

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Energetica



**STUDIO DELL'EFFETTO DEL "FLASH-BOILING" SULLA
STRUTTURA DEGLI SPRAY DI INIETTORI GDI**

Relatore: Prof. Lucio Tiziano Araneo

Tutor aziendale: Ing. Roberto Dondè

Tesi di Laurea di:

FEDERICA BLE

Matr. 802169

Anno Accademico 2013 – 2014

RINGRAZIAMENTI

Un sentito ringraziamento al prof. Lucio Araneo per avermi dato la possibilità di sviluppare un percorso sperimentale in un centro di ricerca d'avanguardia, per aver chiarito i miei dubbi e per la correzione della tesi.

Un ringraziamento vivissimo va all'Ing. Roberto Dondè, che mi ha accompagnato costantemente in questo percorso; per essere stato il mio punto di riferimento, per avermi incoraggiato nei momenti difficili ad andare avanti sempre con determinazione, per avermi aiutato nella stesura della tesi.

Il ringraziamento più grande va ai miei genitori, senza i quali non avrei potuto raggiungere questo importante obiettivo. Grazie per avermi incoraggiato in ogni istante del mio percorso di studi.

Ringrazio inoltre il Responsabile della Unità Organizzativa di Supporto del CNR-IENI di Milano Dott. Maurizio Maldini per avermi consentito di frequentare ed utilizzare i laboratori della sezione Combustione e Fluidodinamica dei sistemi industriali.

Un grazie inoltre ai professori del mio corso di laurea, in particolare, al prof. Luigi Colombo che è stato sempre disponibile durante il mio percorso di studi.

Federica

Sommario

Il lavoro che viene presentato è stato svolto presso il Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto per l'Energetica e le Interfasi (CNR-IENI) ed ha riguardato l'iniezione diretta di benzina. L'obiettivo è quello di analizzare il comportamento dei diversi combustibili al variare delle condizioni operative, quali la temperatura e la pressione, attraverso la misurazione degli angoli di apertura β_1 e β_2 dello spray.

L'importanza dello studio riguardante l'evaporazione rapida (Flash Boiling) sta nel fatto che questo fenomeno influisce sull'atomizzazione dello spray, portando una diminuzione della dimensione delle gocce che può essere sfruttata per migliorare la miscelazione del combustibile con l'aria, l'efficienza di combustione, e per diminuire le emissioni inquinanti.

Sono stati impiegati i seguenti combustibili:

- Isoottano
- Normal-eptano
- Normal-esano
- Fuel 04
- Fuel 06
- Fuel 08
- Fuel 95

Lo spray è stato analizzato alla pressione operativa pari a 0.4, 0.6, 0.8 bar e alle temperature di 30°, 50°, 70°, 90°, 110°C ; mentre a pressione atmosferica alla temperatura di 30°, 50°, 70°, 90°, 100°, 110°C.

Le pressioni di iniezione impiegate sono 50 e 100 bar.

I dati sperimentali ricavati consentono di effettuare delle valutazioni in merito alla consuetudine di impiegare l'isoottano nei test sugli iniettori da parte delle industrie motoristiche. Emerge dall'analisi dei dati, che il comportamento dei combustibili multicomponente è molto diverso rispetto a quello dell'isoottano e del normal-eptano, diversamente a quanto accade con il normal-esano che ne approssima meglio l'andamento, determinando così dei test riproducibili e realistici.

I risultati mettono in evidenza quali sono le grandezze fisiche determinanti e come influenzano l'angolo di spray.

Si è potuto constatare, per l'appunto, che tra questi parametri sono particolarmente significativi, la temperatura e la corrispondente pressione di bolle del combustibile. Infatti quando l'iniezione avviene in un ambiente la cui pressione è inferiore alla pressione di bolle del combustibile si innesca un fenomeno di evaporazione immediata (Flash Boiling) che ha effetti determinanti sulla struttura dello spray. Questo fenomeno infatti provoca un notevole

aumento dell'angolo iniziale di spray ed una diminuzione delle dimensioni delle goccioline.

A tal proposito, si sono cercate in letteratura delle relazioni che legassero tra loro alcune delle caratteristiche fisiche delle principali famiglie di idrocarburi che compongono le benzine. Definendo i diversi tagli della curva di distillazione come "pseudocomponenti" del combustibile, si è potuti giungere, sfruttando le correlazioni alle quali si è accennato, alla determinazione di una curva di saturazione per le benzine commerciali a partire dalla curva di distillazione. Una volta determinata la pressione di saturazione, è stato possibile correlare l'andamento dell'angolo di spray al rapporto della pressione di saturazione su quella operativa.

Indice Generale

Introduzione.....	7
1. Capitolo 1: Il motore a combustione interna	
1.1 Generalità.....	8
1.2 Sistema di alimentazione.....	9
1.3 Iniezione diretta di benzina.....	11
1.4 La stratificazione della carica.....	11
1.5 Tipologia di impianto GDI.....	13
1.6 I combustibili.....	15
2. Capitolo 2: L'apparato sperimentale	
2.1 Sistema di iniezione.....	17
2.2 Sistema di pressurizzazione del combustibile.....	20
2.3 Sistema di depressurizzazione dell'aria.....	22
2.4 Sistema di preriscaldamento dell'aria.....	23
2.5 Sistema elettronico di regolazione della temperatura.....	24
2.6 Camera di prova.....	24
2.7 Sistema ottico.....	25
2.8 I combustibili impiegati.....	27
3. Capitolo 3: Il Metodo	
3.1 Acquisizione delle immagini.....	31
3.2 Determinazione delle condizioni sperimentali.....	33
3.3 Prove finali.....	36
3.4 Trattamento delle immagini.....	37
4. Capitolo 4: I risultati	
4.1 Osservazione delle foto.....	39
4.2 Andamento dell'angolo di cono β_1 per le diverse pressioni a parità di combustibile.....	43
4.3 Andamento e confronto dell'angolo di cono β_1 nei vari combustibili.....	51
4.4 Andamento dell'angolo di cono β_2 per le diverse pressioni a parità di combustibile.....	55

4.5 Andamento e confronto dell'angolo di cono β_2 nei vari combustibili...	63
5. Capitolo 5: Analisi dei risultati	
5.1 Curva di saturazione per i combustibili puri.....	68
5.2 Andamento β_1 in relazione al rapporto della pressione di saturazione e della pressione operativa per le sostanze pure.....	69
5.3 Legame Pressione di saturazione e curva di distillazione nelle benzine.	73
5.4 Andamento β_1 in relazione al rapporto della pressione di saturazione e della pressione operativa per le benzine.....	80
6. Conclusioni e sviluppi futuri.....	85
Bibliografia.....	87
Indice delle figure e delle tabelle.....	88
Appendice A : Macro Image Pro Plus.....	95
Appendice B : Le relazioni di Maxwell e Bonnell	110

Introduzione

Il lavoro che viene presentato è stato svolto presso il Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto per l'Energia e le Interfasi (CNR-IENI) ed ha riguardato l'iniezione diretta di benzina.

A tal proposito, abbiamo effettuato dei test di laboratorio per analizzare il comportamento dei diversi combustibili al variare delle condizioni operative, quali la temperatura e la pressione, attraverso la misurazione degli angoli di cono β_1 e β_2 dello spray .

L'obiettivo del nostro studio è stato quello di valutare l'effetto dell'evaporazione sulla struttura dello spray e di individuare le grandezze che influiscono sull'evaporazione rapida , cioè il Flash Boiling.

Il "Flash-boiling" si verifica quando un liquido viene iniettato in una camera di combustione in cui la pressione ambiente è inferiore alla pressione di saturazione del combustibile ed è un meccanismo favorevole per la nebulizzazione dei combustibili liquidi.

Il "Flash-boiling" viene studiato anche nel campo della sicurezza, poiché si tratta di un fenomeno violento ed esplosivo. Può accadere, infatti, che la rottura di un tubo possa causare la formazione di un getto a due fasi contenente una miscela di goccioline di liquido e vapore e si verifica che la violenta evaporazione e la frammentazione aerodinamica controllino il comportamento bifase del fluido.

In letteratura infatti, sono presenti studi che dimostrano come questo fenomeno sia determinante per l'atomizzazione dell'acqua, valutando l'angolo di spray, diametro, la distribuzione e la dimensione delle gocce. [1]

Per quanto riguarda i motori a combustione interna, si è constatato che il "Flash-boiling" avviene facilmente nei combustibili con un'elevata volatilità e che determina l'atomizzazione dello spray, cioè la frammentazione del liquido.

Molti ricercatori, attraverso studi condotti sull'evaporazione violenta mediante Phase Doppler Anemometry, hanno dimostrato che l'atomizzazione dello spray porta ad una diminuzione della dimensione delle gocce che può essere sfruttata per migliorare la miscelazione del combustibile con l'aria, l'efficienza di combustione, e per diminuire le emissioni inquinanti. [2] [3] [4] [5]

Capitolo 1

Il motore a combustione interna

In questo capitolo vengono presentati le generalità dei motori a combustione interna, i sistemi di alimentazione, quali il carburatore e l'iniettore, il confronto fra l'iniezione diretta e indiretta di benzina, l'importanza della stratificazione della carica e viene illustrata una tipologia di impianto GDI.

1.1- Generalità

I motori a combustione interna sono macchine motrici termiche che convertono la maggior parte dell'energia liberata bruciando combustibili all'interno della macchina stessa in lavoro meccanico. La denominazione "interna" sta ad indicare che la combustione avviene all'interno della macchina, senza ricorrere a componenti esterni (caldaia) in cui far avvenire le reazioni di ossidazione e che la sorgente di calore è interna al fluido di lavoro. I motori a combustione interna presentano, rispetto alle altre macchine motrici termiche, il grosso vantaggio di aver eliminato gli scambiatori di calore sia tra i prodotti di combustione ed il fluido di lavoro, sia tra quest'ultimo e l'ambiente. Ne deriva una limitazione per le caratteristiche dei combustibili che devono garantire il completamento del processo di combustione nei modi e nei tempi opportuni. D'altra parte però si ha una maggiore semplificazione dell'impianto e l'eliminazione delle perdite inerenti al trasferimento di calore tra due fluidi in uno scambiatore di area finita. Per la loro compattezza, semplicità ed elevato rapporto potenza/peso, questi motori si sono rapidamente imposti come sistemi di propulsione di mezzi di trasporto e come generatori di potenza. Possono essere classificati in vari modi: a seconda del modo di avviare la combustione del fluido di lavoro, della durata del ciclo descritto, della natura del combustibile usato, dell'alimentazione dell'aria, dell'alimentazione del combustibile, del sistema di raffreddamento, ma si fa riferimento principalmente ai primi due criteri di classificazione. I motori a combustione interna si distinguono secondo il primo criterio in:

- Motori ad accensione comandata, nei quali una miscela di aria e di vapori di benzina viene accesa da una scintilla fatta scoccare tra gli elettrodi di una candela, realizzando così una combustione molto rapida (idealmente a volume costante). Per ragioni storiche questi motori sono anche chiamati "motori Otto".
- Motori ad accensione spontanea o motori Diesel, nei quali il combustibile viene iniettato finemente polverizzato in seno all'aria calda

e compressa, in modo da provocarne l'autoaccensione e dare origine ad una combustione più lenta e graduale (idealmente a pressione costante).

Considerando il secondo criterio, possono essere classificati in:

- Motori a quattro tempi, in cui più della metà del ciclo di lavoro (che dura quattro corse del pistone) è dedicata all'espulsione dei gas combusti e all'aspirazione della carica fresca ad opera del pistone, realizzando così un buon ricambio del fluido.
- Motori a due tempi, che destinano alla sostituzione della carica una porzione minore del ciclo di lavoro per non sacrificare troppo le fasi di espansione e compressione cui sono legate le prestazioni del motore. Ne deriva un ricambio del fluido di lavoro meno soddisfacente. [6]

1.2- Sistema di alimentazione

Un ulteriore criterio di classificazione dei motori ad accensione comandata è la modalità con cui il carburante viene immesso in camera di combustione. L'alimentazione può essere :

- a carburazione; il motore utilizza la depressione creata dalla portata d'aria aspirata dal motore per richiamare la quantità di combustibile necessaria;
- a iniezione; il motore mette in pressione il combustibile con un'apposita pompa e lo inietta finemente polverizzato nella massa d'aria aspirata.

L'alimentazione a carburazione utilizza la portata d'aria aspirata dal motore come la principale grandezza per controllare il rapporto di miscela che viene tenuto prossimo al valore stechiometrico. Questa alimentazione avviene attraverso il carburatore, che si compone di vari organi:

- il diffusore, formato da un ugello convergente-divergente nella cui sezione ristretta si genera la depressione necessaria per il richiamo del carburante.
- Un polverizzatore, ossia un condotto che porta nella sezione ristretta del diffusore il carburante, preventivamente dosato dal getto di controllo della portata;
- Una vaschetta in cui il livello del carburante è mantenuto costante tramite un galleggiante che agisce su di una valvola conica di intercettazione della portata di combustibile dal serbatoio.
- Una valvola di regolazione della massa di miscela aspirata dal motore. Questa è solitamente di tipo a farfalla ed è posta a valle degli organi principali del carburatore appena descritti. Strozzando il collettore di ammissione, essa regola il carico del motore.

I sistemi d'iniezione si basano su principi fisici diversi dal carburatore, sia per dosare il combustibile che per polverizzarlo nella massa d'aria. Essi infatti dosano il combustibile in modo proporzionale alla portata d'aria aspirata dal motore, sfruttando non la depressione da essa prodotta, ma un incremento di pressione del combustibile rispetto all'aria, generato dalla pompa di iniezione. Nel carburatore inoltre il processo di polverizzazione del combustibile si basa sulla più alta velocità dell'aria, che trascina il carburante e lo suddivide in gocce via via più piccole, mentre nell'iniezione è il getto di combustibile che fuoriesce a velocità maggiore dall'ugello dell'iniettore, formando uno spray di fini goccioline.

I vantaggi dell'impiego dei sistemi ad iniezione rispetto al tradizionale sistema di alimentazione sono i seguenti:

- Migliore controllo del rapporto aria/combustibile in tutte le condizioni di funzionamento;
- Precisa distribuzione del combustibile tra i vari cilindri, che rende minima la dispersione di ricchezza della miscela tra un cilindro e l'altro, rispetto ai valori ritenuti ottimali per quelle condizioni di funzionamento;
- Maggiore prontezza nel seguire i transitori, perché si lavora su volumi di combustibili molto piccoli;
- Più elevato coefficiente di riempimento con conseguente guadagno di potenza e coppia, perché l'aria aspirata incontra minori perdite di carico e non è più necessario riscaldare i condotti di aspirazione;
- Possibilità di realizzare forme innovative di combustione, capaci di limitare la formazione dei composti di inquinanti e di minimizzare il consumo di combustibile del motore;
- Minor pericolo di detonazione, perché diminuisce il tempo che passa tra la formazione della miscela e la sua combustione.

