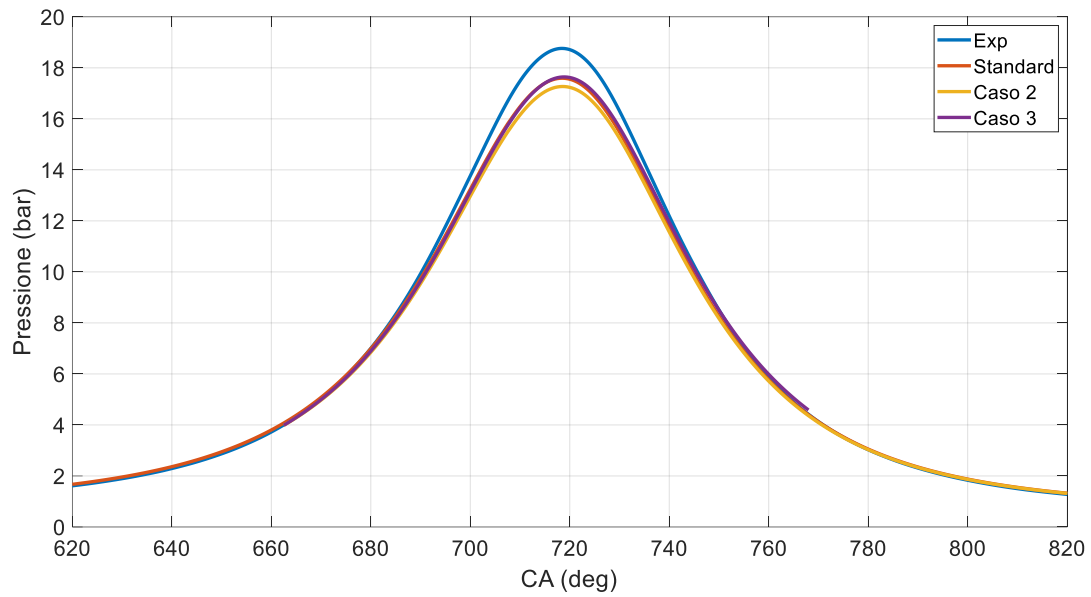


Fig. 70: Test operativi, Caso 2-3, traccia di pressione

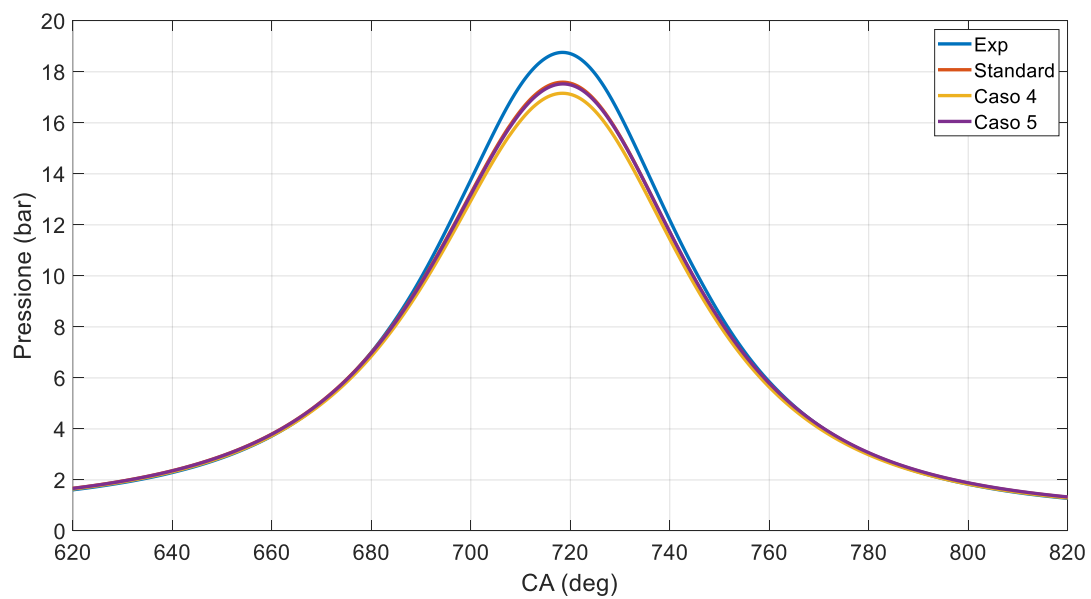


Fig. 71: Test operativi, Caso 4-5, traccia di pressione

4.5.2 – Modifica della funzione di parete

Nel simulare il comportamento di un fluido nei pressi di pareti solide, è necessario utilizzare una mesh sufficientemente raffinata per cogliere i fenomeni che avvengono in quella zona critica. Per superare questa difficoltà sono state elaborate strategie che evitino l'utilizzo di griglie con un numero eccessivo di celle nei pressi delle pareti. Nei test fino ad ora effettuati è stata utilizzata la funzione di parete "Hybrid Han & Reitz";

il problema nell'utilizzare questo setup potrebbe essere che non si fanno mai analisi CFD di un ciclo trascinato, quindi tale funzione potrebbe essere tarata "in alto", ossia regolata in modo che lavori in maniera efficiente ed efficace con fluidi a temperature e pressioni decisamente più elevate rispetto a quelle che si osservano nel caso al momento in studio. In questo senso, è stato fatto un test utilizzando la funzione di parete "Standard log-law" (entrambe le funzioni erano presenti in FIRE). In realtà, come si vede in Figura 72, neanche questo sembra essere il problema della simulazione.

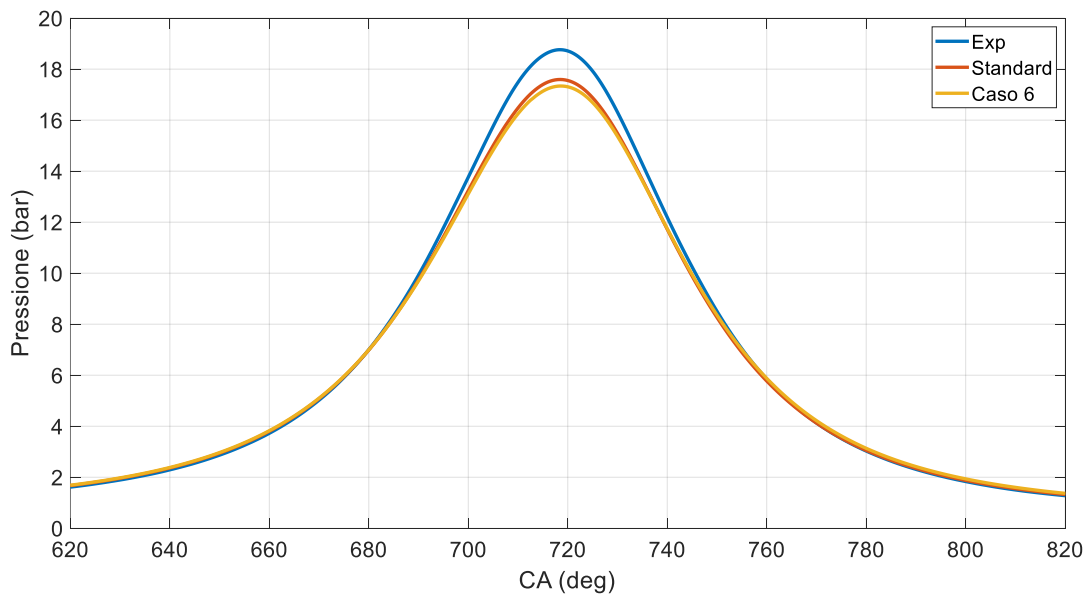


Fig. 72: Test operativi, Caso 6, traccia di pressione

4.5.3 - Controllo con sensore di pressione

All'interno della camera di combustione si possono facilmente generare delle onde di pressione, ed in base al posizionamento dei sensori si possono andare a misurare grandezze con valori falsati rispetto a quelli reali. Nel Caso 7 è stato posizionato in camera un sensore di pressione, di modo da confrontare sia la pressione media nel cilindro sia quella misurata in un intorno del sensore. Il sensore simulato è stato posizionato nello stesso punto in cui si trova il quello fisico nel motore al banco. Nel caso è stata inoltre modificata la temperatura delle boundary di testa, cilindro e pistone, la quale è stata notevolmente abbassata in modo da studiare l'effetto di tale parametro anche nello spettro basso delle temperature.

La Figura 73 mostra che in realtà la pressione media e quella misurata dal sensore sono sovrapponibili, quindi il problema non è imputabile a delle eventuali onde di pressione.

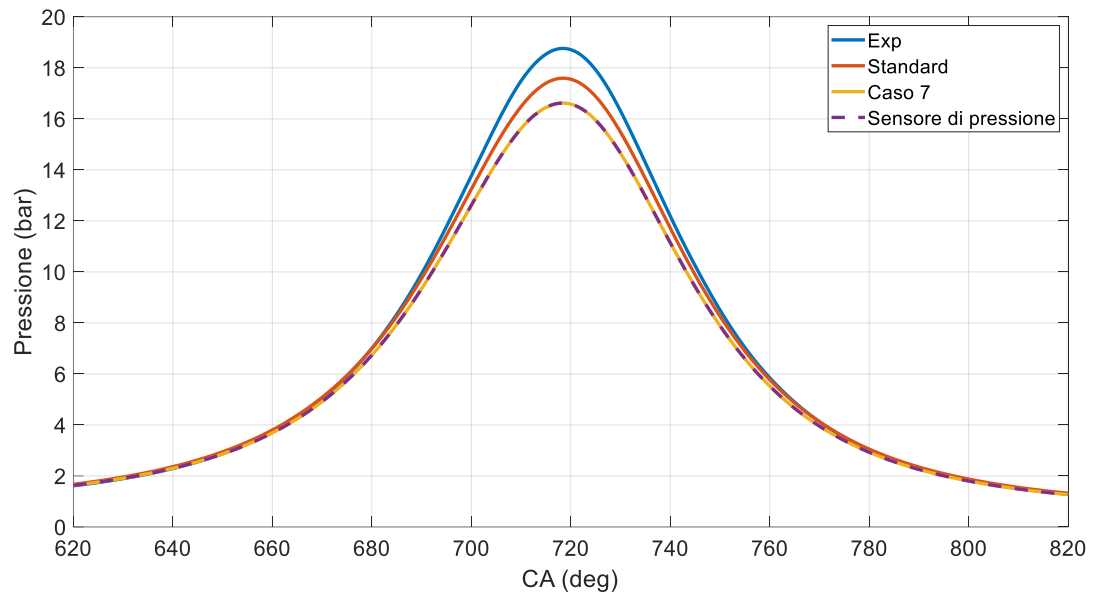


Fig. 73: Test operativi, Caso 7, traccia di pressione

4.6 - Blow-by con boundary di pressione

Avendo riportato scarsi risultati con i precedenti tentativi, si è deciso di cambiare approccio sul come introdurre il blow-by nella simulazione. Ad ora era inserita direttamente la portata attraverso la boundary, quindi il software semplicemente attuava tale portata a prescindere dalle condizioni in camera. Si è deciso di fare un passo indietro e cambiare la natura della boundary di blow-by, trasformandola in una boundary di pressione: in FIRE si impone una legge di pressione statica (valutata sempre dallo stesso programma 0-D) ed il codice calcola in autonomia la portata fluente attraverso la boundary, sia in termini di quantità sia di direzione. È stata inoltre cambiata la portata attraverso le boundary di inlet e outlet: come si nota dalla Figura 74, si è deciso di non annullare manualmente la portata attraverso le suddette boundary al di fuori della zona di apertura delle valvole, lasciando quindi la portata oscillare in tali settori angolari.

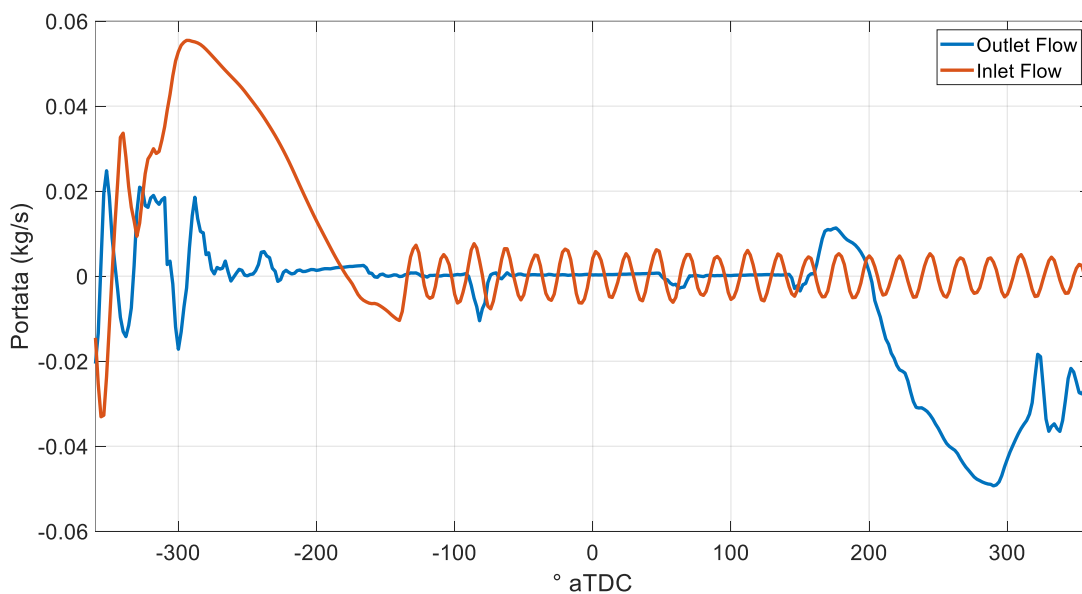


Fig. 74: Ciclo trascinato, BND di pressione, portate in ingresso ed uscita

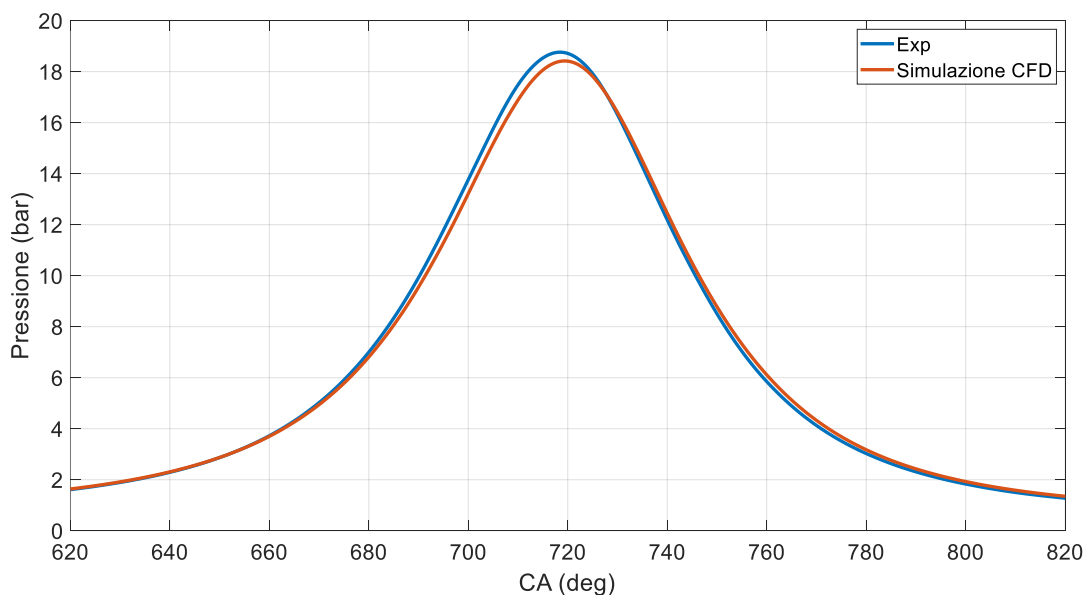


Fig. 75: Ciclo trascinato, BND di pressione, traccia di pressione

La Figura 75 mostra una traccia di pressione simulata estremamente aderente a quella sperimentale: l'errore sul picco si attesta intorno al 1.8%.

Sono riportati nelle Figure 76-77, come verifica del caso appena simulato, il diagramma di indicatore (le due curve non sono ancora perfettamente parallele in fase di compressione ed espansione, ma ora sono molto prossime) e l'andamento della massa intrappolata nel cilindro.

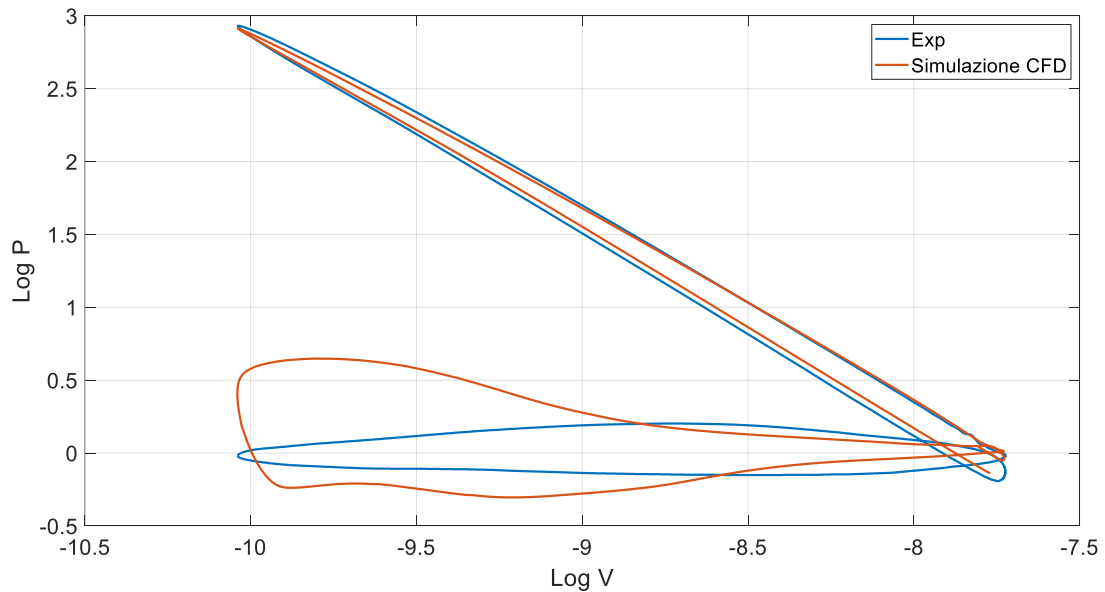


Fig. 76: Ciclo trascinato, BND di pressione, diagramma di indicatore

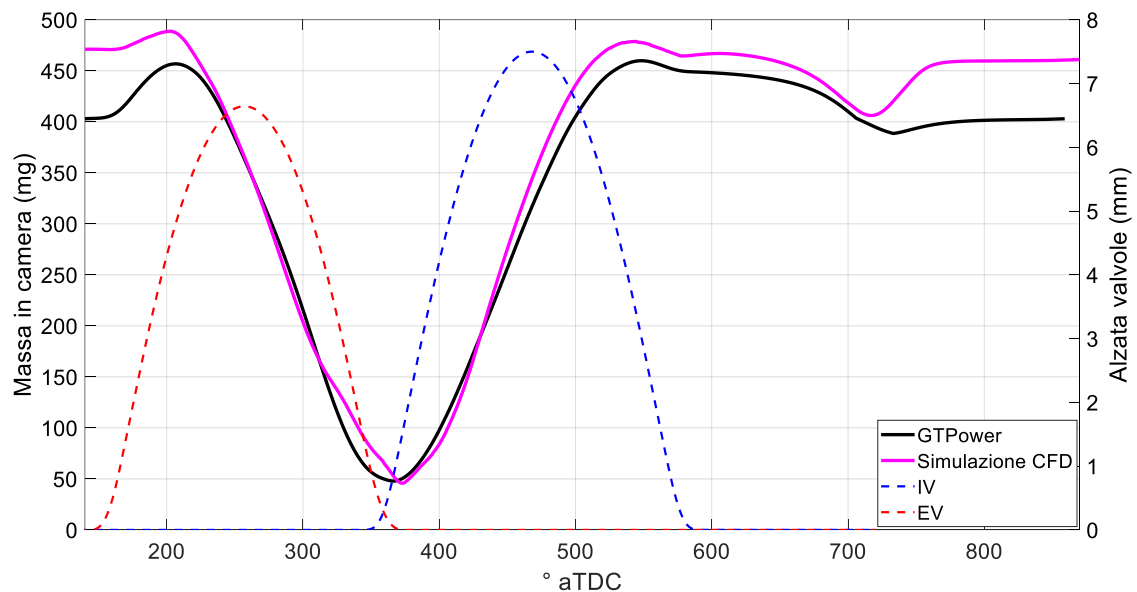


Fig. 77: Ciclo trascinato, BND di pressione, massa intrappolata in camera

5 - Simulazione di un ciclo con combustione

Dopo aver ottenuto dei risultati soddisfacenti per il ciclo trascinato si è deciso di passare ad un ciclo con combustione. Le attività da portare a termine seguono la traccia di quelle già viste per nel capitolo precedente: preparazione della mesh, ricerca delle condizioni al contorno ed iniziali tramite OpenWAM, preparazione del setup in FIRE.

5.1 - Realizzazione della mesh

Non si scenderà nei dettagli del procedimento per la realizzazione della griglia. Le differenze sostanziali dalla mesh generata per il precedente ciclo simulato sono le seguenti:

- Infittimento della zona dell'iniettore nel settore angolare 400-500° aTDC. Il SOI (start of injection, angolo in cui si inizia ad iniettare carburante in camera) è a 430° aTDC, con una DOI (duration of injection, durata angolare dell'iniezione) di 39°.
- Infittimento della zona della candela nel settore angolare 700-870° aTDC. Lo SA (spark advance, angolo a cui scocca la scintilla) è a 706° aTDC.

I due infittimenti sono visibili nella Figura 78. Nel caso dell'iniettore, il refinement si rende necessario per riuscire a cogliere al meglio la fase di ingresso di combustibile in camera e la sua vaporizzazione. L'infittimento sulla candela è invece a cavallo della zona in cui è presente combustione ed è indispensabile perché il programma valuti correttamente la fase di accensione e i primi istanti di avanzamento del fronte di fiamma.

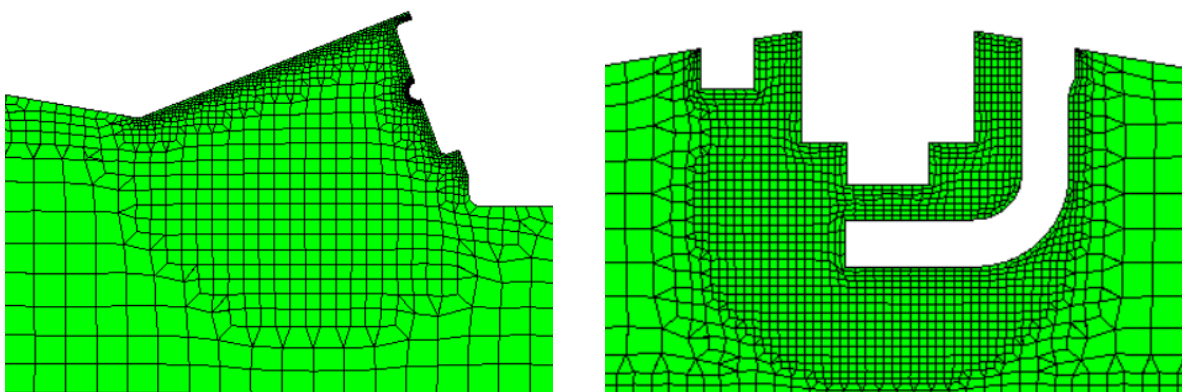


Fig. 78: Dettaglio refinement di candela e iniettore

5.2 - Modello motore in OpenWAM

Lo schema a blocchi utilizzato è il medesimo già visto nel capitolo precedente in Figura 53. Unica modifica apportata è l'iniezione di carburante in camera e la definizione della legge di rilascio calore, che segue una classica Wiebe. All'interno di OpenWAM tale funzione è scritta come segue:

$$X_b = \beta \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-C \cdot \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{\Delta\alpha_0} \right)^{m_0+1} \right] \right\}$$

Dove:

- X_b : frazione di combustibile bruciato [-] (in funzione di α)
- β : porzione di fuel considerata [-] (nel caso di multi-injection β permette di dividere la Wiebe sulle varie injection)
- C : percentuale di combustibile iniettato e bruciato [-] (solitamente intorno allo 0.95)
- α : angolo a cui si valuta X_b [° aTDC]
- α_0 : fase della combustione [° aTDC] (angolo di inizio combustione)
- $\Delta\alpha_0$: durata della combustione [deg]
- m_0 : fattore di forma [-]

I coefficienti utilizzati sono riportati in Tabella 11.