Per contro, si riconoscono i seguenti limiti:

- Maggiore complessità dovuta al più alto numero di componenti;
- Maggiori costi iniziali d'impianto e dei pezzi di ricambio;
- Maggiori problemi di assistenza e manutenzione

Il sistema ad iniezione risulta oggi il più diffuso perché è l'unico in grado di minimizzare la formazione degli inquinanti, grazie ad un preciso controllo del rapporto di miscela, ma soprattutto di permettere il loro abbattimento a valle del motore nella marmitta catalitica trivalente.

[6]

1.3- Iniezione diretta di benzina

Si parla di iniezione diretta quando gli iniettori sono posti sulla testa di ciascun cilindro, in modo che il combustibile sia spruzzato direttamente nelle singole camere di combustione. Nei sistemi, invece, ad iniezione indiretta il combustibile è iniettato nella corrente d'aria aspirata, prima del suo ingresso nel cilindro. Nel caso di iniezione diretta sono necessarie alte pressioni d'iniezione per ridurre i tempi di iniezione e diminuire i diametri delle gocce dello spray. Nonostante l'iniettore sia più costoso e robusto rispetto all'iniezione indiretta, perché deve sopportare per l'appunto pressioni e sollecitazioni meccaniche maggiori, i vantaggi che si possono ottenere da questo sistema di alimentazione sono molteplici:

- Rende possibile il superamento del limite per un motore Otto di essere alimentato con carica omogenea in tutta la camera di combustione;
- Consente di effettuare forme innovative di combustione;
- Permette di controllare il carico del motore in modo innovativo per ridurre i consumi in parzializzazione;
- Aiuta a contenere la formazione di sostanze inquinanti attraverso il controllo dello sviluppo del processo di combustione e l'uso di un forte ricircolo di gas combusti.

Gli svantaggi sono i seguenti:

- In condizioni estreme, ad altissimi regimi, è difficile ottenere una miscela omogenea dato il breve tempo a disposizione tra un'iniezione e la successiva combustione;
- A bassi carichi, in regime di carica stratificata, viene prodotta una grande quantità di ossidi d'azoto inquinanti; da qui la necessità di utilizzare un catalizzatore de-NOx che però è molto sensibile allo zolfo (presente nelle benzine anche se in piccola quantità);
- L'impianto GDI assorbe una discreta percentuale di potenza data la necessità di operare ad alte pressioni;
- E' in generale più complessa la gestione di un sistema di iniezione diretta, complessità che si riflette in un aumento dei costi di questa tecnologia. [6]

1.4- La stratificazione della carica

Usando adeguati accorgimenti, è possibile fare in modo che nel momento in cui scocca la scintilla tra gli elettrodi della candela, nel cilindro sia presente una carica formata da strati con rapporti di miscela diversi da zona a zona. In particolare si cerca di avere strati di miscela ricca vicino alla candela e poi miscela sempre più povera in quelli via via più lontani, in modo da riuscire a bruciare in modo efficiente e completo una miscela con composizione locale

ottimale, anche se globalmente molto magra. In questo modo si combinano i vantaggi offerti dal motore Otto, cioè elevata potenza per unità di cilindrata, con quelli del motore Diesel, cioè la regolazione del motore alimentato a carica omogenea, variando la quantità di combustibile iniettato.

La stratificazione della carica può essere ottenuta sfruttando principalmente:

- Le condizioni di moto delle goccioline presenti nello spray che tendono a conservare la loro quantità di moto e possono essere opportunamente orientate;
- La geometria delle pareti della camera di combustione e del pistone per imporre allo spray le deviazioni adatte ad ottenere strati di carica con i voluti rapporti di miscela;
- Il movimento dell'aria (swirl, squish, tumble) per il trasporto convettivo delle gocce e dei vapori di combustibile nelle zone ritenute più indicate per avere una adeguata stratificazione globale.

Il processo di combustione di questo tipo di carica presenta le seguenti caratteristiche:

- La combustione inizia nella parte più ricca della carica con conseguente elevata velocità e solo dopo che si è sviluppato un fronte di fiamma pienamente turbolento e stabile si passa ad accendere elementi sempre più magri. Si ottiene quindi il risultato di bruciare una miscela di composizione globalmente molto magra con conseguente incremento di efficienza e della completezza delle reazioni di ossidazione del combustibile.
- Il processo di combustione non è più influenzato dal rapporto di miscela globale, ma soltanto da quello locale. Il carico del motore può essere quindi controllato variando la quantità di combustibile iniettato.
- Si possono usare più alti rapporti di compressione perché si è ridotto il pericolo di detonazione. Infatti, l'iniezione ritardata di combustibile all'interno del cilindro riduce notevolmente il tempo, durante il quale la miscela aria/combustibile si trova ad alti valori di temperatura e pressione. Limitata è quindi la formazione di prodotti di parziale ossidazione la cui instabilità può portare all'avvio della detonazione.

Per tutti questi motivi, ci si aspetta una forte diminuzione dei consumi specifici di combustibile, rispetto al tradizionale motore alimentato con una carica omogenea di composizione prossima al valore stechiometrico. L'obiettivo è quello di ottenere bassi consumi di combustibile e qualità di gas di scarico accettabile, senza sacrificare troppo le prestazioni. Per far ciò, si cerca di coprire il campo di impiego del motore con diverse modalità di alimentazione.

Nella zona dei medi e bassi carichi del motore funziona con una carica fortemente stratificata ed un grande eccesso d'aria, ottenuti mediante

un'iniezione ritardata ed una regolazione del carico basata sulla variazione del combustibile iniettato. Per contenere le emissioni, si effettua poi un loro trattamento all'uscita del motore in opportuni reattori catalitici e si adotta una consistente ricircolazione dei gas combusti per ridurre la produzione degli NOx.

Nella zona degli alti carichi, il volume di miscela stratificata diventa sempre più ricco portando ad un aumento delle emissioni nocive. Conviene quindi far funzionare il motore nella zona superiore dei carichi con miscela omogenea. A tal scopo basta anticipare l'iniezione, facendola avvenire durante la fase di aspirazione per ottenere una miscela sufficientemente omogenea tra il vapore di combustibile e l'aria. Inoltre, la massa d'aria aspirata torna ad essere adeguata, mediante la valvola a farfalla, al valore corrispondente alla coppia del guidatore. La massa di benzina che deve essere iniettata torna quindi ad essere calcolata dall'unità di controllo del sistema d'iniezione sulla base della quantità di aria introdotta. [6]

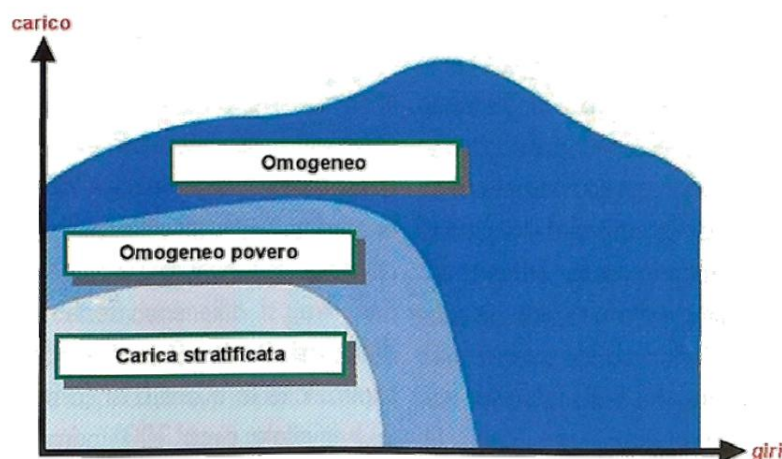


Figura 1.1: modalità di funzionamento motori GDI

1.5- Tipologia di impianto GDI

La struttura di un tipico impianto GDI è rappresentata in figura 1.2, in particolare quello montato sulle Volkswagen FSI. [7]

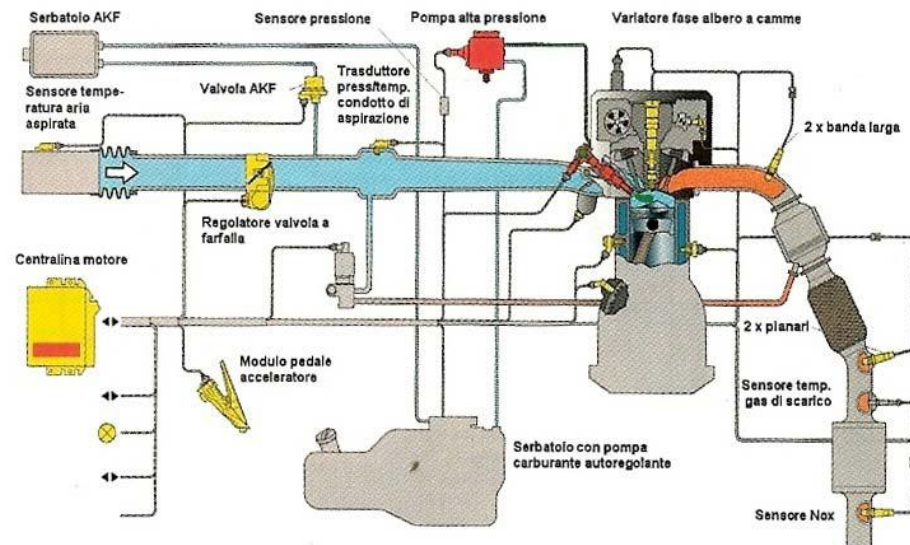


Figura 1.2: struttura di un moderno impianto GDI

Il sistema può essere suddiviso in 5 sottogruppi:

- 1- Sistema di aspirazione, costituito da:
 - misuratore di massa d'aria con sensore di temperatura aria aspirata per l'esatto rilevamento del carico;
 - sensore per la pressione del collettore di aspirazione per il calcolo della quantità di gas da riciclare;
- 2- Comando elettrico dell'acceleratore, i cui elementi costituenti sono:
 - valvola regolazione afflusso d'aria nel collettore di aspirazione;
 - sensore di pressione collettore d'aspirazione.
- 3- Sistema di alimentazione carburante, composto da:
 - serbatoio carburante;
 - pompa di bassa pressione
 - filtro del carburante;
 - valvola di dosaggio del carburante;
 - regolatore di pressione del carburante;
 - pompa e tubazione di alta pressione;
 - rail;
 - sensore di pressione del carburante;
 - iniettori.
- 4- Sistema di accensione:

Regolato dalla centralina del motore, ha il compito di accendere nel momento giusto la miscela aria/carburante. La centralina stabilisce in tutti i momenti di esercizio l'energia, la durata della scintilla e il punto di accensione. Quest'ultimo in particolare viene stabilito principalmente in base al carico del motore e al regime del motore.

- 5- Sistema di scarico; ne costituiscono parte integrante:
- collettore di scarico;
 - precatalizzatore a tre vie;
 - sonda lambda a banda larga, per determinare la percentuale residua di ossigeno dei gas di scarico;
 - sensore temperatura dei gas di scarico;
 - tubo di scarico a tre condotti;
 - catalizzatore ad accumulo di NOx;
 - sensore di NOx con relativa centralina.

1.6- I combustibili

I combustibili utilizzati nei test di laboratorio sono le benzine.

Le benzine sono idrocarburi ricavati dalla raffinazione del petrolio; la disposizione di atomi all'interno delle loro molecole dà origine a famiglie differenti di idrocarburi. E' possibile distinguere diverse famiglie, o serie, di idrocarburi:

- Serie paraffinica (o alifatica): rappresentati dalla serie generica $C_n H_{2n+2}$; si tratta di strutture a catena semplice all'interno delle quali l'atomo di carbonio si lega agli atomi di idrogeno sfruttando tutta la sua valenza. Questo è il motivo per cui le paraffine vengono chiamate idrocarburi saturi: la loro caratteristica principale è quella di essere costituite da molecole molto stabili, tra cui si può annoverare l'isooctano.
- Serie olefinica: caratterizzati dalla formula generale $C_n H_{2n}$ e presentano, pur con una stabilità inferiore, forte somiglianza con le paraffine.
- Serie naftenica, con formula $C_n H_{2n}$, composta da idrocarburi piuttosto stabili ma a catena chiusa.
- Serie aromatica, con formula $C_n H_{2n-2}$, anch'essi del tipo a catena chiusa e caratterizzati da una stabilità superiore rispetto a tutti quelli delle serie non sature.

Le benzine sono formate da idrocarburi di tutti i tipi e la loro distinzione è proprio funzione dei diversi elementi che concorrono a formarle; la loro caratteristica comune rimane invece la massa molecolare non elevata. La loro composizione è regolata da norme europee di riferimento, che in particolare stabiliscono vincoli e limiti legati a: quantità di benzene, contenuto totale di

ossigeno, pressione di vapore saturo, caratteristiche di distillazione, caratteristiche di detonazione, stabilità all'ossidazione, densità, contenuto di zolfo.

Nei motori ad accensione comandata, il principale parametro da considerare è il numero di ottano, che rappresenta l'indice della resistenza alla detonazione, combustione anomala che limita maggiormente le prestazioni di questa tipologia di motori.

Il numero di ottano viene calcolato da un apposito motore, il CFR (Cooperative Fuel Research), la cui caratteristica principale è quella di poter variare il proprio rapporto di compressione in un range compreso tra 4:1 e 30:1. La ricerca del numero di ottano avviene confrontando il comportamento del combustibile in esame con quello di una miscela di isottano e normal-eptano: viene definito numero di ottano del combustibile il numero intero che più si avvicina alla percentuale in volume di isoottano di una miscela con normal-eptano, che detona con modalità identiche a quelle del combustibile in esame. Con il motore CFR vengono calcolati secondo una procedura normalizzata due diversi numeri di ottano, precisamente il RON e il MON, ottenuti in differenti condizioni di prova. In particolare, il MON è il criterio più severo. A tal proposito si ricorda che le possibili rotture di un propulsore, a causa di fenomeni detonanti, vanno imputate a bassi valori di MON e non di RON. La differenza tra i due numeri è chiamata sensibilità del combustibile; in generale, gli idrocarburi paraffinici sono poco sensitivi, mentre gli olefinici e gli aromatici sono dotati di una sensibilità maggiore. [6]

Capitolo 2

L'apparato sperimentale

Lo scopo di questo capitolo è quello di elencare e descrivere gli strumenti utilizzati in laboratorio per effettuare le prove sperimentali. L'indagine sperimentale ha avuto come obiettivo quello di analizzare il comportamento dello spray di benzina al variare delle condizioni operative. I test di laboratorio sono stati eseguiti variando i seguenti parametri:

- Combustibile iniettato
- Pressione di iniezione del combustibile
- Pressione dell'aria in camera
- Temperatura del combustibile
- Temperatura dell'aria

Per studiare l'evoluzione temporale dello spray sono state prese delle immagini ad istanti diversi, opportunamente scelti per evidenziare le caratteristiche dello spray stesso.