Parametri delle Wiebe	
β (-)	1
C (-)	0.92
α_0 (° aTDC)	-8
$\Delta\alpha_0$ (deg)	68
m_0 (-)	1.15

Tab. 11: Ciclo con combustione, parametri della Wiebe

In Tabella 12 sono riportate le condizioni iniziali date ai vari componenti.

	Temperatura (° C)	Pressione (bar)
Collettore d'aspirazione	40	1
Condotti di aspirazione	50	1
Pistone	267	-
Cilindro	207	-
Testa	247	-
Condotti di scarico	350	0.9
Ambiente	25	1

Tab. 12: Ciclo con combustione, condizioni iniziali OpenWAM

5.2.1 - Dati sperimentali

I dati sperimentali a disposizione sono la traccia di pressione e il lambda (misurato allo scarico), insieme ad alcuni parametri di combustione.

In Figura 79 sono riconoscibili le fasi del ciclo: una volta chiuse le valvole d'aspirazione inizia la fase di compressione e poco dopo lo SA abbiamo una crescita repentina della pressione dovuto alla fase di combustione; superato il picco la combustione si è ormai esaurita e la pressione scende naturalmente con l'espansione della camera, fino ad avere una rapida caduta in corrispondenza dell'apertura delle valvole di scarico.

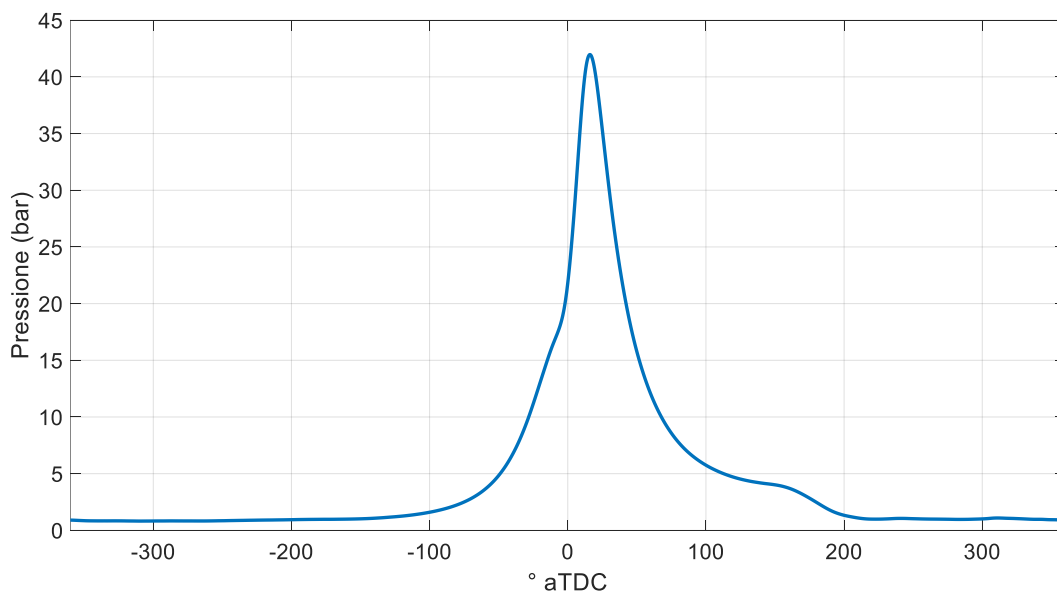


Fig. 79: Ciclo con combustione, traccia sperimentale di pressione

La Tabella 13 riporta il lambda (che sarà il target della simulazione) e alcuni valori notevoli della MFB. Con MFB si indica la "mass of fuel burnt", ossia la massa di carburante bruciata fino a quell'angolo: "MFB 10" rappresenta l'angolo in cui è stata bruciata il 10 % della massa di combustibile iniettata, mentre "Theta MFB 0-10" è l'intervallo angolare (da dopo lo SA) per passare dallo 0 % al 10 % di massa di combustibile bruciata.

Lambda (-)	1.043
MFB 10 (° aTDC)	2.6
MFB 50 (° aTDC)	12.2
MFB 90 (° aTDC)	70.8
Theta MFB 0-10 (deg)	16.6
Theta MFB 10-50 (deg)	9.6
Theta MFB 10-90 (deg)	68.2

Tab. 13: Ciclo con combustione, lambda e MFBxx

In Figura 80 è riportato l'andamento della MFB, traccia utile per tarare i parametri della legge di rilascio calore.

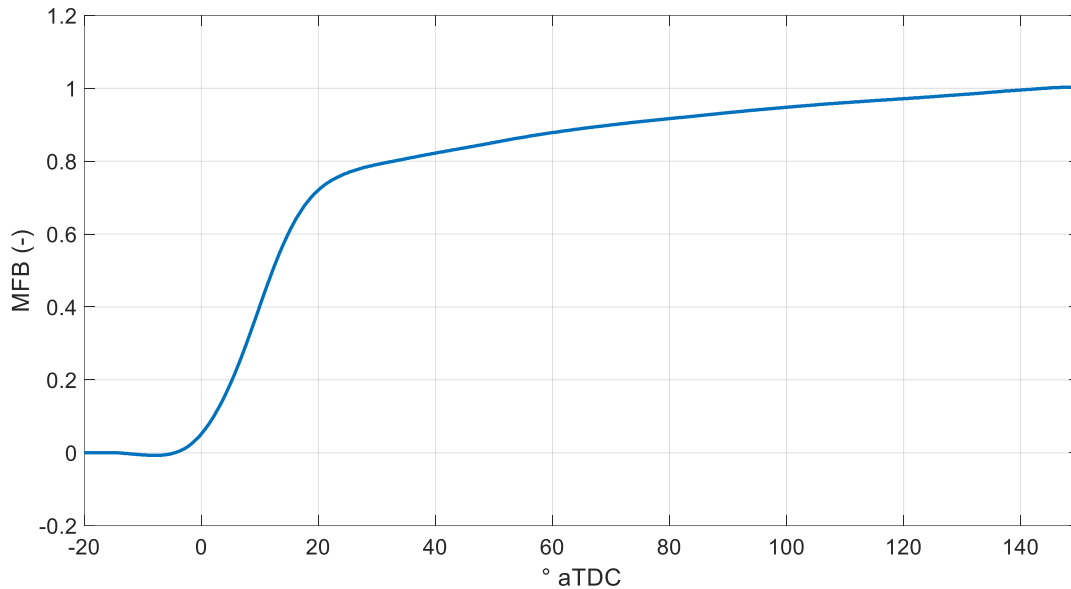


Fig. 80: Ciclo con combustione, traccia sperimentale della MFB

5.2.2 - Risultati del modello OpenWAM

In Figura 81 sono rappresentati gli andamenti della pressione nel cilindro, nei condotti di aspirazione e nei condotti di scarico. Come anche nel caso trascinato, è presente un offset tra la curva sperimentale e l'output del codice, dovuto alla portata di blow-by non considerata nella simulazione monodimensionale. In doppia scala è presente la portata attraverso le valvole di aspirazione e scarico.

In Figura 82 vediamo l'andamento della temperatura nei condotti di aspirazione, nel cilindro e nei condotti di scarico. L'andamento nel cilindro è quello atteso, con un repentino incremento della temperatura poco dopo SA. Anche il comportamento dello scarico segue le attese: non appena apriamo la valvola di scarico abbiamo gas caldi che entrano nei condotti, riscaldandoli; da questo deriva il picco osservabile intorno ai 150° aTDC. I condotti di aspirazione hanno un leggero incremento di temperatura all'apertura delle valvole, ma il valore resta pressoché costante durante tutto il ciclo.

La Figura 83 mostra le portate in ingresso e uscita dal motore. Avendo notato nel caso in trascinato un miglior comportamento della simulazione non appiattendole oscillazioni a valvole chiuse, si è deciso di caricare nel setup di FIRE le curve così come ottenute da OpenWAM.

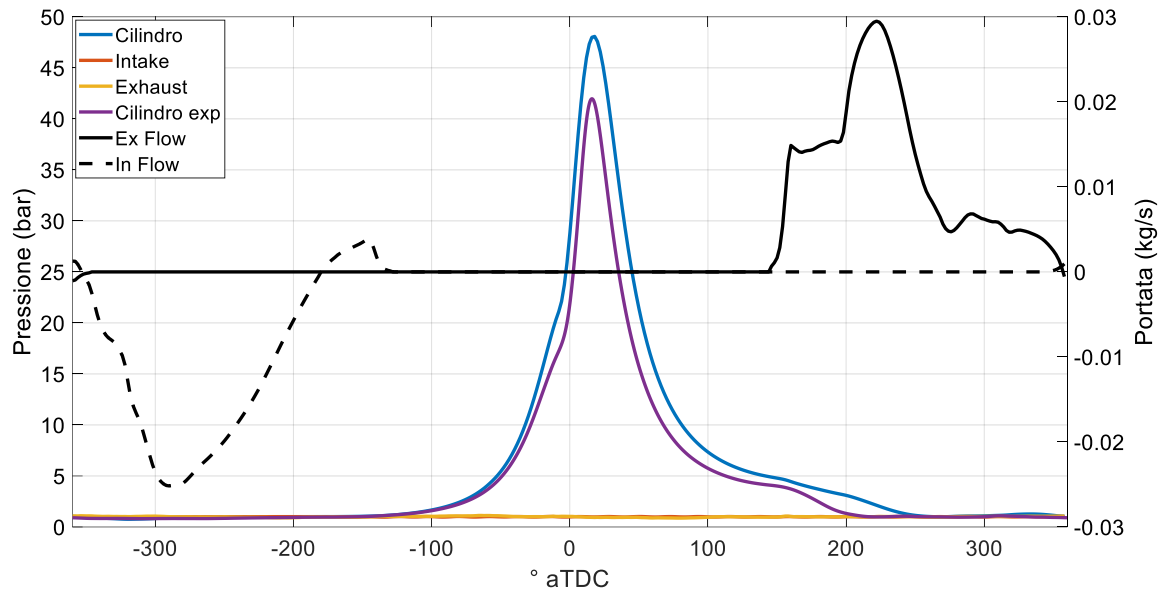


Fig. 81: Ciclo con combustione, risultati OpenWAM, pressione e portate

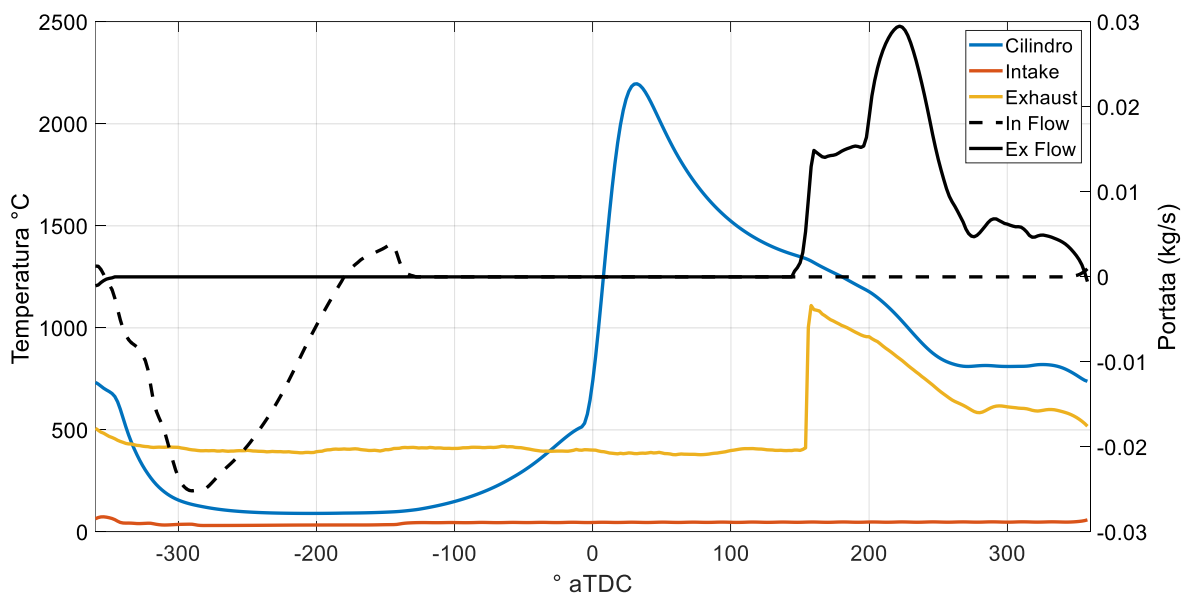


Fig. 82: Ciclo con combustione, risultati OpenWAM, temperature e portate

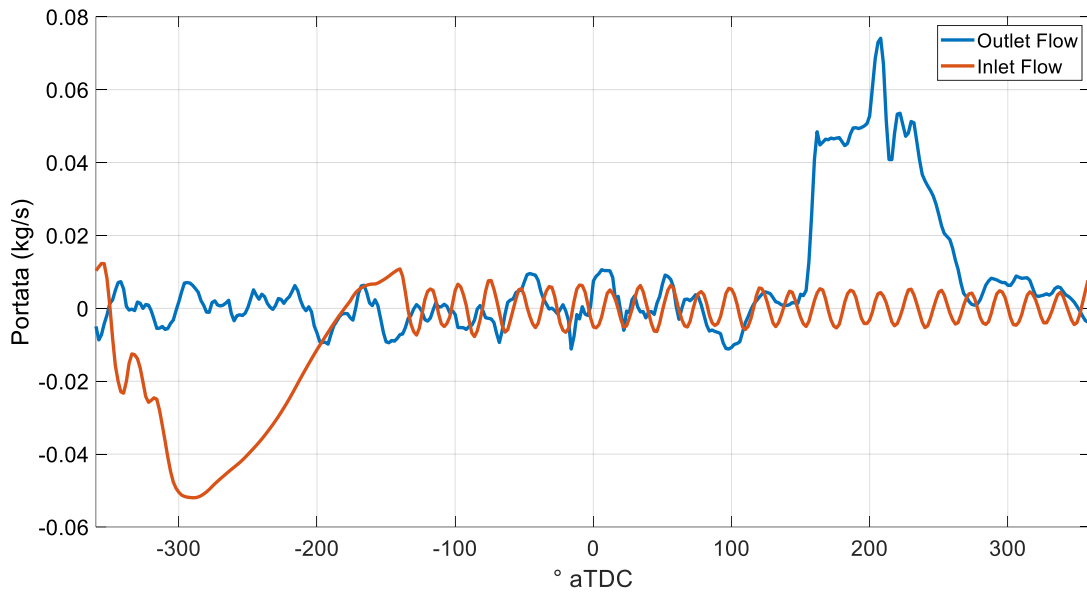


Fig. 83: Ciclo con combustione, risultati OpenWAM, portate in ingresso e uscita

5.3 - Aspirazione e compressione con iniezione di combustibile

Rispetto al ciclo trascinato, simulare una combustione richiede di dividere il ciclo in due fasi. In particolare si simula separatamente:

- il fine scarico, l'aspirazione e la contemporanea iniezione di combustibile. Questa simulazione arriverà fino allo SA.
- La combustione e la fase di espansione della camera. Si partirà da un backup poco prima dello SA per avere le condizioni in camera.

Prima fase è la simulazione dello spray e la verifica della corretta formazione della miscela.

Le Tabelle 14-16 mostrano il setup di base della simulazione, le condizioni al contorno e iniziali imposte ed i fattori di sottorilassamento utilizzati.

	CA (deg) aTDC	
Angolo inizio simulazione	300	
Angolo fine simulazione	706	
Passo	Angolare (deg)	Temporale (s)
Fino a 142 CA (deg) aTDC	0.1	8.3×10^{-6}
Fino a 358 CA (deg) aTDC	0.5	4.2×10^{-5}
Fino a 362 CA (deg) aTDC	0.01	8.3×10^{-7}
Fino a 706 CA (deg) aTDC	0.5	4.2×10^{-5}

Tab. 14: Fase di aspirazione e compressione, setup di base

Condizioni al contorno		
	Temperatura (° C)	Altro
Valvole di scarico	247	-
Valvole di aspirazione	200	-
Inlet	Tabella	Tabella di portata in massa
Outlet	Tabella	Tabella di portata in massa
Blowby	227	Tabella di pressione statica
Pistone	227	-
Cilindro	177	-
Testa	247	-
Condotti di scarico	400	-
Condotti di aspirazione	60	-
Candela	727	-
Condizioni iniziali		
	Temperatura (° C)	Pressione (bar)
Cilindro	810	1.094
Condotti di scarico	400	1
Condotti di aspirazione	50	1

Tab. 15: Fase di aspirazione e compressione, condizioni al contorno ed iniziali

Fattori di sottorilassamento	
Momentum	0.4
Pressure	0.4
Turbolent kinetic energy	0.1
Turbolence dissipation rate	0.1
Energy	0.8

Tab. 16: Fase di aspirazione e compressione, fattori di sottorilassamento

Le portate attraverso le boundary di inlet e di outlet sono quelle già riportate nella Figura 83. Per essere più aderenti possibili alla realtà si è deciso di aggiungere anche delle tabelle che riportassero anche l'andamento della temperatura (si veda Figura 84).

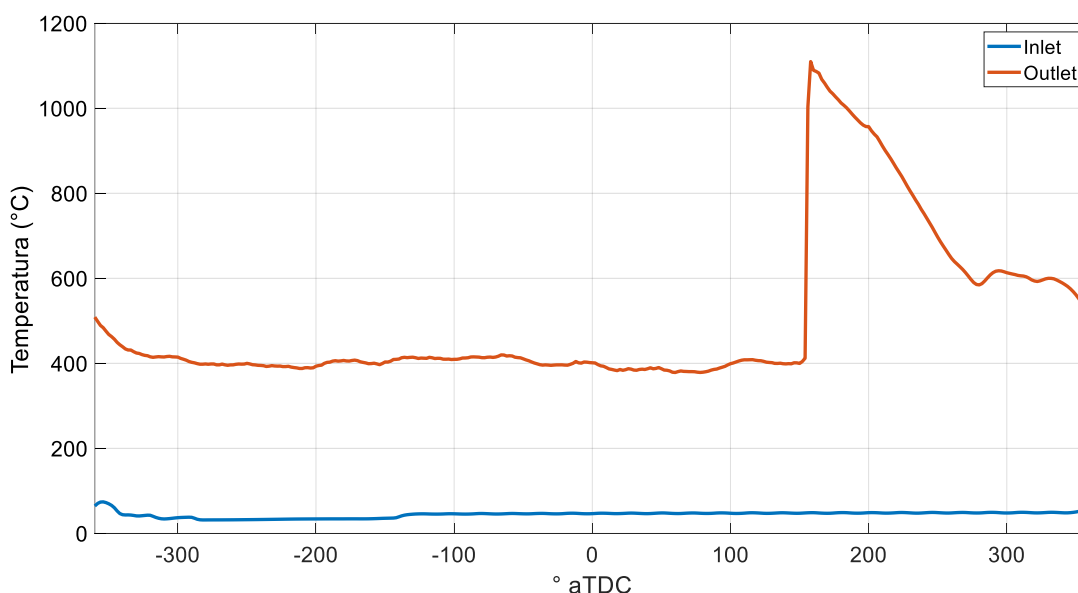


Fig. 84: Fase di aspirazione e compressione, boundary di temperatura

Come nel caso trascinato, è impostata una boundary di pressione statica sulla superficie di blow-by e lasciata al software la valutazione della portata. In Figura 85 è riportata la boundary di pressione utilizzata.

Trattandosi di una simulazione con lo spray attivo, c'è bisogno di preparare i settaggi per l'iniettore. La Tabella 17 mostra i principali parametri utilizzati. Il carburante in uso è la benzina, le cui caratteristiche chimico-fisiche sono prese dal database di FIRE. Dal modello CAD del motore sono state ricavate le posizioni dei singoli nozzle ed i coseni direttori dei rispettivi getti. La Figura 86 offre una visualizzazione di tali getti.

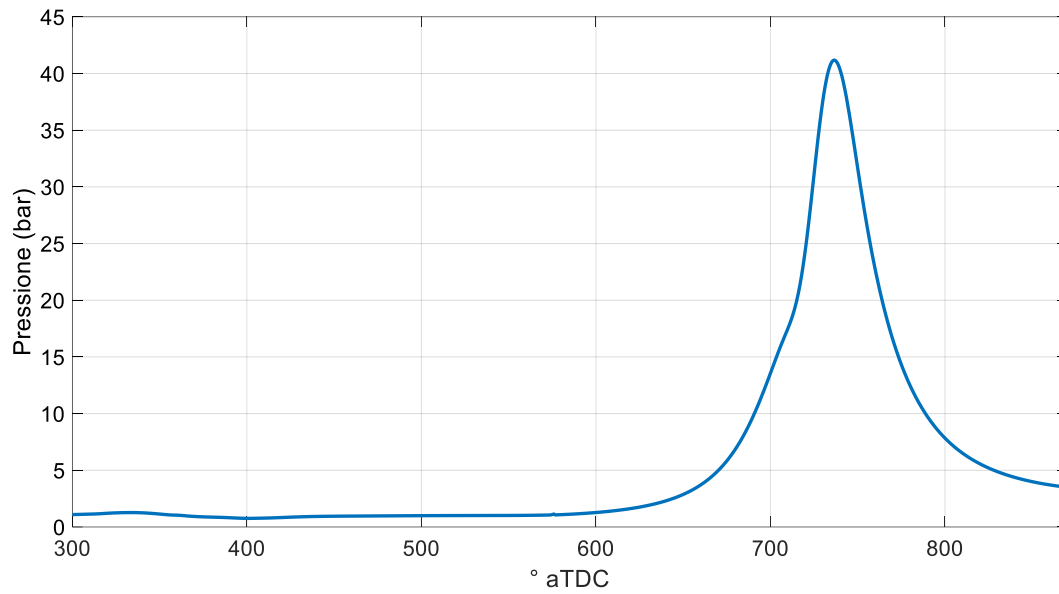


Fig. 85: Fase di aspirazione e compressione, boundary di pressione

Setup iniettore	
Combustibile	Benzina
Tipo di iniettore	Iniezione diretta
Pressione di iniezione (bar)	100
Portata iniettata (g/s)	8.4
# di nozzle	6
SOI (cad)	430
EOI (cad)	469
Massa iniettata (mg)	27.34
Φ particelle (mm)	0.14

Tab. 17: Fase di aspirazione e compressione, setup iniettore

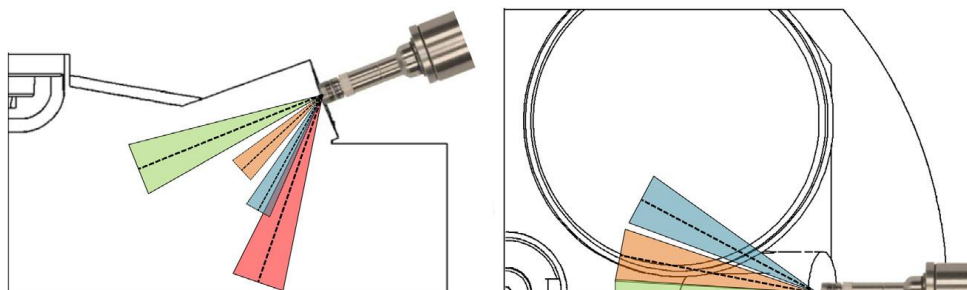


Fig. 86: Direzione getti dell'iniettore

5.3.1 - Risultati

Rispetto al caso analizzato nel capitolo precedente l'obiettivo della simulazione non è solo di seguire la traccia di pressione, ma soprattutto di raggiungere il lambda target fissato, pari a 1.043. La Figura 87 mostra l'andamento del titolo della carica fino a SA. È presente una miscela in camera decisamente più magra rispetto a quella attesa. Per comprendere meglio l'evoluzione del lambda con il ciclo sono stati realizzati i plot presenti nelle Figure 88-89.