L'apparato strumentale impiegato è costituito da:

1. Sistema di iniezione
2. Sistema di pressurizzazione del combustibile
3. Sistema di pressurizzazione dell'aria;
4. Sistema di preriscaldamento dell'aria;
5. Sistema elettronico di regolazione della temperatura;
6. Camera di prova;
7. Sistema ottico;
8. I combustibili impiegati

2.1- Sistema di iniezione

L'iniettore impiegato nei test è stato chiamato B36 .

La posizione dei getti nell'iniettore B36 è rappresentata in figura:



Figura 2.1: Iniettore B36

Schema della posizione dei getti sull'iniettore B36

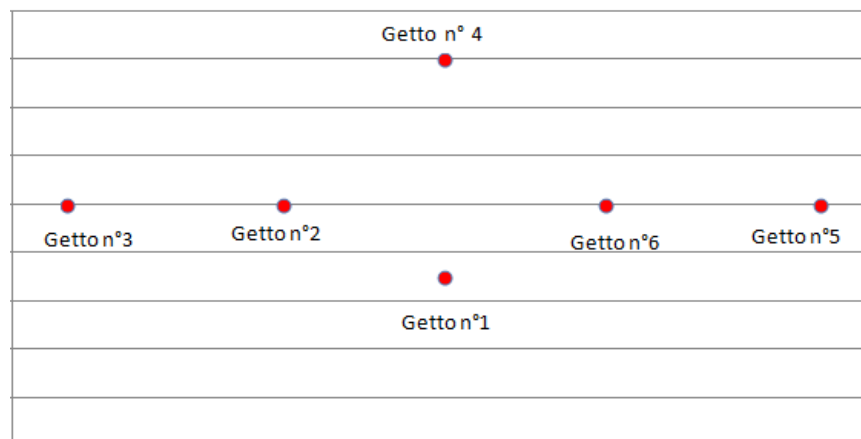


Figura 2.2: posizione dei getti sull'iniettore B36

L'iniettore è collegato ad una centralina elettronica di potenza alimentata da un generatore elettrico 12 V. L'unità di controllo logico dell'iniettore è un generatore di impulsi TTL (Transistor-Transistor logic).



Figura 2.3: Il generatore e la centralina elettronici

Il generatore di impulsi della BNC, modello 500 C, è dotato di quattro canali in uscita e di un ingresso di trigger/gate opzionale. Il generatore permette di inviare il segnale TTL di comando alla centralina di iniezione e, con i dovuti ritardi, il segnale di trigger alla telecamera ed allo stroboscopio.



Figura 2.4 : generatore ad impulsi

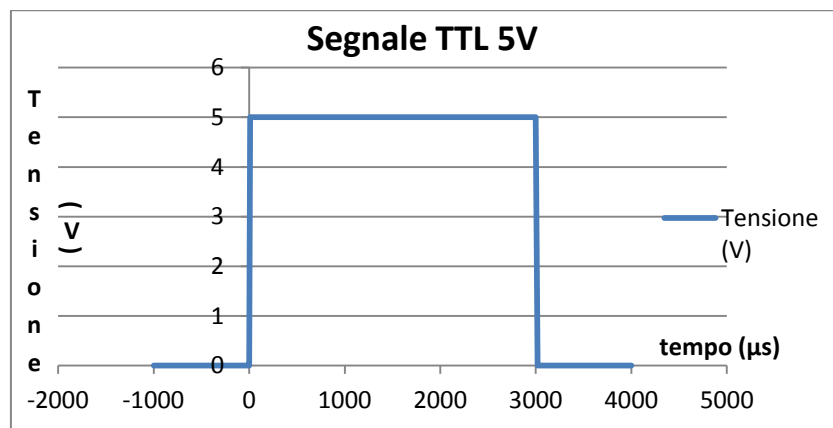


Figura 2.5: segnale TTL che aziona l'iniettore

Il segnale TTL a +5 V arriva dal generatore di impulsi BNC alla scheda di controllo che lo elabora e lo manda direttamente alla centralina. Essa viene alimentata dall'alimentatore, a 12 V; finché la tensione applicata si mantiene pari a questo valore, la centralina tiene chiuso l'iniettore ; quando il segnale TTL è alto, esso viene trasformato in un segnale a -12V che, sottraendosi all'alimentazione, determina l'apertura dell'iniettore e quindi l'iniezione dello spray. L'iniettore B36 presenta un ritardo meccanico di 300 μ s.

2.2- Sistema di pressurizzazione del combustibile

Il sistema di pressurizzazione del combustibile regola e controlla la pressione di iniezione all'interno della camera di prova ed è costituito dai seguenti componenti:

- Accumulatore di pressione in acciaio inox con membrana in viton, prodotto dalla Side, con capacità pari a 0,5 l, collegato all'iniettore con un tubo di rame per resistere alle elevate pressioni. Questo funge da serbatoio pressurizzato per il combustibile ed è dotato di una entrata e un'uscita con relative valvole di intercettazione per il riempimento o lo svuotamento del combustibile che avviene attraverso una pompa di tipo automobilistico a bassa pressione.



Figura 2.6: accumulatore di pressione



Figura 2.7: Pompa di benzina a bassa pressione per ricaricare il serbatoio

- Bombola di aria compressa, capacità 40.4 litri, omologata a 200 bar e resistente fino a 300; è collegata al lato aria dell'accumulatore di pressione per mettere in pressione il combustibile.



Figura 2.8: bombola a gas

- Trasduttore di pressione che misura la pressione all'interno dell'accumulatore di pressione. Il segnale di uscita viene mandato ad un regolatore che consente di regolare la pressione a 50 o a 100 bar attivando un'elettrovalvola. (Figura 2.9). Una valvola manuale permette di scaricare l'aria dall'accumulatore.



Figura 2.9: alimentazione del sensore di pressione del combustibile e delle elettrovalvole di regolazione

La fase di riempimento del serbatoio avviene azionando la pompa di benzina ed aprendo la valvola manuale di immissione quando la pressione all'interno dell'accumulatore è quella atmosferica.

Lo svuotamento del serbatoio avviene con una pressione di pochi bar aprendo la valvola manuale di scarico del circuito del combustibile.

2.3- Sistema di depressurizzazione dell'aria

La depressurizzazione della camera, dove è iniettato il combustibile, avviene mediante un eiettore pneumatico. La regolazione della pressione dell'aria in camera avviene attraverso una valvola manuale che permette l'afflusso di aria dall'ambiente un flussometro a galleggiante della Dwyer (tarato in l/min, con fondo scala pari a 50 l/min) permette di controllare il flusso di aria in ingresso. La portata di aspirazione viene regolata cambiando la pressione dell'aria di mandata all'eiettore. La misurazione della pressione è effettuata attraverso un vacuometro con campo di misura da -0.1 bar a -1 bar relativi e risoluzione pari a 0.01 bar.



Figura 2.10: Vacuometro e manometro

2.4- Sistema di preriscaldamento dell'aria

Per il preriscaldamento dell'aria in ingresso alla camera è impiegato un booster, costituito da un cilindro d'acciaio flangiato al cui interno è stato inserito un blocco di sei riscaldatori della Watlow di potenza complessiva pari a 1500W.

Il gas passa poi attraverso un tubo di rame a cui sono state applicate resistenze flessibili inguainate in uno strato di gomma siliconica per un totale di 420W. Sia booster che tubo sono stati dotati di termocoppie di tipo J per il controllo delle temperature.



Figura 2.11: Booster

2.5- Sistema elettronico di regolazione della temperatura

Il sistema di regolazione della temperatura avviene attraverso un controllo di tipo PID (proporzionale integrale derivata) che garantisce stabilità e una temperatura il più possibile prossima al punto di regolazione. Il combustibile e la flangia porta iniettore vengono portati alla temperatura desiderata utilizzando candele elettriche funzionanti a 220V. La temperatura è controllata da termocoppie di tipo J (ferro – costantana). I PID utilizzati nei nostri test sono quattro e fanno riferimento alle temperature della punta dell'iniettore, della flangia porta-iniettore, della flangia alla base camera (candele), e del booster.



Figura 2.12: sistema di controllo con regolatori PID Watlow

2.6- Camera di prova

La camera di prova utilizzata nei test ha una struttura cilindrica a volume costante costruita interamente in acciaio inox. Sulla superficie laterale sono presenti quattro aperture circolari sulle quali sono state montate delle finestre che consentono l'indagine ottica. Tre di queste sono posizionate a 90° l'una rispetto all'altra mentre la quarta forma un angolo di 70° e di 110° con le adiacenti. Attraverso le due finestre allineate lungo il diametro della camera,

viene fatto passare il fascio di luce proveniente da una lampada stroboscopica e diretto alla fotocamera digitale. Per evitare perdite, in tutte le flange realizzate in acciaio, sono presenti O-ring di tenuta.

La camera può raggiungere una pressione relativa di 8 bar e temperature anche superiori a 250°C. Attraverso la superficie inferiore è presente un ingresso connesso attraverso un tubo flangiato all'impianto di riscaldamento dell'aria in ingresso alla camera, mentre sulla superficie superiore ci sono le aperture per lo scarico, per la flangia porta-iniettore, per la termocoppia che misura la temperatura dell'aria in prossimità dell'iniettore e quella per il manometro che misura la pressione dell'aria all'interno.

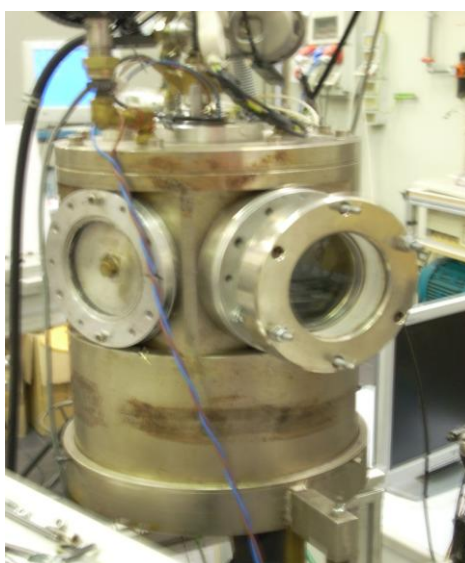


Figura 2.13: camera di prova

Dimensioni camera	Misura (mm)
Diametro esterno	276
Diametro interno	216
Altezza	300
Dimensioni finestre	Misura (mm)
Diametro	100
Spessore	40

Tabella 2.1: dimensioni camera di prova

2.7- Sistema ottico

Lo schema ottico utilizzato per ottenere le immagini è del tipo Schlieren a Z, nel quale non è stato utilizzato il coltello, quindi la visualizzazione è di tipo shadow.

Gli elementi costituenti sono:

- lampada stroboscopica Bint tipo 850 allo xeno a luce bianca, caratterizzata da: frequenza di flash da 0 a 60Hz; energia per singolo lampo di 325mJ (posizione low), 580mJ (posizione med), 850mJ (posizione high); durata del flash da 4 a 10 μ s; ritardo dei flash da 6 a 9 μ s; potenza istantanea massima di circa 120kW; sincronizzabile con un segnale TTL esterno;
- Schermo nero in acciaio con fessura centrale di dimensioni 1x6 mm, posto all'uscita della lampada stroboscopica (spostato in ordine di percorso);

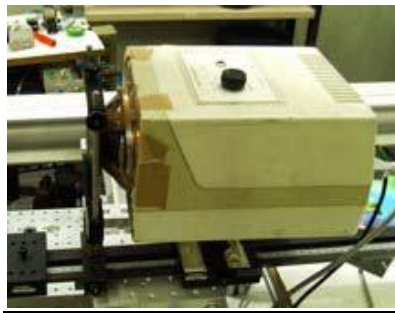


Figura 2.14: lampada stroboscopica

- Due specchi Edmund sferici, di diametro 6", distanza focale 60", orientabili, specifici per applicazioni schlieren;

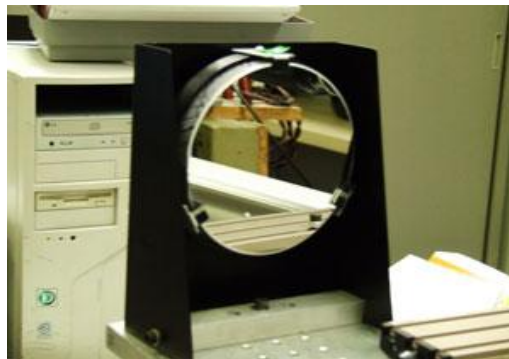


Figura 2.15: specchio Edmund sferico

- Fotocamera digitale PCO Sensicam FastShutter a 12 bit, caratterizzata da: tempo minimo di esposizione 0.1 μ s; risoluzione di 1280x1024 pixels; 4096 toni di grigio; zoom Nikkor da 80-200 mm;



Figura 2.16: fotocamera digitale PCO Sensicam

Viene generato, attraverso il primo specchio, un fascio luminoso parallelo che attraversa la sezione di prova e viene rifocalizzato da un secondo specchio. L'immagine viene poi focalizzata dall'obiettivo della telecamera.

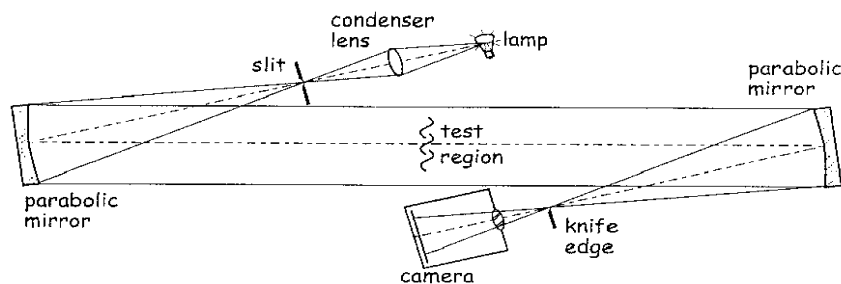


Figura 2.17: schema di un sistema ottico schlieren con configurazione a specchi

2.8- I combustibili impiegati

I combustibili utilizzati nella fase di sperimentazione sono le benzine.

Le benzine sono formate da diversi tipi di idrocarburi e la loro distinzione è proprio funzione dei diversi elementi che concorrono a formarle; la loro caratteristica comune rimane invece la massa molecolare non elevata. La loro composizione è regolata da norme europee di riferimento, che in particolare stabiliscono vincoli e limiti legati a: quantità di benzene, contenuto totale di ossigeno, pressione di vapore saturo, caratteristiche di distillazione, caratteristiche di detonazione, stabilità all'ossidazione, densità, contenuto di zolfo.