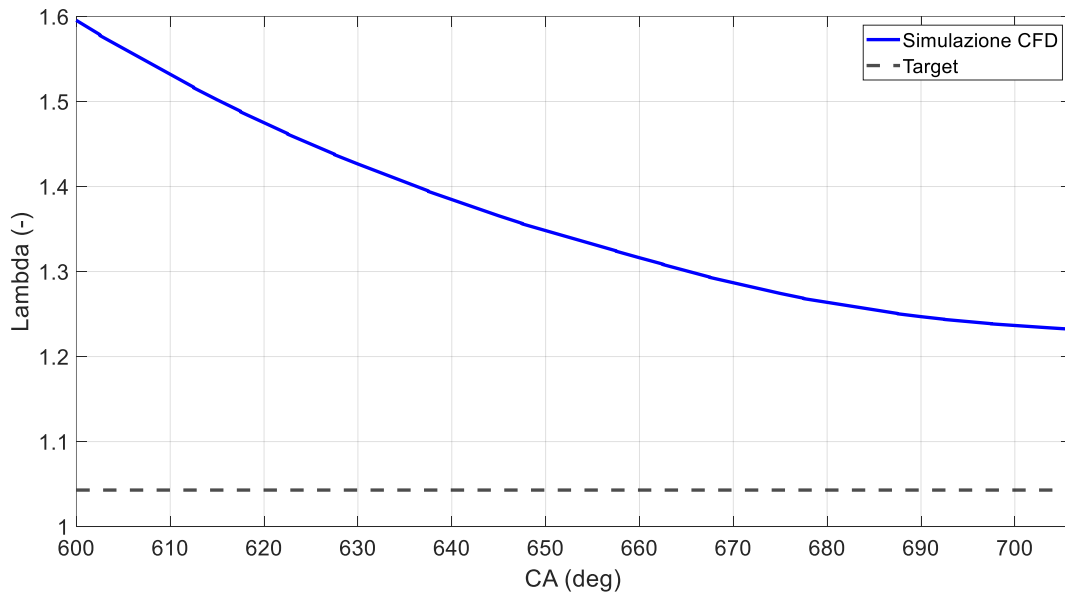


Fig. 87: Andamento di lambda

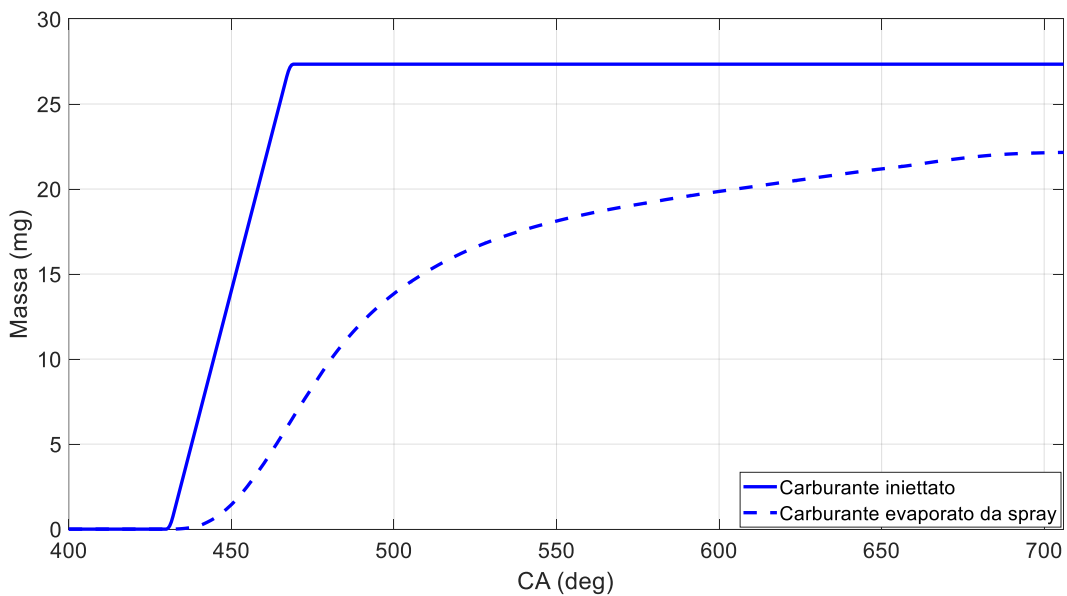


Fig. 88: Massa di combustibile evaporata

La Figura 88 confronta l'andamento della massa iniettata e la porzione della stessa che è evaporata in camera.

La Figura 89 confronta l'andamento della quantità di carburante che impatta le pareti e forma film fluido con quella che, dopo aver impattato, evapora e contribuisce al lambda della miscela. È importante segnalare che il "Film di combustibile" è una quantità istantanea, mentre il "Combustibile evaporato da film" è calcolato come un integrale nel tempo.

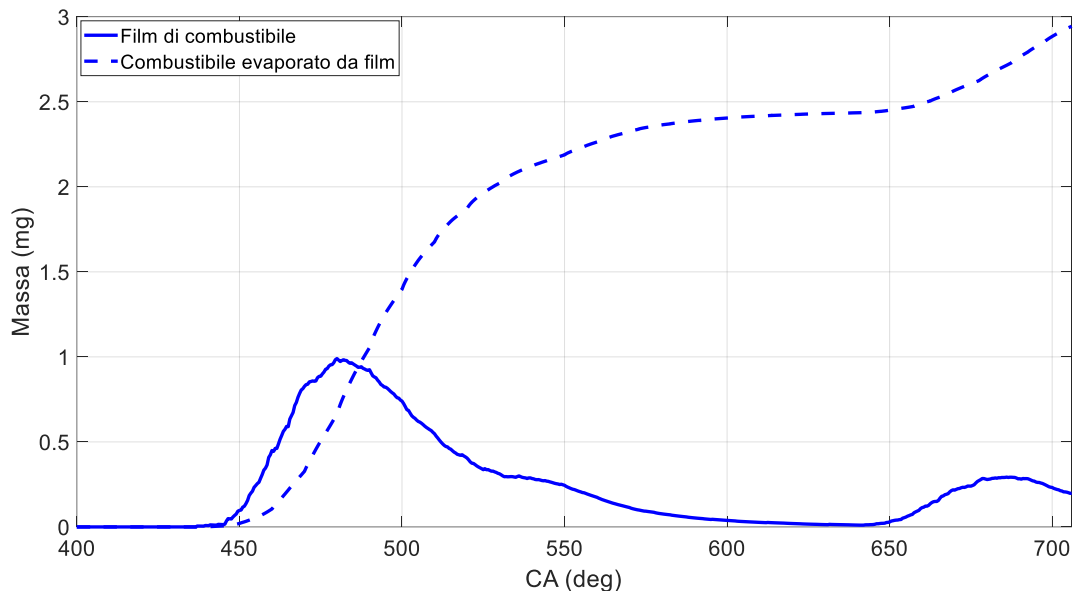


Fig. 89: Wallfilm

Sommando le 3 componenti fino ad ora analizzate (evaporato da spray, wallfilm ed evaporato da wallfilm), si nota facilmente una differenza poco più di 2 mg di combustibile "perso" rispetto all'iniettato. La boundary di blow-by permette il passaggio di portata anche a valvole chiuse: nel caso in cui fosse presente anche combustibile, parte di questo andrà perso nella prima fase della combustione per poi rientrare durante l'espansione. Il risultato netto è che a SA non si riesce a raggiungere il titolo desiderato in camera. Trattandosi della prima simulazione con combustione di questo motore, si è deciso di intraprendere una fase esplorativa e provare diversi setup al fine di raggiungere le condizioni target a SA.

5.3.2 - Variazione della massa iniettata

Sono state effettuate altre tre simulazioni con una massa di combustibile diversa. La ratio dietro il setup di queste nuove simulazioni è stata di mantenere costante e al valore nominale la portata dell'iniettore (8.4 g/s), andando quindi a modificare (a parità di SOI) l'EOI. I 4 casi esaminati (di cui il Caso 1 è quello di base analizzato nel paragrafo precedente) sono riportati in Tabella 18. Per velocizzare i calcoli è stato utilizzato un backup del Caso 1 poco prima dello SOI. A partire dalla Figura 90 si procede con un confronto delle principali grandezze d'interesse per i vari casi.

Casi in studio		
	Massa di combustibile iniettata (mg)	EOI (cad)
Caso 1	27.34	469
Caso 2	31.02	474.2
Caso 3	31.20	474.5
Caso 4	32.68	467.6

Tab. 18: Casi in studio, SOI = 430 ° aTDC

La Figura 90 mostra il confronto tra le masse che il cilindro ha incamerato fino a SA. Iniettando più combustibile, è registrata una maggiore massa in camera. Effetto da non trascurare è però l'evaporazione del combustibile che porta ad un raffreddamento della camera, un aumento della densità e la conseguente entrata di una quantità maggiore d'aria.

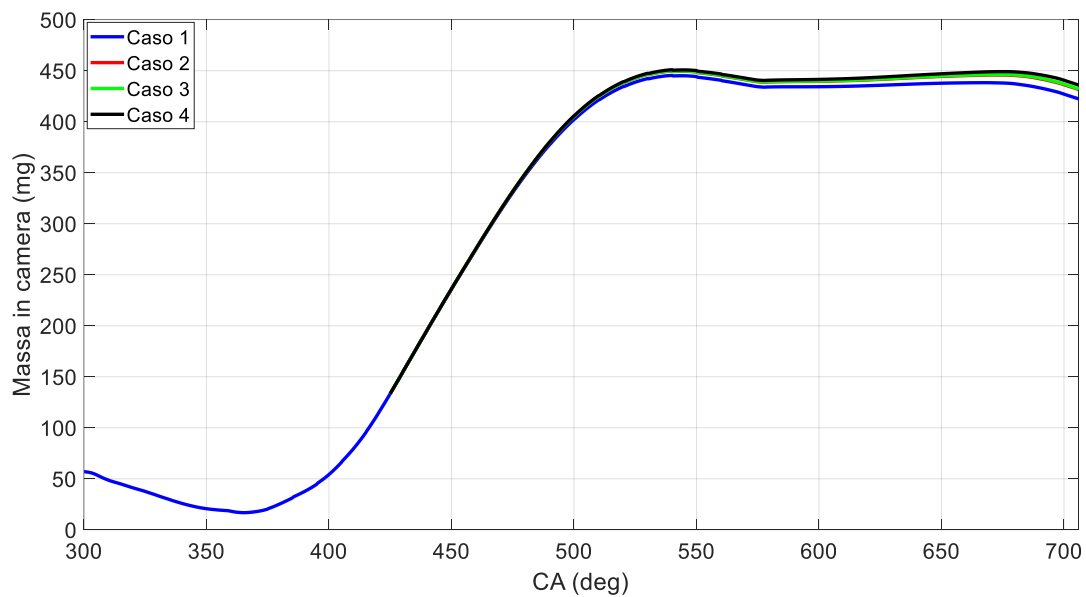


Fig. 90: Andamento massa in camera con combustibile iniettato

La Figura 91 riporta gli andamenti della massa di combustibile iniettata (in linea continua) e della porzione della stessa evaporata (in linea tratteggiata). Controprova del fatto che i casi siano stati preparati con la medesima portata di combustibile dall'iniettore è il fatto che le curve siano tutte sovrapposte e si distacchino solo arrivate a fine iniezione.

Con lo stesso criterio, nella Figura 92 è rappresentata la massa di combustibile che forma wallfilm e la parte che evapora dallo stesso.

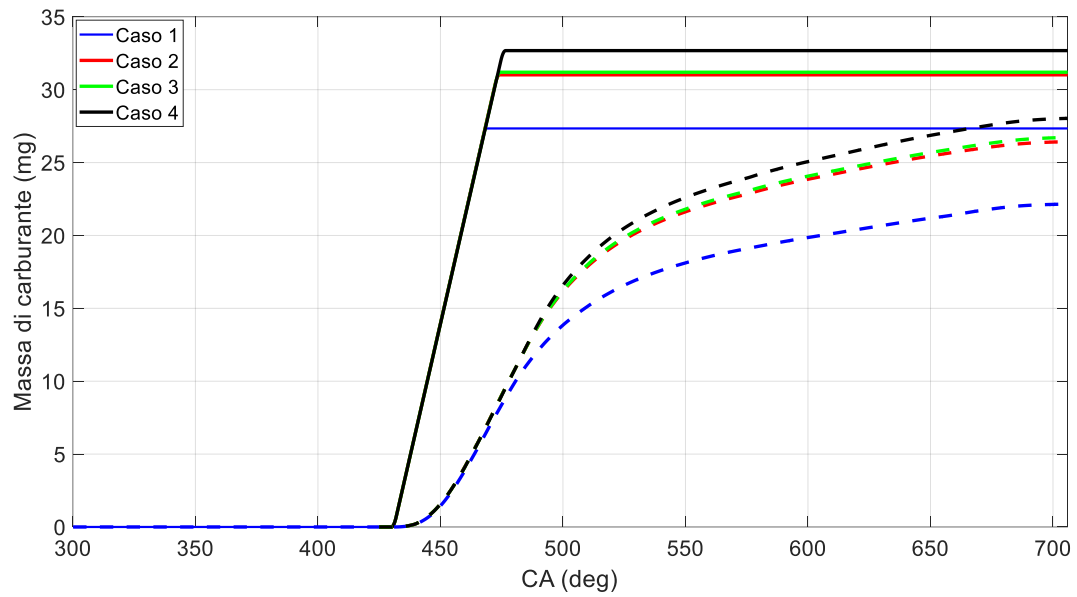


Fig. 91: Confronto massa di combustibile evaporata

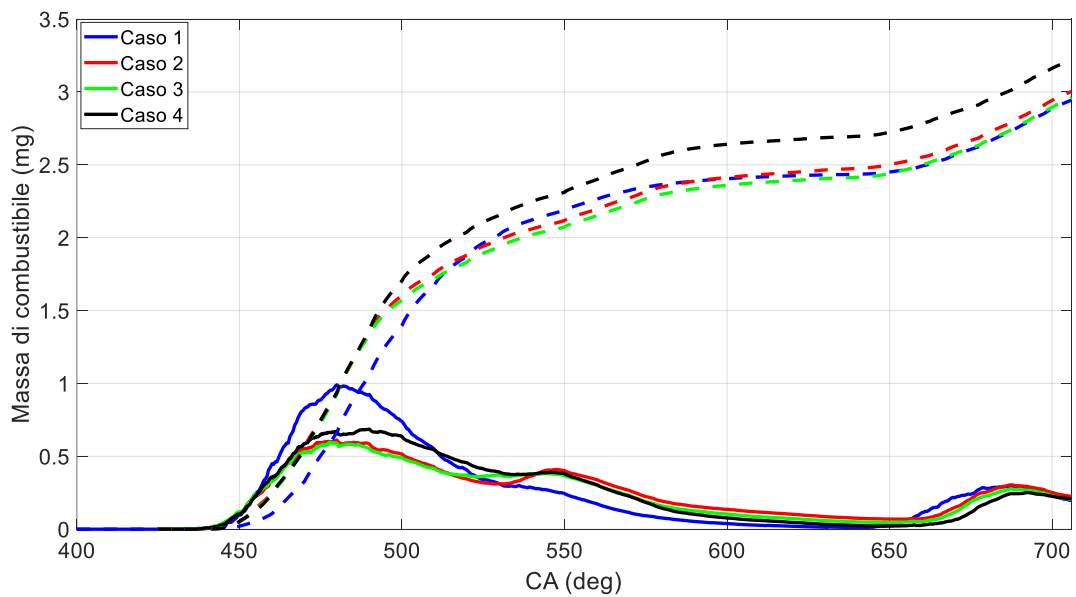


Fig. 92: Confronto wallfilm

Infine, la Figura 93 mostra il confronto tra gli andamenti del lambda in camera: per raggiungere un valore molto prossimo al lambda target a SA si è dovuto iniettare 31.20 mg di combustibile (contro i 27.32 mg sperimentali).

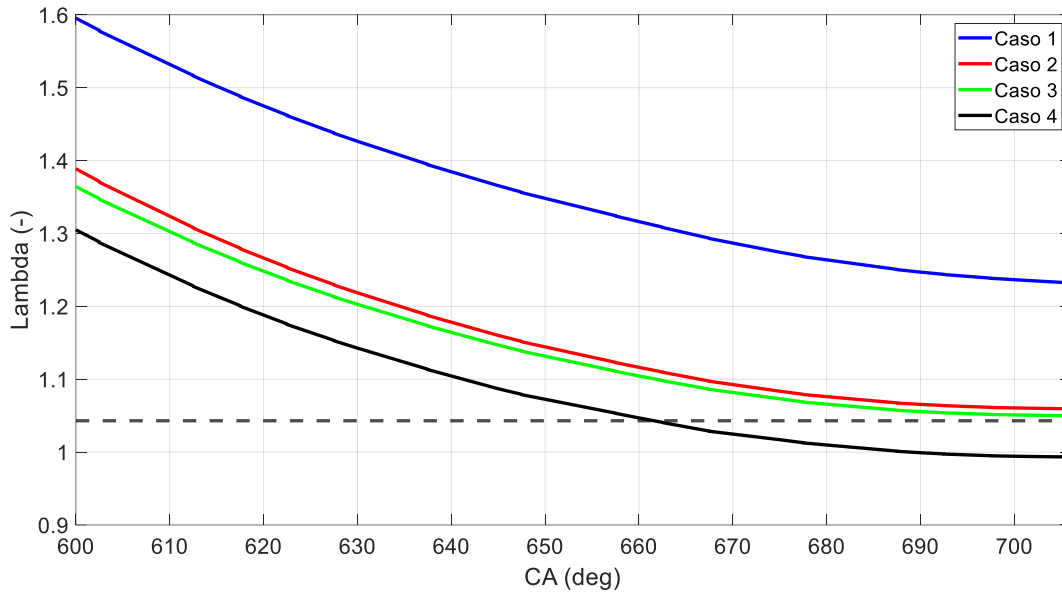


Fig. 93: Confronto lambda

È certamente necessaria un'indagine più approfondita per comprendere dove è stato perso il carburante in eccesso, in che quantità e con che titolo rientrerà in camera durante la fase di espansione. Al fine di verificare che effettivamente FIRE riesca a bruciare la miscela in camera si è comunque passati all'analisi della carica.

5.3.3 - Analisi della carica

L'analisi della carica è uno studio che si compie sulla miscela intrappolata all'interno della camera di combustione con lo scopo di valutare il modo in cui si è formata. Permette inoltre di calcolare alcuni parametri importanti (turbolenza, lambda medio e sua deviazione standard) al fine di comprendere come potrebbe precedere la combustione.

Il primo grafico visibile in Figura 94 è quello relativo al tumble. Con moto di tumble si fa riferimento ad un moto rotatorio del fluido che si sviluppa nel cilindro. Il moto di tumble principale è quello che si sviluppa attorno all'asse ortogonale all'asse del cilindro (si veda Figura 95). Questo tipo di moto può essere favorito dalla geometria/tipologia di condotti di aspirazione in uso. Nel motore in studio si crea un forte vortice di tumble, mentre le altre componenti (cross-tumble ed omega-tumble/swirl) sono praticamente sempre nulle. La prima linea tratteggiata verticale segnala il punto in cui viene raggiunto il massimo; è buona pratica posizionare lo SOI mentre questo valore è ancora sufficientemente elevato in modo da favorire il mixing della miscela. La seconda linea tratteggiata indica IVC. Sul grafico è inoltre presente in viola l'andamento dell'intensità di turbolenza, valutato secondo la seguente formula:

$$\frac{u'}{v_p} = \frac{\left(tke \times \frac{2}{3}\right)^{0.5}}{v_p}$$

Dove:

- tke : energia cinetica turbolenta [m^2/s^2], output di FIRE
- v_p : velocità media del pistone [m/s]

Il grafico mostra come ci sia una buona conversione del tumble in turbolenza e vengano raggiunti valori che solitamente si possono incontrare anche in altri motori, ma il tutto si spegne molto velocemente in compressione attestandosi ad un valore poco sopra lo 0.5. Si tratta di un risultato che era prevedibile già dalla simulazione di flussaggio: per le basse alzate della valvola era visibile la formazione decisa di un vortice sotto il piattello, che però veniva spento non appena raggiunte alzate maggiori. Solitamente questa curva prende la forma di una "M" con un secondo picco dopo IVC, ma in questo caso non è presente data la geometria piatta del cielo del pistone.

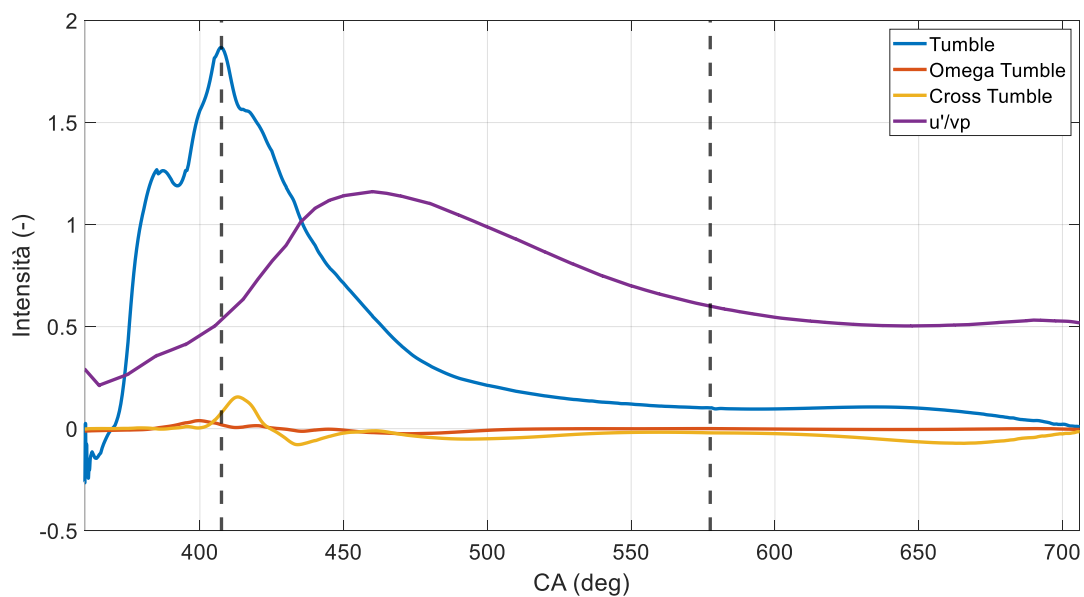


Fig. 94: Tumble ed intensità di turbolenza

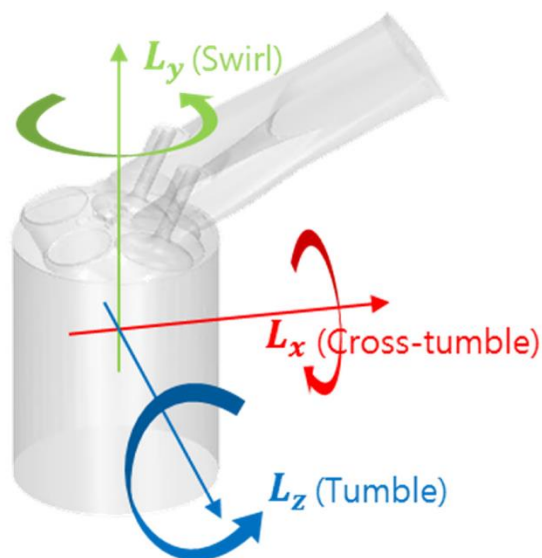


Fig. 95: Componenti del moto di tumble

Per studiare la turbolenza e l'indice di miscela lambda sono stati creati due volumi di controllo intorno alla candela (uno con raggio 5 mm, l'altro con raggio 2.5 mm, si vede Figura 96) con lo scopo di monitorare le condizioni presenti nella zona in cui scocca la scintilla e si forma il fronte di fiamma.

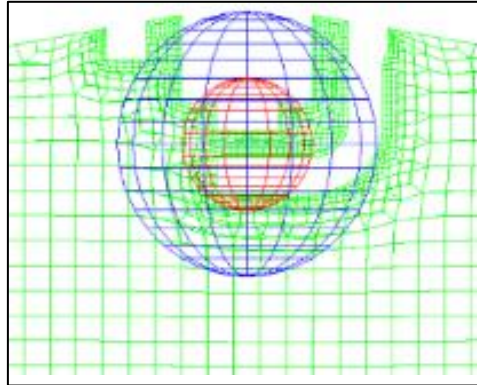


Fig. 96: Volumi di controllo

La Figura 97 mostra l'andamento della turbolenza fino a SA. I Valori assunti sono molto bassi, sia complessivamente nella camera sia nelle due sferette di controllo. La Figura 98 è una foto della distribuzione della turbolenza a SA, e la Tabella 19 sottostante riporta medie e deviazioni standard nel medesimo istante.