Il Requisito essenziale di questi carburanti è quello di poter dare, una volta mescolati con aria, una miscela combustibile anche alle temperature più basse a cui possono trovarsi le tubazioni di aspirazione del motore. Le condizioni più gravose da questo punto di vista si hanno all'avviamento con motore freddo. La

temperatura della miscela dipende non soltanto dalla temperatura del motore e da quella dell'aria esterna ma anche dalla quantità di calore assorbita dal combustibile per evaporare, cioè dalla sua volatilità. La volatilità, cioè la capacità che ha la benzina di evaporare, è il parametro che influisce sull'angolo di spray e che più ci ha interessato. Questa può essere calcolata dalla curva di distillazione e dalla tensione di vapore. La prima fornisce la legge secondo la quale varia la percentuale in volume di combustibile, che evapora all'aumentare della temperatura. Essa viene determinata scaldando un campione di liquido fino alla sua completa evaporazione. Raffreddando successivamente i vari prodotti, si fanno gradualmente condensare, rilevando i valori di temperatura corrispondenti ai diversi volumi condensato. La tensione di vapore è la pressione esercitata dal vapore saturo in equilibrio con il suo liquido. Essa è una funzione crescente con la temperatura e può essere fornita attraverso relazioni empiriche che la legano alla composizione del combustibile. Normalmente per le benzine ci si limita a dare la tensione di vapore Reid: pressione di vapore del combustibile a 37.8°C, misurata in condizioni normalizzate.

La volatilità deve essere abbastanza elevata per evitare un eccessivo consumo di calore per l'evaporazione, e tuttavia non troppo alta, per evitare perdite o formazione di bolle di vapore nelle tubazioni. Una comune benzina deve avere una temperatura iniziale di distillazione non minore di 30 °C e una temperatura finale di 190-210 °C. Se il combustibile, troppo volatile, si trova completamente allo stato di vapore, la miscela ricca che i carburatori danno durante la fase di accelerazione causa una perdita di potenza e un funzionamento irregolare. Quindi la temperatura alla quale il 90% del carburante è già distillato non deve essere troppo bassa; se, d'altra parte, essa è troppo alta (caso del c. poco volatile) si ha facilmente una combustione incompleta e i residui passano a inquinare il lubrificante. Si ritiene opportuno che per una benzina da automobili la temperatura a cui il 90% del combustibile è distillato sia tra 200 e 235 °C nei climi caldi e tra 160 e 205 °C nei climi freddi. Per i motori di aviazione occorrono invece benzine più volatili che vengano completamente vaporizzate. Le condizioni climatiche in cui i veicoli a motore si trovano a operare richiedono diversi gradi di volatilità; la normativa prevede, quindi, dieci diverse classi di volatilità da applicarsi in modo diverso, secondo il periodo e il paese. [8] Nella nostra sperimentazione si è scelto di impiegare miscele e composti puri durante la fase di sperimentazione per valutare gli effetti sull'angolo di cono dello spray. Le sostanze pure impiegate sono l'isottano, l'eptano e l'esano.

L'Isottano è il nome con cui generalmente e impropriamente si indica il 2,2,4-trimetilpentano, si tratta di un idrocarburo alifatico ramificato appartenente alla serie degli alcani. Trova impiego come idrocarburo di riferimento per la misura del Numero di Ottano; ad esso viene infatti attribuito convenzionalmente il numero di ottano 100.

L'esano è un alcano avente formula bruta C_6H_{14} .

L'eptano è un idrocarburo alifatico saturo a 7 atomi di carbonio con formula bruta C_7H_{16} ; dei diversi isomeri conosciuti il più frequente è l'eptano normale contenuto nel petrolio (dal quale si ottiene per distillazione frazionata); viene impiegato nella determinazione del numero d'ottano di una benzina che ha per definizione valore pari a zero.[9]

Le caratteristiche dei combustibili impiegati sono riassunte nelle seguenti tabelle. Si ricorda nuovamente che le miscele non hanno un punto di ebollizione ma solo una curva di distillazione.

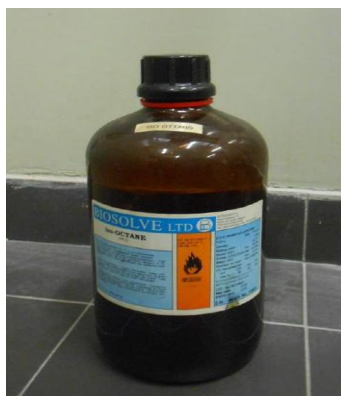


Figura 2.19: recipiente di isoottano

Proprietà	Unità	Fuel 01	Fuel 04	Fuel 05	Fuel 06	Fuel 08	Fuel C5
Densità a 15°C	kg/l	0,7402	0,744	0,7423	0,7487	0,7437	0,6238
Pressione di vapore saturante	kPa	65	62,1	56,9	57,7	59,4	148
RON		99,3	99,4	95,1	95,1	99,1	84,7
MON		87,4	89,3	85,2	85,2	87,3	82
I.B.P. (Initial Boiling Point)	°C	33	35	35	35	34	23
5 % v/v	°C	45	46	49	48	48	26
10 % v/v	°C	50	50	55	54	54	27
20 % v/v	°C	55	56	66	63	62	28
30 % v/v	°C	62	62	78	73	70	28
40 % v/v	°C	71	69	92	85	80	29
50 % v/v	°C	85	81	105	99	92	30
60 % v/v	°C	103	101	115	115	106	30
70 % v/v	°C	122	122	124	129	121	31
80 % v/v	°C	138	136	137	144	137	31
90 % v/v	°C	157	151	154	165	157	33
95 % v/v	°C	170	161	166	182	169	34
F.B.P (Final Boiling Point)	°C	186	195	189	217	193	38
Ev a 70 °C	% v/v	40	40,8	23,2	27,4	29,4	100
Ev a 100 °C	% v/v	58,9	59,5	46,2	50,4	55,8	100
Ev a 150 °C	% v/v	87	89,5	87,9	83,1	86,7	100
Aromatici	% v/v	30	30,9	32,3	34,2	29,2	0
Oleofine	% v/v	18	9,4	11	8,7	16,3	0
Saturi	% v/v	44,1	47	56,7	54,2	46,5	100
Ossigeno totale	% v/v	1,44	2,33	0	0,53	1,45	

Tabella 2.2: caratteristiche dei combustibili utilizzati

Proprietà	Unità	Eptano	Esano	Isoottano
Temperatura di ebollizione a 1 atm	°C	98,42	68,73	99
RON		0		100
Pressione di vapore saturante a 20 °C	kPa	4,6	20,1	5,1

Tabella 2.3: caratteristiche dei composti puri utilizzati

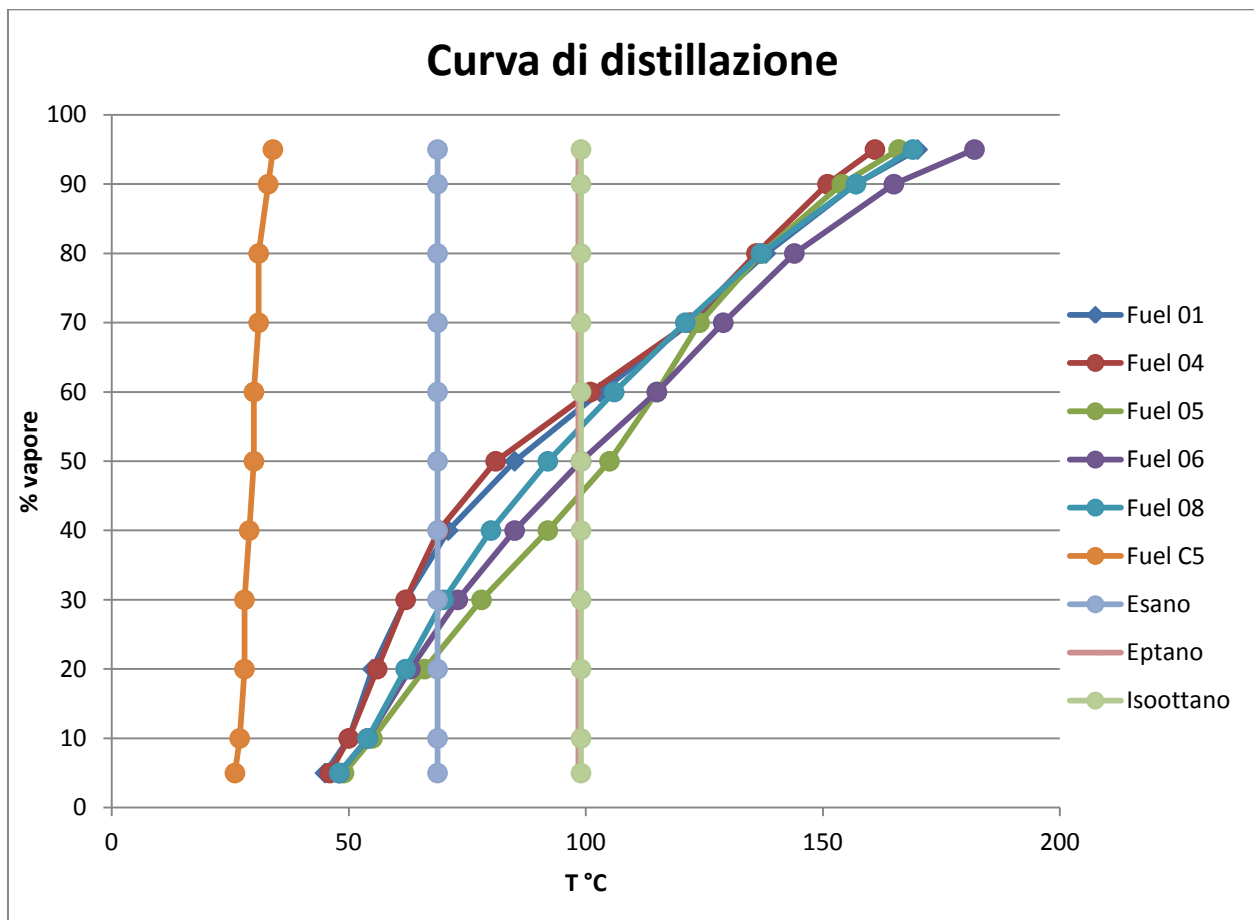


Figura 2.19: Curva di distillazione dei combustibili

Capitolo 3

Il metodo

3.1- Sistema di acquisizione delle immagini

L'acquisizione delle immagini avviene utilizzando il software Camware che consente di stabilire il tempo di esposizione e il ritardo della telecamera SensiCam. Lo stroboscopio è azionato dal generatore ad impulsi BNC che permette di scegliere il tipo di impulso; il suo ritardo rispetto al tempo 0; la sua durata; il numero di cicli; l'intervallo di tempo tra un ciclo e l'altro .

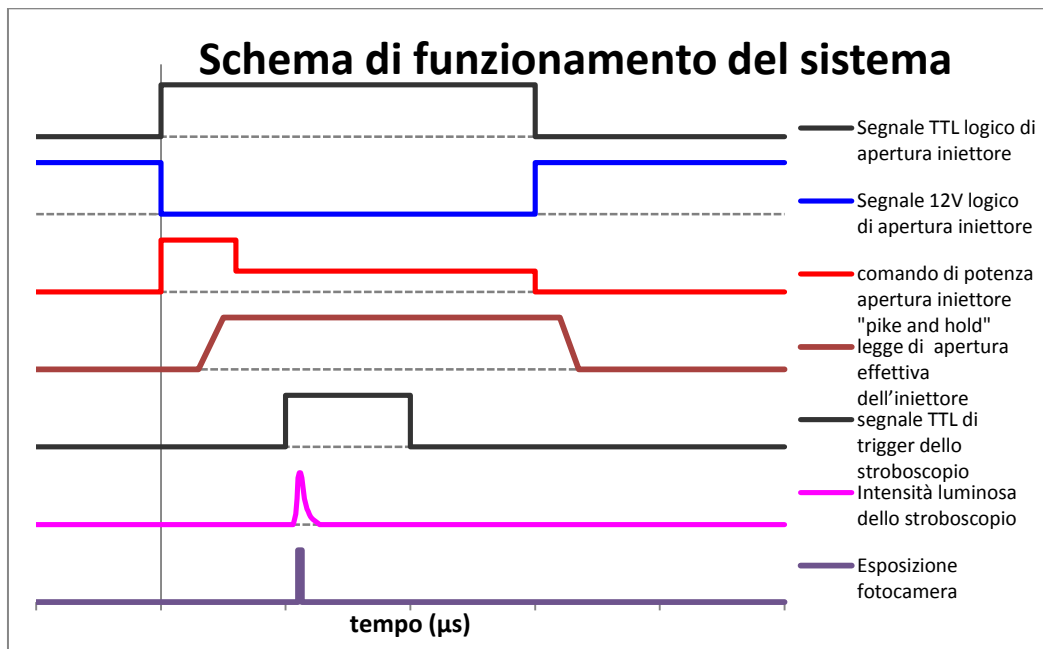


Figura 3.1: schema funzionamento del sistema

La figura mostra schematicamente il funzionamento del sistema per l'acquisizione delle immagini. Un segnale TTL comanda l'apertura dell'iniettore, che avviene con un ritardo meccanico di $300 \mu s$, un secondo segnale TTL, con un ritardo voluto rispetto al precedente costituisce il trigger sul fronte di salita per lo stroboscopio e la telecamera. L'acquisizione dell'immagine avviene con un ritardo, controllato dal software, di $5 \mu s$ rispetto al trigger in modo che l'esposizione avvenga durante il picco di intensità della luce emessa dallo stroboscopio. Infatti, la curva di potenza della lampada stroboscopica, ha il picco massimo a $6-7 \mu s$ dall'arrivo dell'impulso, è perciò

stato possibile ottimizzare la luminosità delle immagini impostando ritardo e tempo di esposizione della telecamera, rispettivamente, a 5 e 3 μ s. È stata ottimizzata inoltre la grandezza delle immagini in modo da avere una risoluzione di 0.1 mm per pixel, agendo sul posizionamento della fotocamera e sulla posizione degli specchi.

Nella sottostante tabella vengono visualizzati i parametri giudicati ottimali per l'acquisizione fotografica.