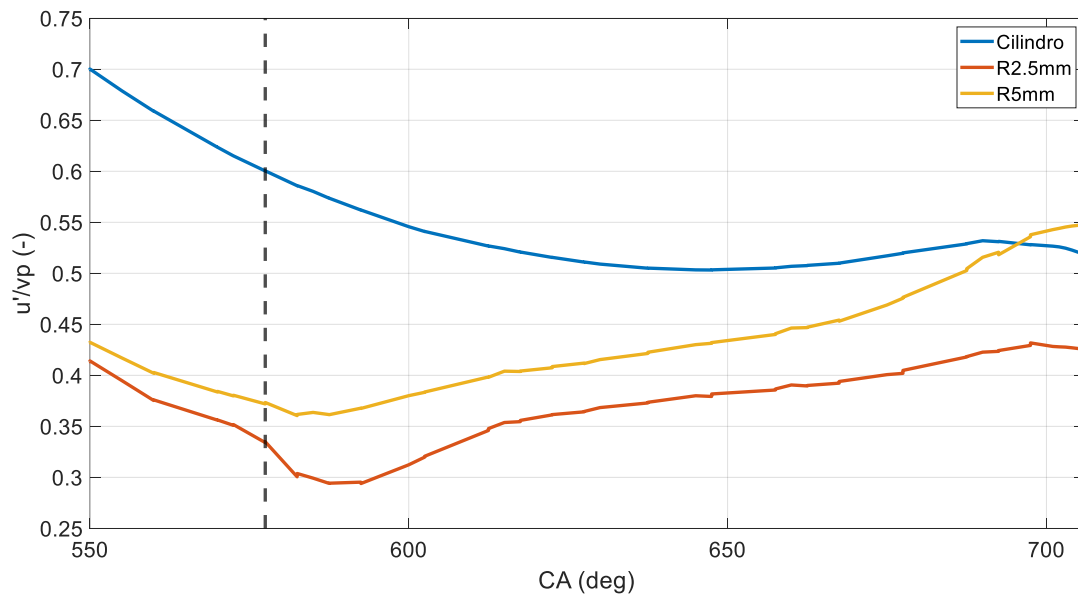


Fig. 97: Andamento della turbolenza in camera

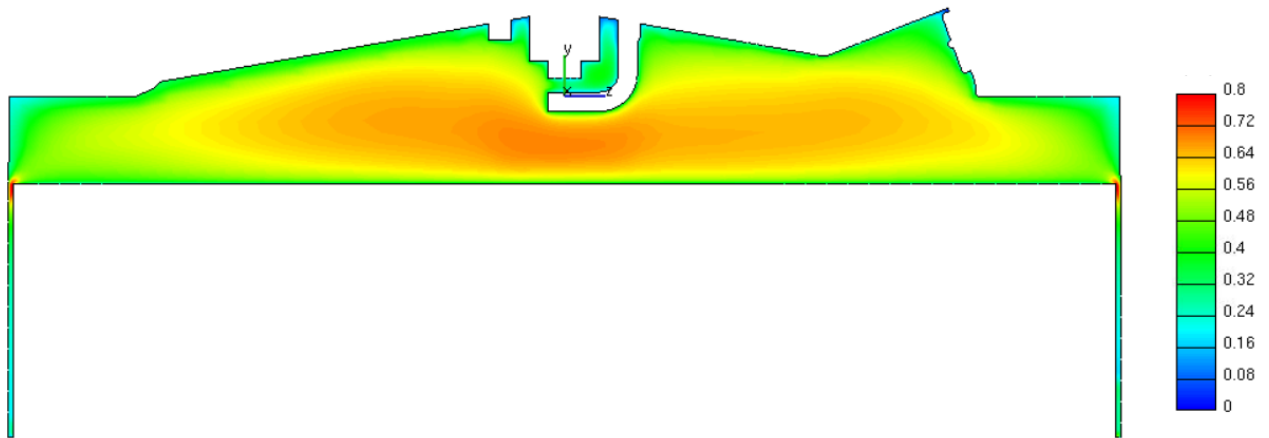


Fig. 98: Distribuzione 3D della turbolenza a SA

a SA = 706 ° aTDC		
u'/v_p	Media	Deviazione standard
Cilindro	0.381	0.168
R2.5	0.474	0.141
R5	0.560	0.140

Tab. 19: Valore medio e deviazione standard della turbolenza

L'analisi fatta per il lambda è la medesima ed è mostrata nelle Figure 99-100 ed in Tabella 20. La distribuzione del combustibile nel 3D non è sicuramente ottimale, ma non è lontana da quella attesa date le premesse: il combustibile entra in camera e, essendo il pistone piatto, non vi è alcun meccanismo che spinge il rimescolamento. Questo giustifica la zona molto ricca opposta alla posizione dell'iniettore.

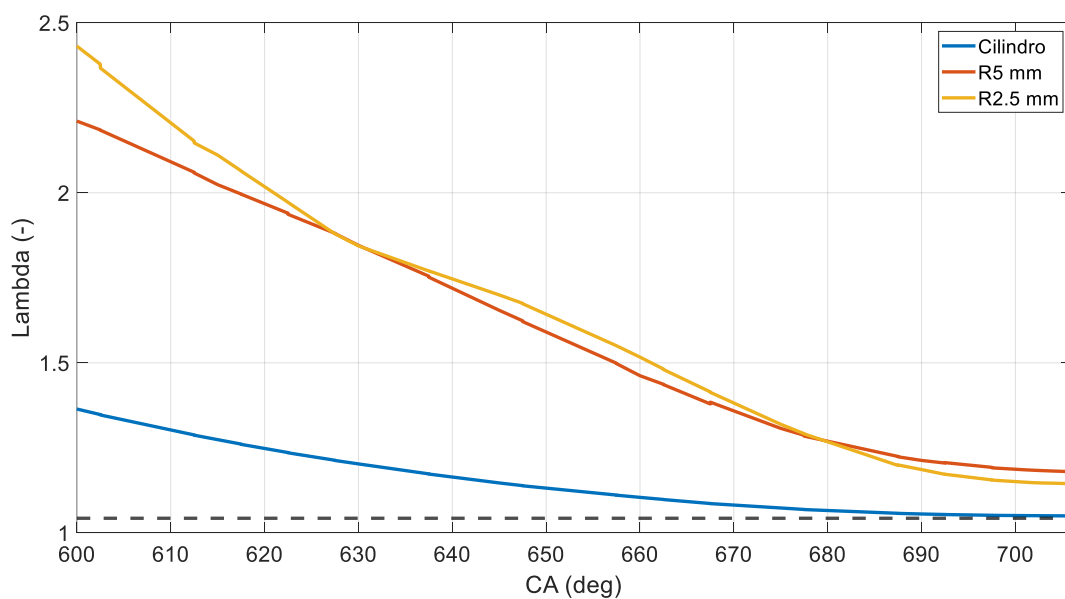


Fig. 99: Andamento del lambda in camera

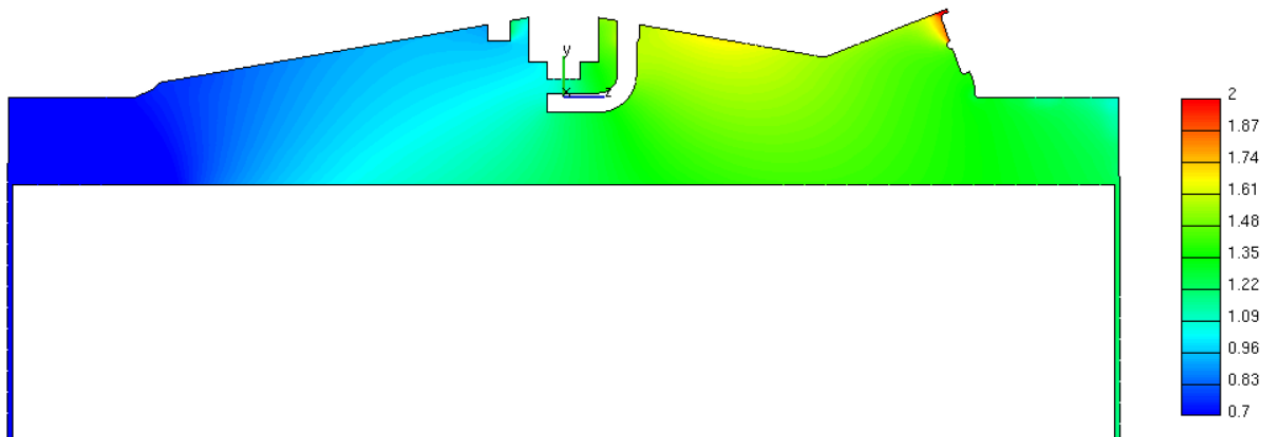


Fig. 100: Distribuzione 3D del lambda a SA

a SA = 706 ° aTDC		
Lambda	Media	Deviazione standard
Cilindro	1.049	0.429
R2.5	1.161	0.078
R5	1.190	0.125

Tab. 20: Valore medio e deviazione standard del lambda

5.4 - Combustione

È possibile procedere alla simulazione della combustione.

Le Tabelle 21-22 mostra il setup di base della simulazione. Le condizioni al contorno sono le stesse utilizzate per la fase di aspirazione e spary. Le condizioni iniziali sono quelle ereditate dal backup della simulazione precedente fino a SA.

	CA (deg) aTDC	
Angolo inizio simulazione	706	
Angolo fine simulazione	870	
Passo	Angolare (deg)	Temporale (s)
Fino a 720 CA (deg) aTDC	0.015	1.3×10^{-6}
Fino a 770 CA (deg) aTDC	0.04	3.3×10^{-6}
Fino a 800 CA (deg) aTDC	0.05	4.2×10^{-6}
Fino a 870 CA (deg) aTDC	0.1	8.3×10^{-6}

Tab. 21: Combustione, setup di base

Fattori di sottorilassamento	
Momentum	0.2
Pressure	0.2
Turbolent kinetic energy	0.1
Turbolence dissipation rate	0.1
Energy	0.5

Tab. 22: Combustione, fattori di sottorilassamento

Il modello di combustione utilizzato è il classico ECFM-3Z. Per l'accensione e la propagazione del fronte di fiamma sono state utilizzate delle UDF (user defined function, funzioni scritte da un utente ed integrate nella simulazione 3D CFD) fornite dall'università.

5.5 - Risultati

La Figura 101 confronta il dato sperimentale con i risultati della simulazione. La curva segue abbastanza fedelmente la traccia di pressione ma si distacca sul picco. È poi presente un secondo “picco”, come se parte della carica stesse detonando. Controllando gli output di FIRE è stato verificato che non fosse presente effettivamente un fenomeno di knock.

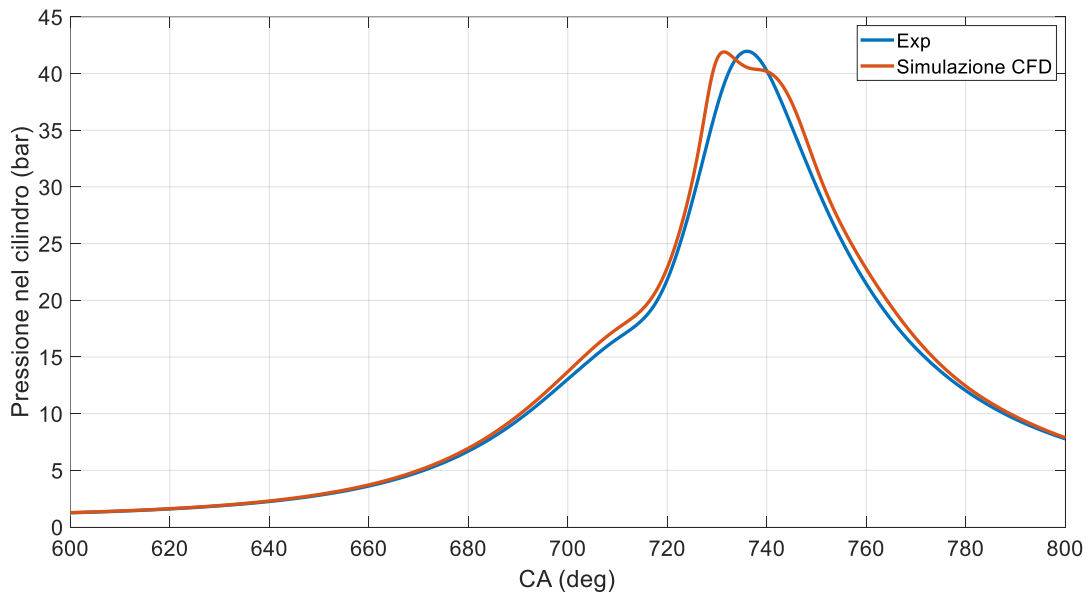


Fig. 101: Combustione, traccia di pressione

La Figura 102 mostra il confronto fra gli andamenti del MFB.

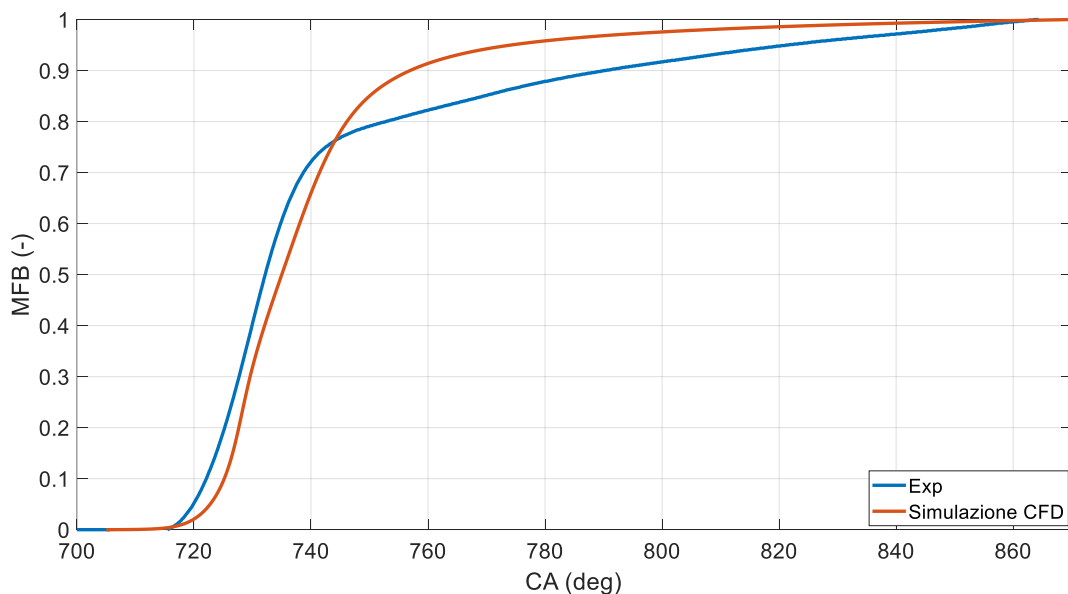


Fig. 102: Andamento MFB

L'andamento dell'MFB simulato (normalizzato sul valore massimo del calore rilasciato in camera) sembra indicare una combustione più lenta in partenza, che però finisce più velocemente rispetto a quello che accade nel dato sperimentale.

La Tabella 23 confronta i principali parametri di combustione ottenuti dalla simulazione con i dati sperimentali.

	Dato sperimentale	Simulazione 3D CFD
MFB 10 (° aTDC)	2.60	5.20
MFB 50 (° aTDC)	12.20	15.01
MFB 90 (° aTDC)	70.80	36.93
Theta MFB 0-10 (cad)	16.60	19.20
Theta MFB 10-50 (cad)	9.60	9.81
Theta MFB 50-90 (cad)	58.6	21.92
Picco di pressione (bar)	41.97 (a 736° aTDC)	41.91 (a 731° aTDC)

Tab. 23: Confronto dati sperimentali e simulazione 3D CFD

Per comprendere meglio questa situazione (e anche il secondo picco sulla curva di pressione) vengono riportati i campi 3D del lambda e della velocità laminare di fiamma nel settore 730 -740° aTDC.

La Figura 103 mostra, la distribuzione di lambda in una sezione sulla candela a 730, 735 e 740° aTDC. Come già notato nel commentare la Figura 100, il combustibile si trova per lo più verso il lato di scarico, quindi mentre la fiamma avanza in quella direzione incontrerà delle sacche ricche che ne accelereranno bruscamente la velocità. Questo è il motivo dietro la presenza della gobba sulla curva di pressione.

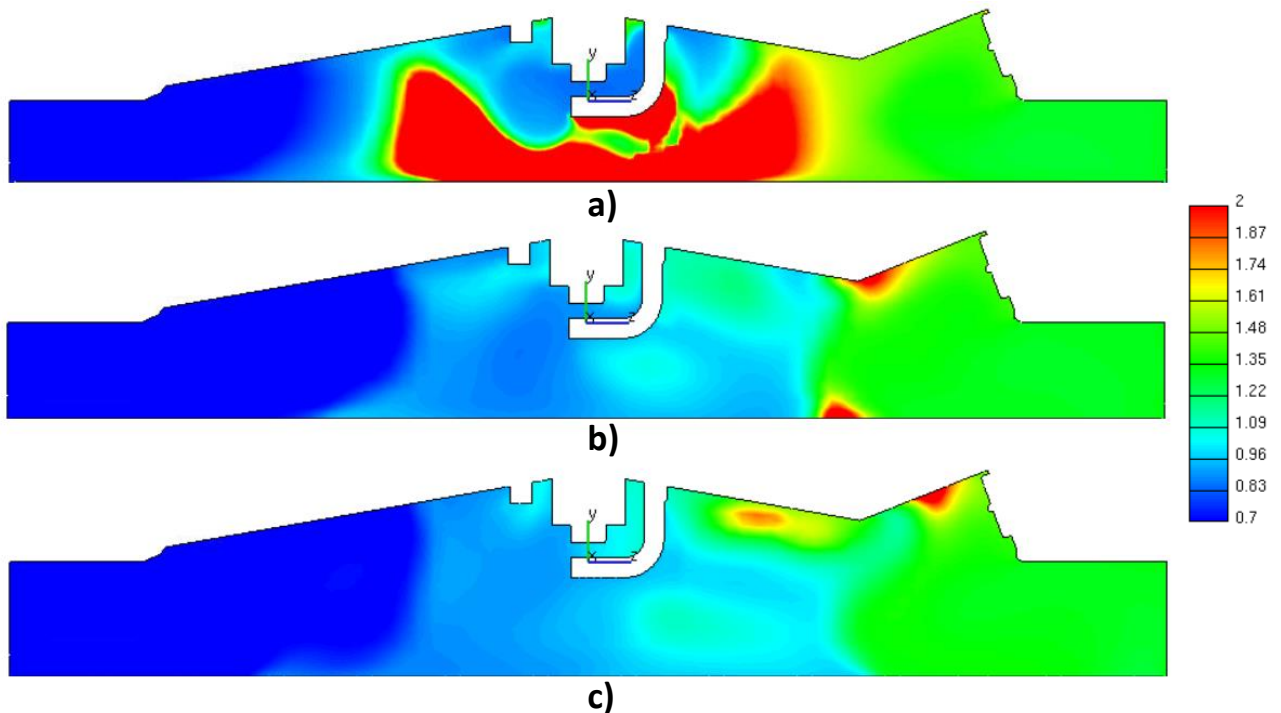


Fig. 103: Campo 3D del lambda: a) 730° aTDC, b) 735° aTDC, c) 740° aTDC

La Figura 104 con il campo 3D della velocità laminare di fiamma a 730 conferma quanto appena detto: sul lato di scarico vengono raggiunte velocità circa doppie rispetto al lato di aspirazione.

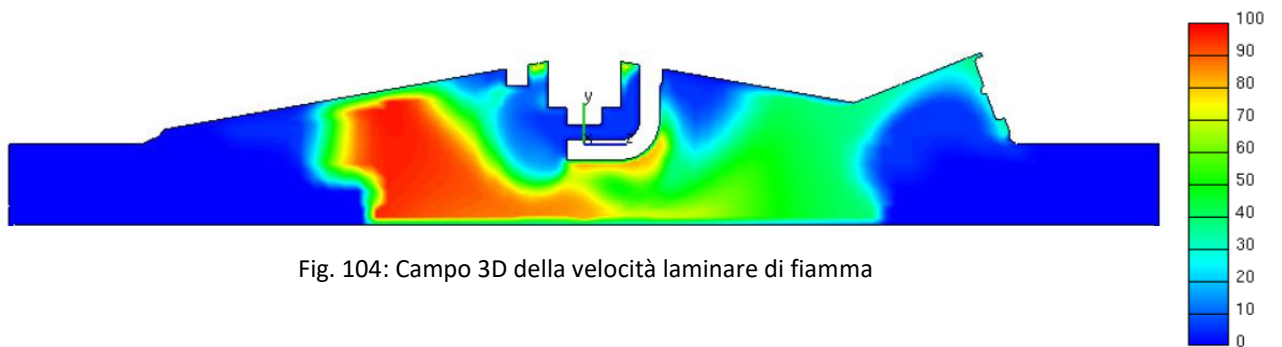


Fig. 104: Campo 3D della velocità laminare di fiamma

6 - Conclusioni e sviluppi futuri

Le sempre più stringenti normative ambientali richiedono un attento e costante studio perché l'industria automobilistica riesca a sottostare a tali regolamentazioni. Con tale fine, un MCI con accesso ottico è uno strumento importantissimo per lo studio di nuovi sistemi di combustione e l'ottimizzazione di quelli già rodati. Il lavoro di tesi ha portato a conclusione la caratterizzazione del motore ad accesso ottico presente nei laboratori dell'ente CNR-STEM; gli obiettivi raggiunti sono, nell'ordine:

- L'ottenimento dei C_D attraverso le valvole di aspirazione e scarico. La geometria peculiare dei condotti ha fatto sì che i grafici ottenuti si discostassero parzialmente da ciò che solitamente si vede in letteratura, ma a maggior ragione è stata un'attività di fondamentale importanza per poter avanzare alle successive fasi di simulazione.
- La corretta simulazione di un ciclo trascinato. Come già ribadito nel corso della tesi, non si tratta di un ciclo solitamente simulato data la sua semplicità, ma nel caso in studio si è reso necessario procedere per step data sia la generazione ex novo della mesh (e la sua verifica), sia la presenza del fenomeno di blow-by. L'integrazione di quest'ultimo all'interno della simulazione CFD ha fatto affiorare non pochi problemi.
- La soddisfacente simulazione di un ciclo con combustione. La metodologia applicata per il ciclo in trascinato si è dimostrata sufficientemente solida ed ha permesso di simulare anche una combustione.

Parlando di sviluppi futuri, è evidente la direzione in cui si deve procedere per espandere e migliorare il lavoro: la simulazione in combustione segue abbastanza fedelmente la traccia di pressione, ma è importante ricordare che al momento si stanno iniettando quasi 4 mg di combustibile in più rispetto al dato sperimentale. Dall'analisi fatta nel capitolo 5, sembra che la massa di combustibile mancante sia uscita dalla boundary di blow-by, ma per come è settata la simulazione al momento è difficile capire quando rientrerà, in che quantità e con che titolo. Non c'è stato il tempo per esplorarle approfonditamente, ma le possibili soluzioni da indagare sono tre:

- La simulazione di un multi-ciclo, in modo che il software CFD possa tenere in considerazione anche gli eventuali incombusti presenti nell'EGR interno; in questo caso, agli incombusti presenti in ogni MCI si va ad aggiungere una porzione non indifferente di carica che, rientrata molto tardi dalla boundary di blow-by, non trova le condizioni per bruciare. Questo potrebbe voler dire avere una camera con una frazione non trascurabile di combustibile ad inizio simulazione, diversamente da quanto assunto fino ad adesso (nel setup di FIRE si imponeva una combustione completa del ciclo precedente, quindi assenza di carburante in camera fino alla successiva iniezione). La sonda lambda reale misura il titolo allo scarico, mentre quello che osserviamo nella simulazione è il titolo "vero" in camera; si tratterebbe quindi di portare a regime il motore dal punto di vista del carburante "in circolo".
- L'implementazione diretta in FIRE di una UDF che permetta il calcolo autonomo e real-time della portata di blow-by nella simulazione 3D CFD.
- L'estensione della zona di blow-by inserita nella geometria fino all'ultimo anello di tenuta, potendo così imporre sulla boundary semplicemente la pressione ambientale. Problema importante di questo approccio è che il livello di refinement richiesto dal volume di blow-by andrebbe ad appesantire la mesh e di conseguenza ad aumentare esponenzialmente il tempo macchina.

Bibliografia

AVL FIRE Manual, v2014.2

G. M. Bianchi, *Appunti del corso di Fluidodinamica dei Motori a Combustione Interna, AA 2020-2021*

G. Ferrari, *Motori a combustione interna*, Esculapio, 2016

Adrian Irimescu, Luca Marchitto, Simona Silvia Merola, Cinzia Tornatore, Gerardo Valentino, <<*Evaluation of different methods for combined thermodynamic and optical analysis of combustion in spark ignition engines*>>, Elsevier, 2014

Adrian Irimescu, Silvana Di Iorio, Simona Silvia Merola, Paolo Sementa, Bianca Maria Vaglieco, <<*Evaluation of compression ratio and blow-by rates for spark ignition engines based on in-cylinder pressure trace analysis*>>, Elsevier, 2018

S. Breda, F. D'Orrico, F. Berni, A. d'Adamo, S. Fontanesi, A. Irimescu, S.S. Merola, <<*Experimental and numerical study on the adoption of split injection strategies to improve air-butanol mixture formation in a DISI optical engine*>>, Elsevier, 2019

Simona Silvia Merola, Adrian Irimescu, Bianca Maria Vaglieco, <<*Influence of water injection on combustion identified through spectroscopy in an optical direct injection spark ignition engine*>>, Elsevier, 2020