Parametro	Valori ottimizzati
Distanza da specchio della fotocamera	174 cm
Ritardo esposizione	5 μ s
Tempo di esposizione	3 μ s
Intensità luminosa flash	medium
Grandezza immagine	1024 X 928 px
Zoom	135 mm
Diaframma	completamente aperto

Tabella 3.1: parametri dell'acquisizione fotografica

Durante la sperimentazione è stato necessario adottare periodici accorgimenti per garantire la validità nel tempo delle misure effettuate. Particolare attenzione è stata prestata all'apparecchiatura ottica, attraverso periodica pulizia delle finestre ottiche, resa necessaria dallo sporco dovuto al combustibile residuo alle basse pressioni, pulizia dell'obiettivo, verifica dell'allineamento degli specchi, verifiche sul funzionamento corretto dell'iniettore. Prima di ogni cambio di benzina nell'impianto è stato effettuato un completo lavaggio della linea della benzina, per evitare il miscelamento tra diversi combustibili. L'acquisizione delle immagini è avvenuta attraverso il software Camware che consente non solo di registrare le immagini ma anche di visualizzare e ottenere informazioni in tempo reale sulle immagini. In particolare sono stati utilizzati durante l'acquisizione delle immagini due strumenti:

- L'istogramma di intensità luminosa;
- La finestra di controllo della fotocamera

Il primo strumento rappresenta l'ammontare del numero di pixel per ciascun valore di intensità luminosa ed è stato utilizzato per controllare la luminosità media dell'immagine. L'istogramma può rappresentare quindi uno strumento efficace che permette di riprodurre in maniera fedele le condizioni di illuminazione.

La finestra di controllo della fotocamera rappresenta invece l'interfaccia principale di regolazione delle impostazioni della SensiCam. Da essa si controlla ritardo e il tempo di esposizione, è possibile selezionare una regione di interesse all'interno del campo della fotografia, si possono ottenere informazioni riguardo a risoluzione del sensore, temperatura delle componenti elettroniche, numero di immagini registrate al secondo. Il software Camware consente, inoltre, di salvare singole immagini o un recorder di un numero scelto di foto dall'utente in

diversi formati (fts , bmp, asc, tif). Fra le diverse tipologie di formati, le immagini sono state salvate in .tif, poiché questo tipo di file è facilmente visualizzabile e modificabile mediante una grande quantità di software di elaborazione di immagini. La fotocamera lavora a 12 bit, per cui si è scelto di effettuare i salvataggi a 8 bit, accettando una minima perdita di informazioni sull'immagine ottenendo però dei file meno ingombranti.

L'elaborazione delle immagini è avvenuta attraverso il software Image Pro Plus che ha permesso la determinazione dell'angolo di cono β . Per ottenere una media rappresentativa di questa misura è stato necessario-acquisire 30 immagini per ciclo.

3.2- Sistema di elaborazione delle immagini

Le immagini acquisite con il software Camware sono state poi elaborate utilizzando il programma Image Pro Plus, un potente strumento che consente la modifica delle foto, l'analisi e la misurazione dei parametri di interesse in modo automatizzato attraverso l'uso di macro in linguaggio Visual Basic. Questo software consente di convertire le immagini in diversi formati; di re-impostare delle dimensioni dell'immagine; di selezionare una zona di interesse; di regolare il contrasto, di equalizzare e invertire l'immagine; di individuare un oggetto; di applicare dei filtri; di binarizzare; di effettuare operazioni logiche.

L'obiettivo di questo sistema di elaborazione delle immagini è la misurazione dell'angolo di cono β_1 e dell'angolo β_2 dello spray. Per far ciò sono state utilizzate le seguenti istruzioni all'interno di una macro:

- 1- Equalizzazione delle immagini, un processo automatico che cerca di rendere l'istogramma dell'immagine quanto più vicino ad una distribuzione uniforme.
- 2- Inversione delle immagini, necessaria per migliorare la visibilità delle stesse. Le fotografie ottenute mostrano un oggetto luminoso su sfondo scuro , ma la percezione visiva umana distingue più facilmente un grigio chiaro dal bianco che un grigio scuro dal nero. È opportuno, quindi, realizzare il negativo di ogni immagine: i bordi dello spray sono perciò più riconoscibili . È evidente che numericamente il problema di sensibilità non esiste, quindi il computer può lavorare con le immagini non- invertite .

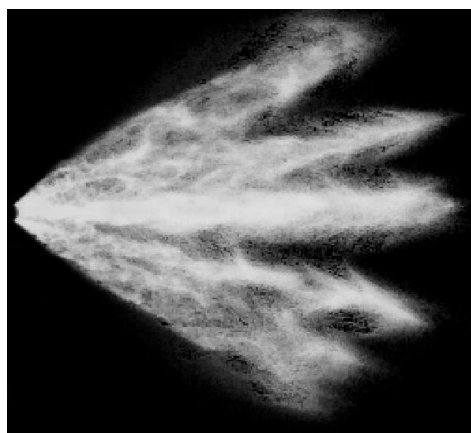


Figura 3.2: Spray invertito

- 3- Sottrazione di un'immagine di sfondo, in quanto lo spray è definito e riconoscibile dall'occhio umano, ma per il computer l'immagine è una matrice numerica e quindi i valori di intensità luminosa sono maggiori rispetto allo sfondo riconosciuto dall'occhio umano nel caso di spray in forma vapore, o minori nel caso di forma liquida. L'immagine di sfondo viene scattata con l'iniettore chiuso, quindi senza iniezione di combustibile in camera.
- 4- Binarizzazione delle immagini, processo che permette di distinguere l'oggetto di interesse dallo sfondo in cui questo si viene a trovare. Si determina una soglia opportuna che consente di separare lo spray dallo sfondo. Se i punti della immagine hanno intensità luminosa al di sotto della soglia allora appartengono allo sfondo, se i punti hanno intensità maggiore allora appartengono all'oggetto.



Figura 3.3: Spray binarizzato

- 5- Rotazione delle immagini, questa operazione restituisce una nuova immagine con lo spray studiato disposta orizzontalmente.
- 6- Taglio delle immagini nella zona al di fuori dello spray per eliminare ulteriori impurità.

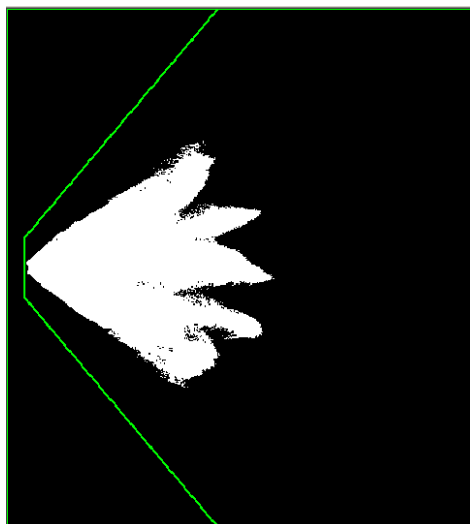


Figura 3.4: taglio delle immagini

- 7- Utilizzo dello strumento Line Profile per la misurazione della penetrazione dello spray e ricerca del valore di massima intensità dei pixel.
- 8- Ricerca di due valori soglia di intensità luminosa sullo spray a distanze scelte dall'utente per la misurazione della larghezza dello spray .

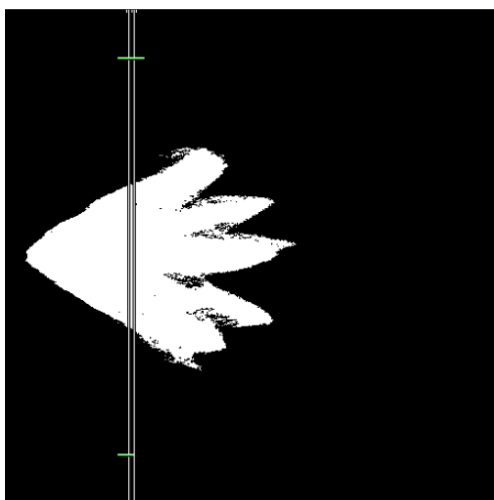


Figura 3.5:ricerca dei due valori soglia alla distanza di 20mm

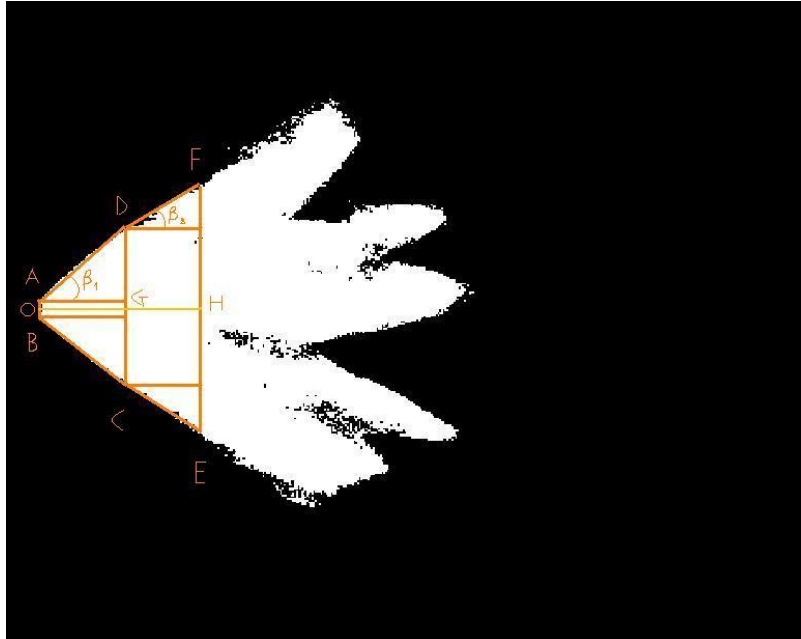


Figura 3.6: schema del metodo per la misurazione degli angoli

I file ottenuti con Image Pro Plus, sono stati poi elaborati in excel per misurare gli angoli β_1 e β_2 così definiti:

$$\beta_1 = \arctan \left(\frac{\frac{DC}{2} - \frac{AB}{2}}{OG} \right)$$

$$\beta_2 = \arctan \left(\frac{\frac{EF}{2} - \frac{DC}{2}}{OH - OG} \right)$$

L'angolo di cono dello spray θ è così definito:

$$\theta = 2 * \beta_1$$

La misurazione degli angoli è stata effettuata per ogni immagine presa e successivamente sono state calcolate la media aritmetica e la deviazione standard.

3.3- Determinazione delle condizioni sperimentali

Sono stati eseguiti dei test per determinare le seguenti condizioni sperimentali:

- Scelta della durata di iniezione
- Scelta del tempo di ritardo dello scatto
- Selezione del numero di immagini
- Scelta delle temperature e delle pressioni

Per effettuare le prove a pressione ambiente, a seguito di numerosi test, si è utilizzato un periodo di iniezione pari a 1 s. Il ritardo della fotocamera è pari a 5 μ s e il tempo di esposizione è di 2.3 μ s rispetto allo stroboscopio.

Le immagini sono state scattate per ogni condizione di temperatura e pressione. Si è scelto di considerare un incremento di temperatura pari a 20 °C a partire da 30 °C fino ad arrivare a 110°C. Le pressioni di iniezione del combustibile considerate sono 50 e 100 bar. Al fine di studiare l'evoluzione temporale degli spray, è stato variato per ogni condizione l'istante di acquisizione rispetto al momento di generazione dell'impulso. Per ogni prova sono perciò state prese foto a 1 ms, 2 ms, 3 ms. Per ogni condizione e ciascun istante temporale sono state scattate 30 foto in modo tale da ottenere dati medi e perciò meno dipendenti da fluttuazioni casuali nel campo di moto.

Per effettuare le prove in depressione è stato modificato il tempo di esposizione della fotocamera poiché la luminosità delle foto era piuttosto bassa a causa della presenza del vapore in camera dovuto alle precedenti iniezioni e si è passati da 2.3 μ s a 4.0 μ s notando però delle immagini poco nitide, perciò abbiamo scelto in definitiva un tempo di esposizione di 3.0 μ s e un ritardo di 5 μ s e un periodo di iniezione pari a 2 s per consentire la pulizia della camera.

Abbiamo notato inoltre che al diminuire della pressione in camera, il getto risultava molto più veloce, l'evoluzione dell'angolo di spray erano simili a 2 ms e 3 ms, quindi per queste prove si è deciso di analizzare lo spray a 1ms e a 3ms. Le pressioni considerate sono 0.8, 0.6, 0.4 bar e l'incremento di temperatura è di 20°C partendo da 30°C fino ad arrivare a 110°C. Analogamente ai test realizzati a pressione ambiente, sono state scattate 30 foto per ogni condizione.

Sono state inoltre scattate 30 foto con iniettore chiuso in modo tale da ottenere le immagini di sfondo per ogni condizione, che verranno poi sottratte durante la fase di elaborazione delle stesse.

3.4- Prove finali

Una volta determinate le condizioni sperimentali sono state effettuate le prove elencate nella tabella seguente

	Iniettore
	B36
Combustibili	Fuel04, Fuel06, Fuel08, Fuel95, N-esano, Isoottano, N-eptano
Pressione di iniezione	50-100 bar
Pressione in camera	0.4-0.6-0.8-1.013 bar
Temperature	30, 50, 70, 90, 110°C

Tabella 3.2: tabella riepilogativa delle prove

Il numero elevato di fotografie raccolte ha richiesto un sistema di nomenclatura delle immagini chiaro e nello stesso tempo preciso. Per ogni immagine è quindi possibile risalire in maniera semplice e veloce alle condizioni di prova e all'istante temporale fotografato.

Per quanto riguarda i test a pressione ambiente, le directory sono così strutturate:

???_?????_P???bar_T???C_d????_00??

??? : Nome dell'iniettore B36

?????? : Nome del combustibile in 6 caratteri

P???bar : Pressione di iniezione in bar

T???C : Temperatura in °C

d???? : Tempo di ritardo in µs

00?? : Numero della foto

Ad esempio, per la prova eseguita con l'iniettore B36, con il carburante 06 ad una pressione di 50 bar, temperatura di 20 ° C e con un ritardo di 2000µs, il numero di foto 1 verrà denominato in questo modo:

"B36_Fuel06_P050bar_T020C_d2000_0001."

Per quanto riguarda i test in depressione, le directory sono invece così strutturate:

???_?????_P???bar_T???C_P???bar_d????_00??

??? : Nome dell'iniettore B36

?????? : Nome del combustibile in 6 caratteri

P???bar : Pressione di iniezione in bar

T???C : Temperatura in °C

P???bar : pressione della camera in bar

d???? : Tempo di ritardo in µs

00?? : Numero della foto

Ad esempio, per la prova eseguita con l'iniettore B36, con il carburante 06 ad una pressione di iniezione pari a 50 bar e pressione in camera pari a 0.40 bar, temperatura di 30 ° C e con un ritardo di 3000µs, il numero di foto 1 verrà denominato in questo modo:

"B36_Fuel06_P050bar_T030C_P0.40bar_d3000_0001."

Capitolo 4

Risultati

4.1- Osservazione delle foto

Nelle seguenti immagini si illustra l'evoluzione temporale dello spray con pressione in camera pari a 0.40,0.60 e 0.80 bar alla temperatura del combustibile pari a 50 ° C a 1 ms e a 3 ms per il Fuel 08 con una pressione di iniezione pari a 50 bar.

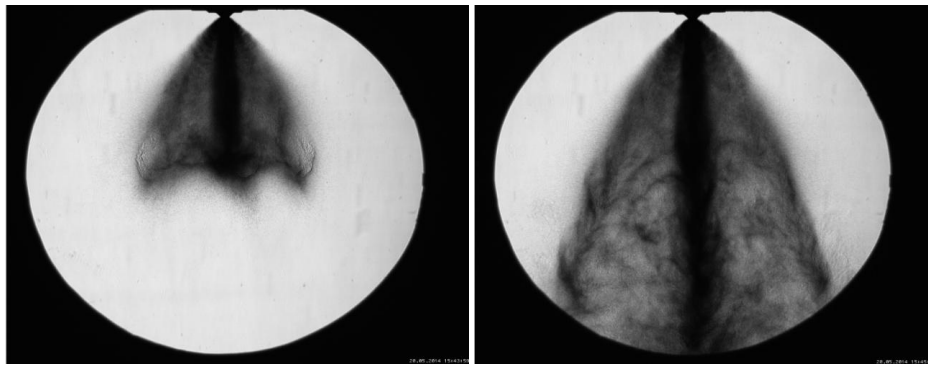


Figura 4.1:immagini B36_Fuel08_P050bar_T050C_P0.40bar_d1000 e B36_Fuel08_P050bar_T050C_P0.40bar_d3000

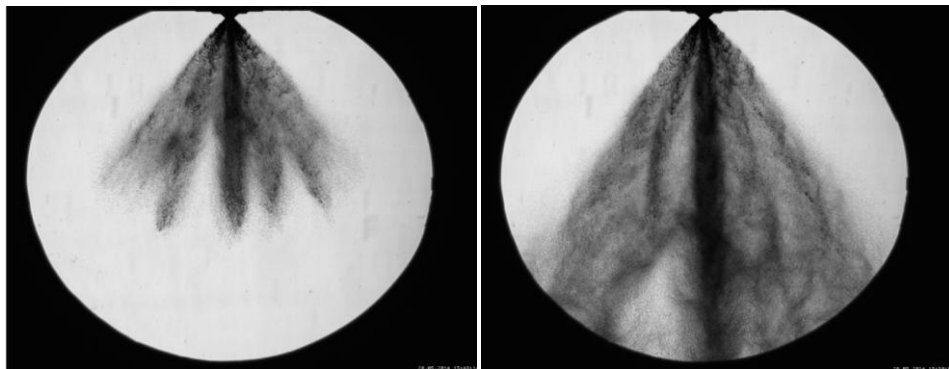


Figura 4.2: immagini B36_Fuel08_P050bar_T050C_P0.60bar_d1000 e B36_Fuel08_P050bar_T050C_P0.60bar_d3000

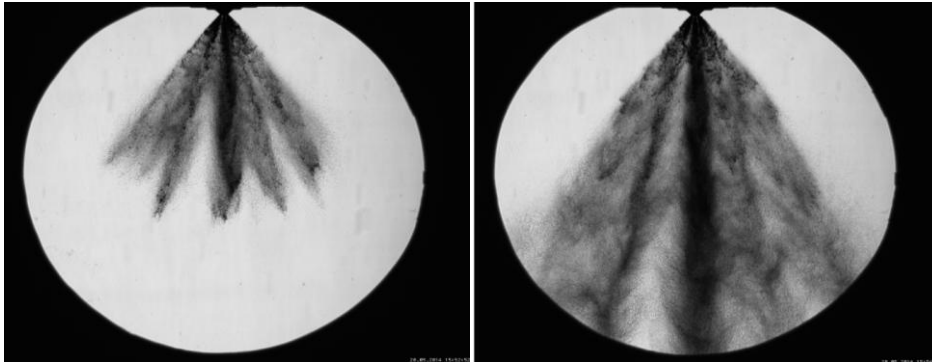


Figura 4.3: immagini B36_Fuel08_P050bar_T050C_P0.80bar_d1000 e B36_Fuel08_P050bar_T050C_P0.80bar_d3000

Alla pressione di iniezione di 100 bar, l'evoluzione temporale delle spray è la seguente:

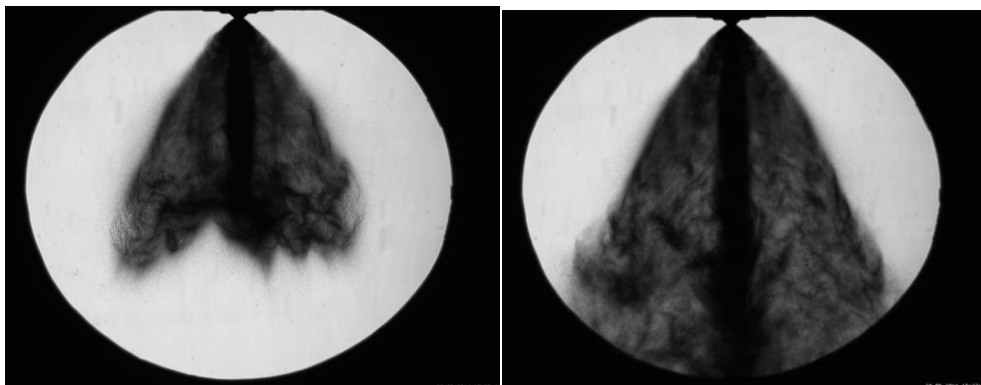


Figura 4.4: immagini B36_Fuel08_P100bar_T050C_P0.40bar_d1000e B36_Fuel08_P100bar_T050C_P0.40bar_d3000

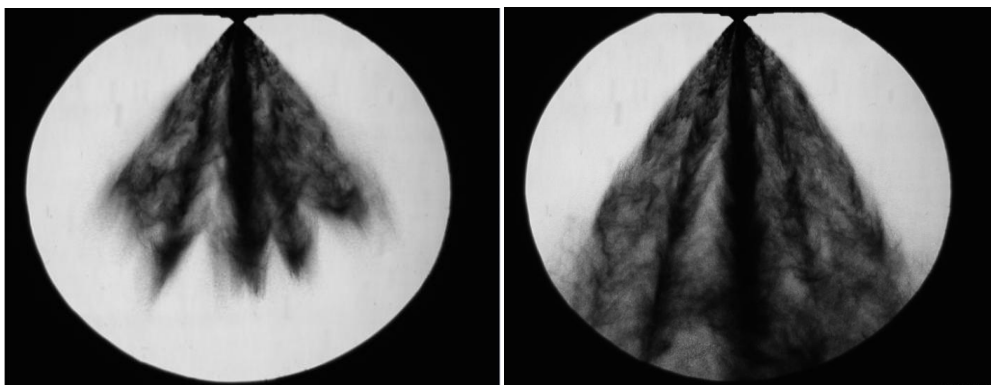


Figura 4.5: immagini B36_Fuel08_P100bar_T050C_P0.60bar_d1000 e B36_Fuel08_P100bar_T050C_P0.60bar_d3000

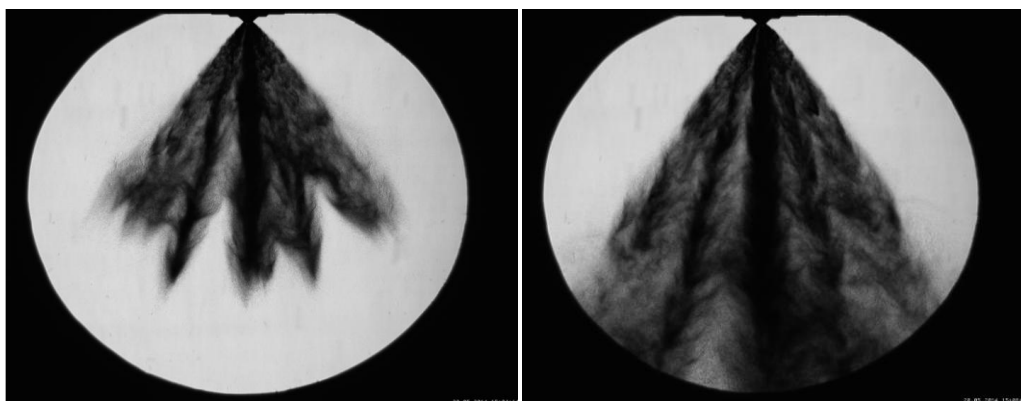


Figura 4.6: immagini B36_Fuel08_P100bar_T050C_P0.80bar_d1000 e B36_Fuel08_P100bar_T050C_P0.80bar_d3000

Nelle immagini seguenti si può osservare inoltre l'effetto della temperatura sulla struttura dello spray alle diverse pressioni in camera per pressione di iniezione 50 e 100bar

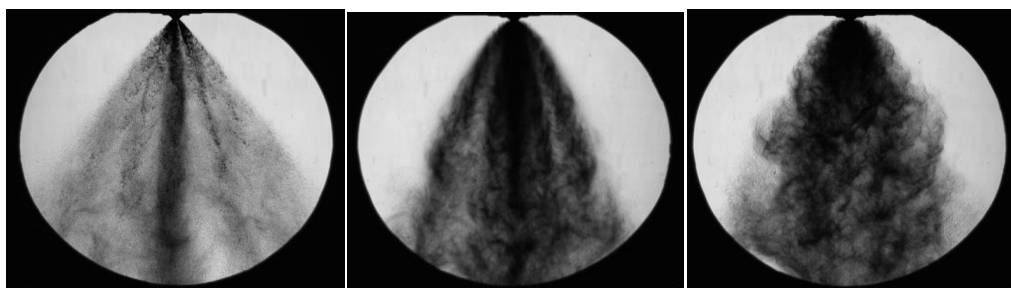


Figura 4.7: immagini B36_Fuel08_P050bar_T030C, T070C, T110C_P0.40bar_d3000

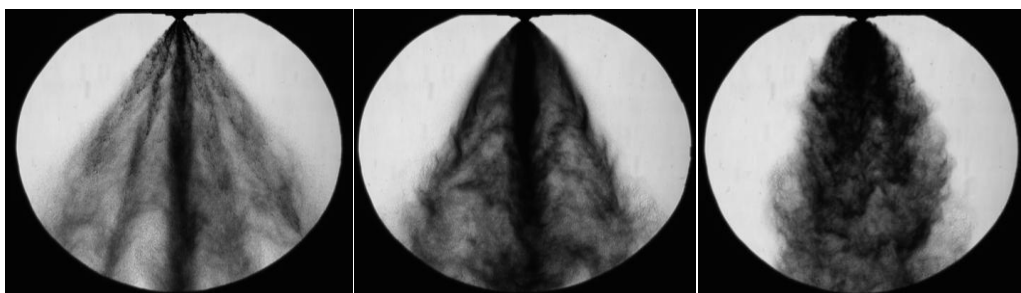


Figura 4.8: immagini B36_Fuel08_P050bar_T030C, T070C, T110C_P0.60bar_d3000

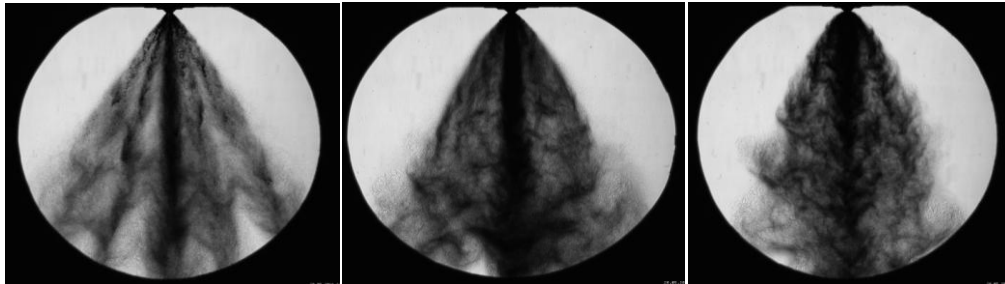


Figura 4.9: immagini B36_Fuel08_P050bar_T030C, T070C, T110C_P0.80bar_d3000_0028

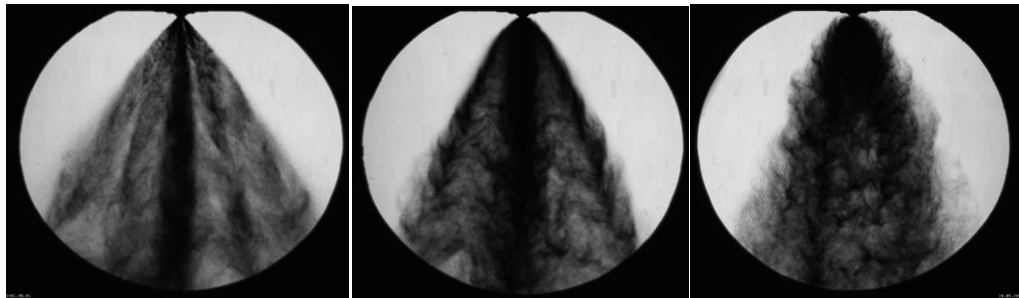


Figura 4.10: immagini B36_Fuel08_P100bar_T030C, T070C, T110C_P0.40bar_d3000_0028

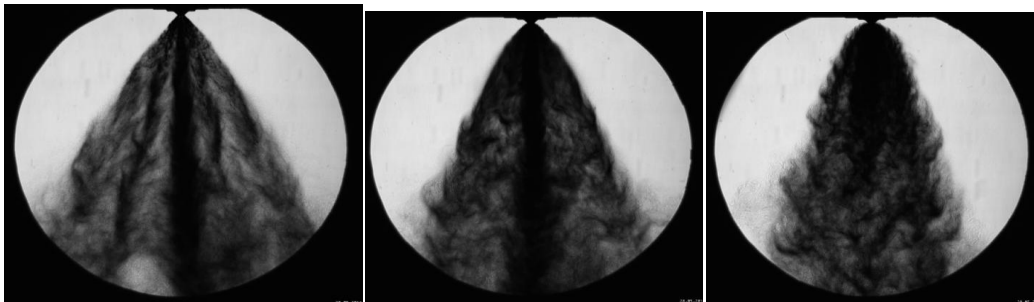


Figura 4.11: immagini B36_Fuel08_P100bar_T030C, T070C, T110C_P0.60bar_d3000_0006

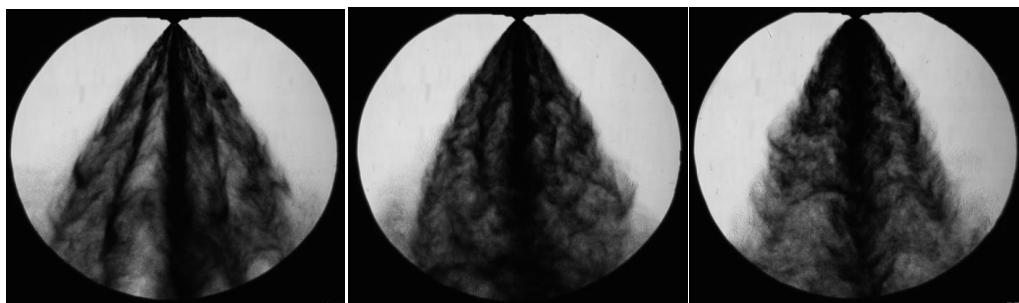


Figura 4.12: immagini B36_Fuel08_P100bar_T030C, T070C, T110C_P0.80bar_d3000_0014

Osservando le foto, si può notare come lo spray all'aumentare della temperatura si restringa e i sei getti siano meno definiti e distinguibili. Si viene a creare una depressione fra i getti all'aumentare della temperatura che porta i getti stessi a compattarsi fra di loro. L'angolo β_2 tende allora a ridursi. Inoltre un ulteriore

effetto della temperatura è visibile sull'angolo di cono β_1 , infatti all'aumentare della temperatura anche β_1 cresce come si può notare nelle seguenti immagini.

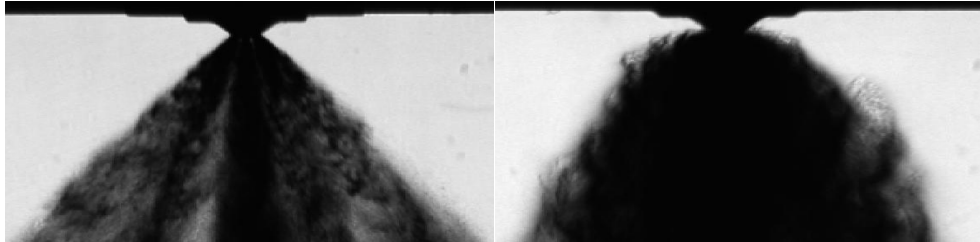


Figura 4.13: immagini P100bar T030C P0.60 bar d3000_0030 e P100bar T110C P0.60 bar d3000_0030

4.2- Andamento dell'angolo di cono β_1 per le diverse pressioni a parità di combustibile

Nei grafici seguenti vengono illustrati i risultati di laboratorio riguardanti l'angolo di cono β_1 , individuato alla distanza di 1 mm dall'origine della punta dell'iniettore, in relazione alla temperatura per ogni carburante testato a parità di pressione di iniezione. Le immagini relative alla condizione operativa di 1.013 bar sono state fornite da Alexandre Trouche. [10]

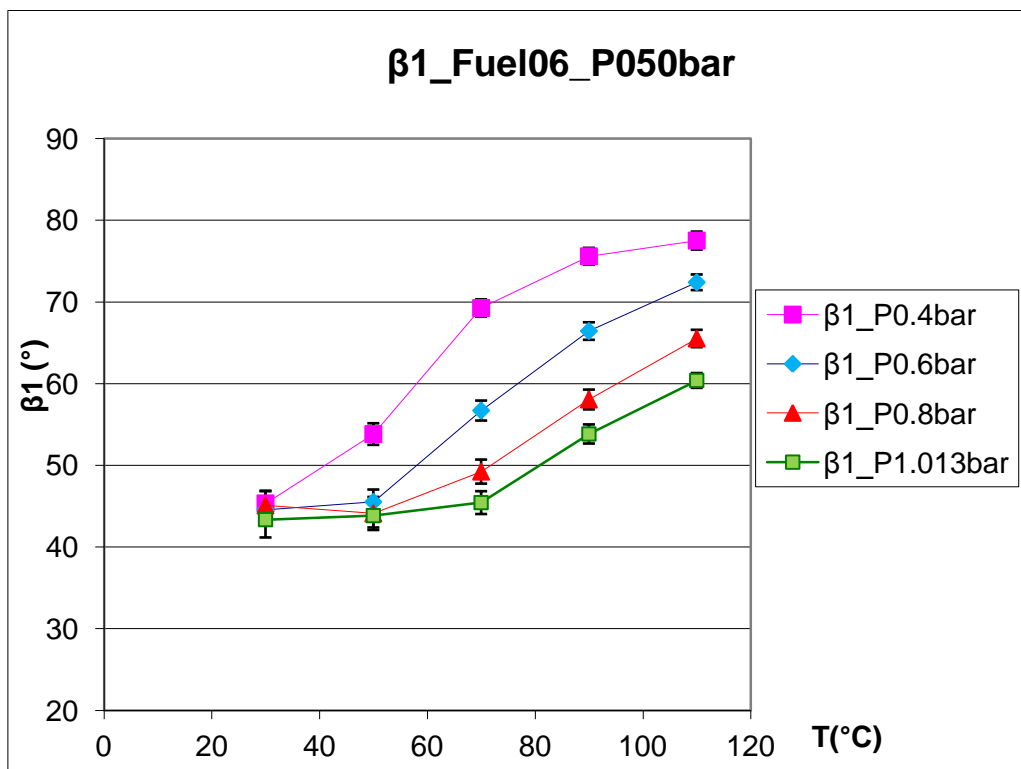


Figura 4.14: grafico β_1 -T per il Fuel06 a pressione di iniezione pari a 50 bar

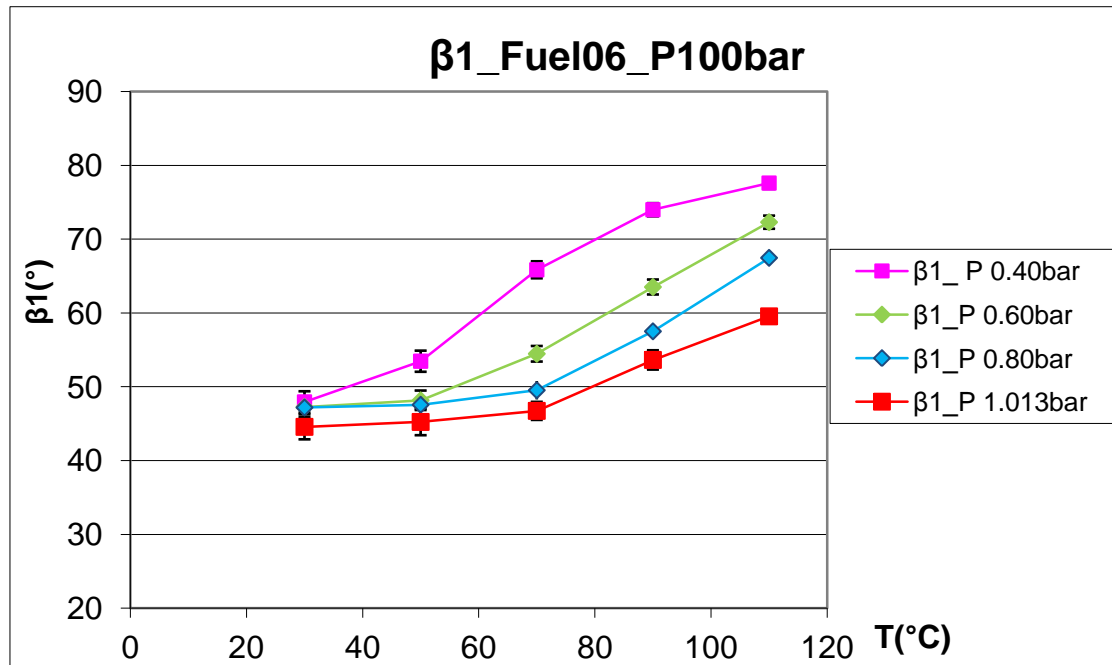


Figura 4.15: grafico β_1 -T per il Fuel06 a pressione di iniezione pari a 100 bar

Analizzando il grafico del Fuel 06 a pressione di iniezione pari a 50 bar, si può notare come alla temperatura di 30 °C, l'angolo di cono β_1 abbia lo stesso valore al variare della pressione in camera e, per temperature più alte, cresca all'aumentare della depressione. Questo incremento si verifica, per la curva a pressione in camera pari a 0.40 bar, già alla temperatura di 50 °C; per quelle a pressione in camera più alta, questo avviene a temperature superiori. Un analogo andamento delle curve si ripropone anche alla pressione di iniezione pari a 100 bar.

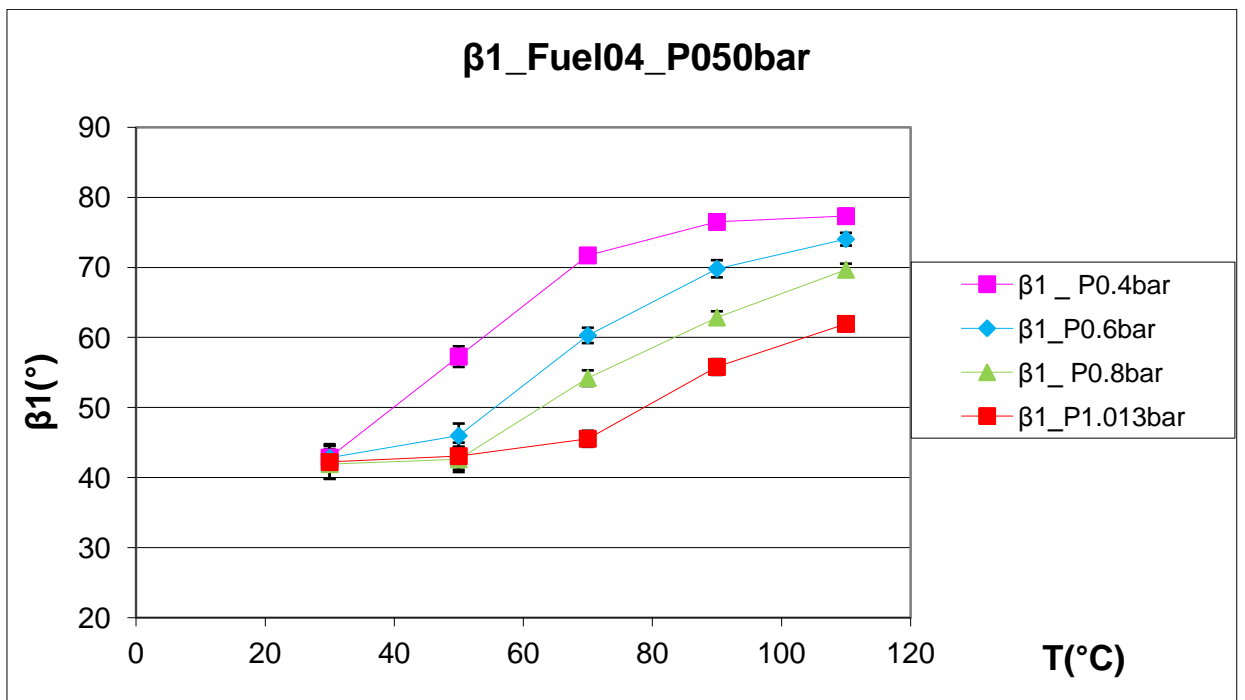


Figura 4.16: grafico β_1 -T per il Fuel04 a pressione di iniezione pari a 50 bar

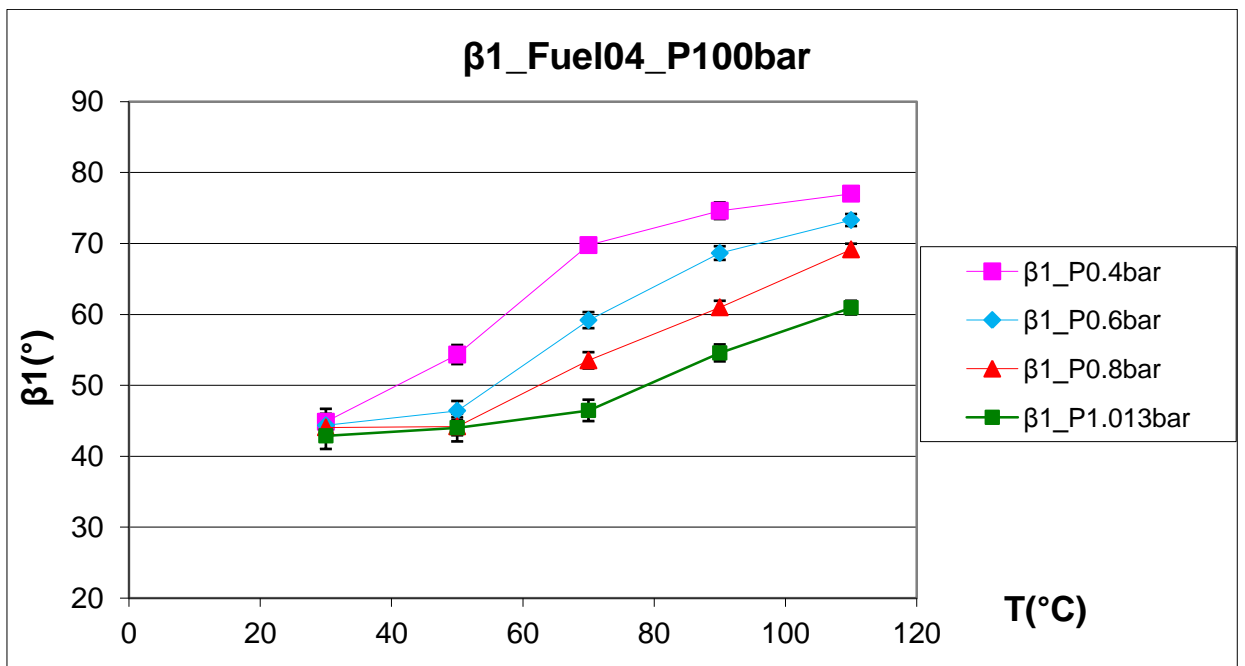


Figura 4.17: grafico β_1 -T per il Fuel04 a pressione di iniezione pari a 100 bar

Confrontando i due grafici emerge che alla pressione di 50 bar i valori del β_1 sono lievemente più alti rispetto alla condizione di pressione di iniezione pari a 100 bar.

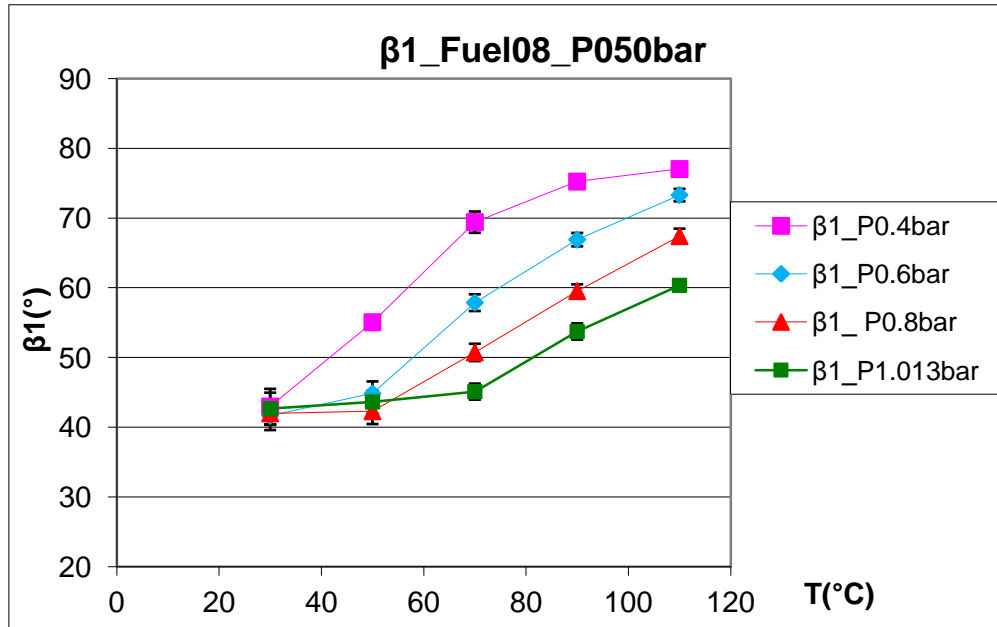


Figura 4.18: grafico β_1 -T per il Fuel08 a pressione di iniezione pari a 50 bar

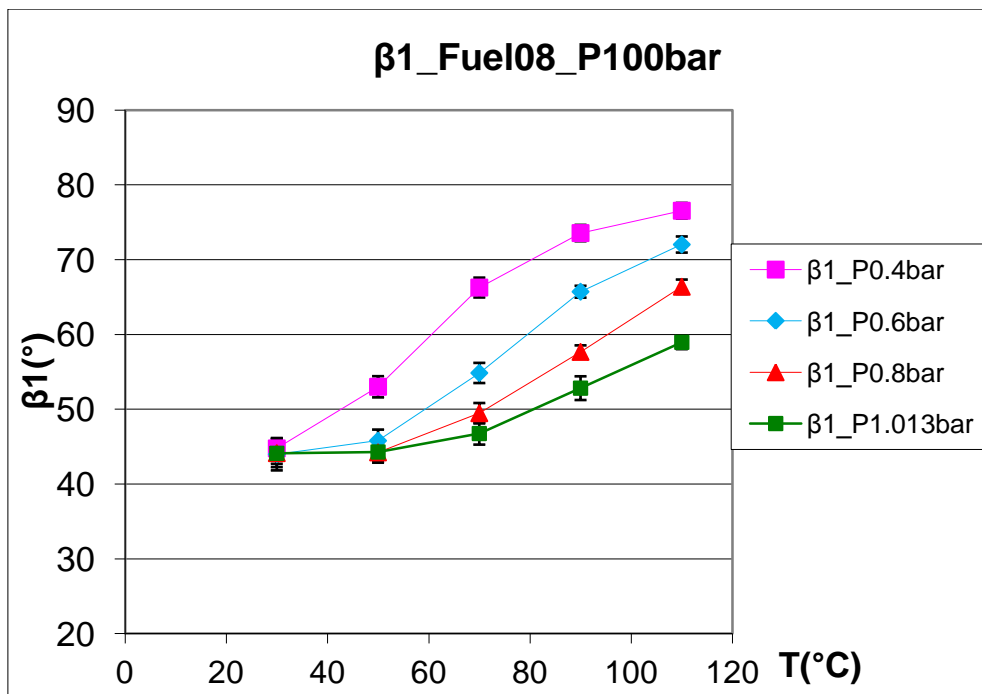


Figura 4.19: grafico β_1 -T per il Fuel08 a pressione di iniezione pari a 100 bar

Si può osservare dal grafico del Fuel08 che gli andamenti dell'angolo di cono β_1 sono simili sia alla pressione di iniezione pari a 50 bar che a 100 bar.

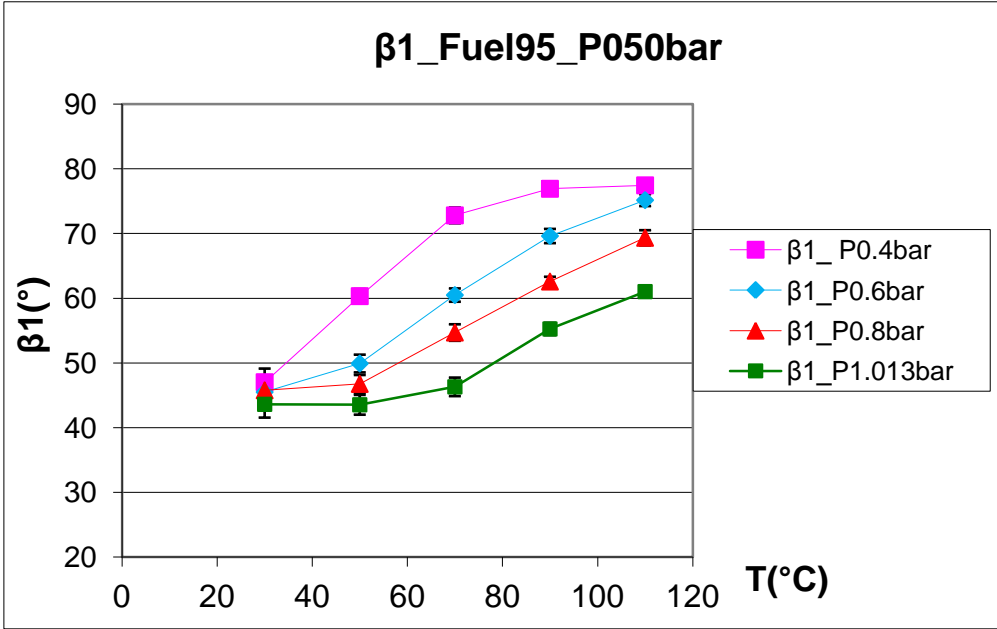


Figura 4.20: grafico β_1 -T per il Fuel95 a pressione di iniezione pari a 50 bar

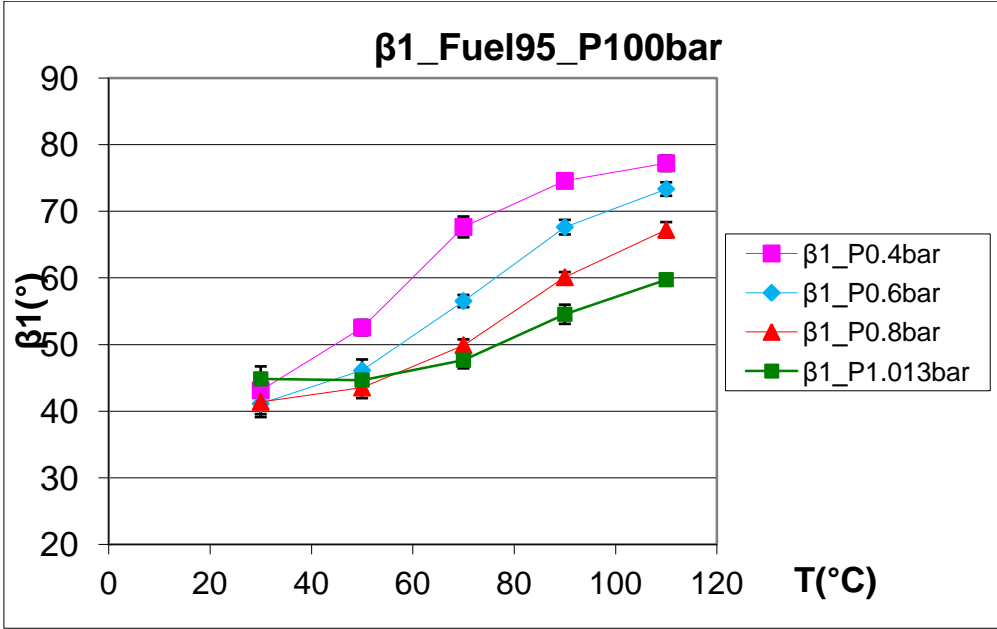


Figura 4.21: grafico β_1 -T per il Fuel08 a pressione di iniezione pari a 50 bar

I valori del β_1 sono di poco maggiori con una pressione di iniezione pari a 50 bar rispetto alla condizione di iniezione pari a 100 bar. L'andamento delle curve è comunque analogo a quello dei combustibili visti in precedenza.

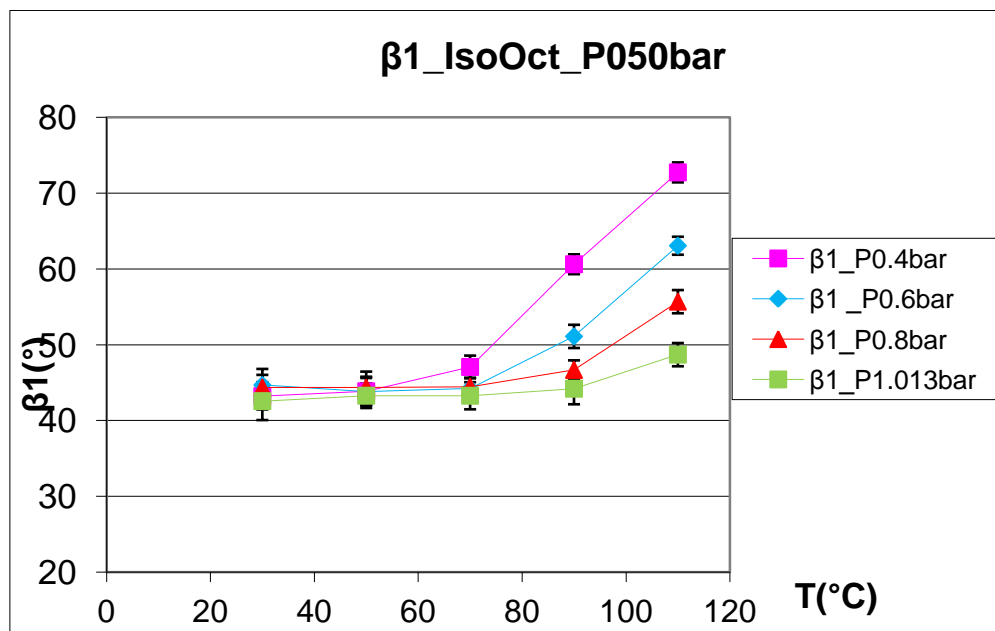


Figura 4.22: grafico β_1 -T per l'Isoottano a pressione di iniezione pari a 50 bar

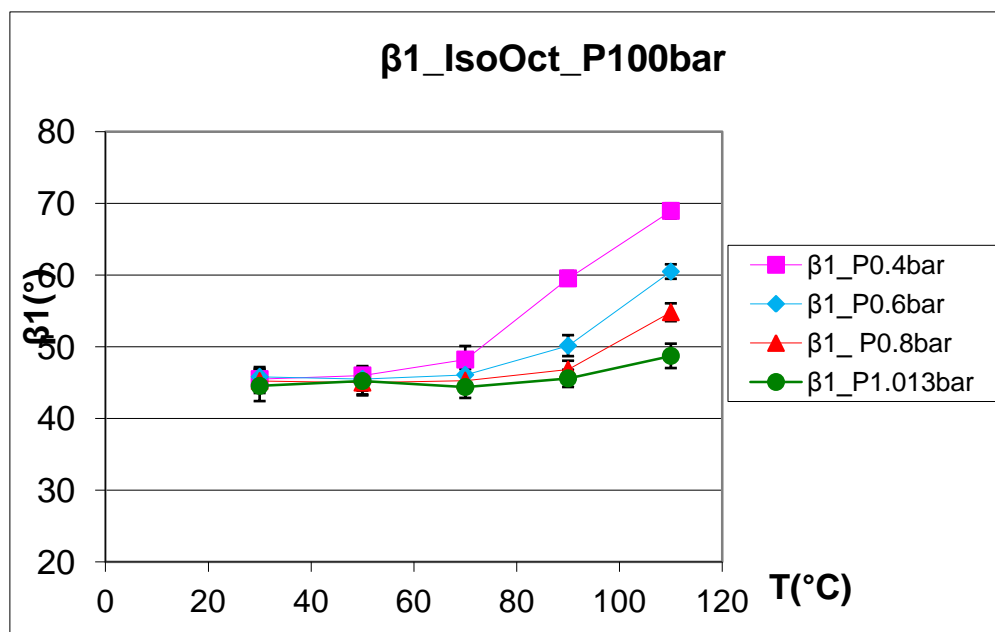


Figura 4.23: grafico β_1 -T per l'Isoottano a pressione di iniezione pari a 100 bar

Analizzando i due grafici dell'isottano emerge che i valori di β_1 sono simili sia a pressione di 50 bar che di 100 bar. Si verifica nuovamente che l'angolo è maggiore per valori più elevati di depressione.

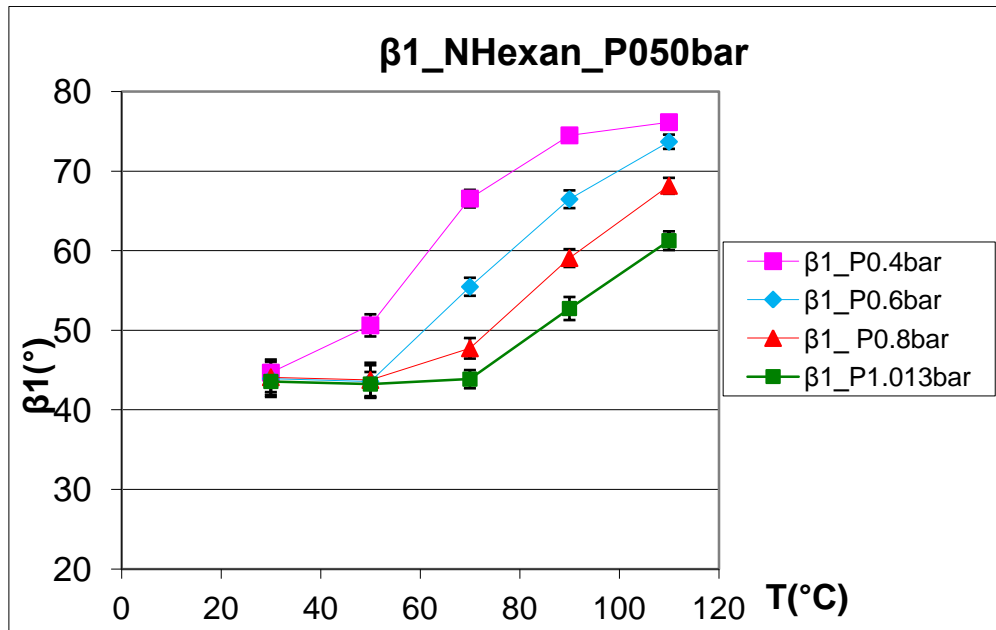


Figura 4.24: grafico β_1 -T per il Normal-esano a pressione di iniezione pari a 50 bar

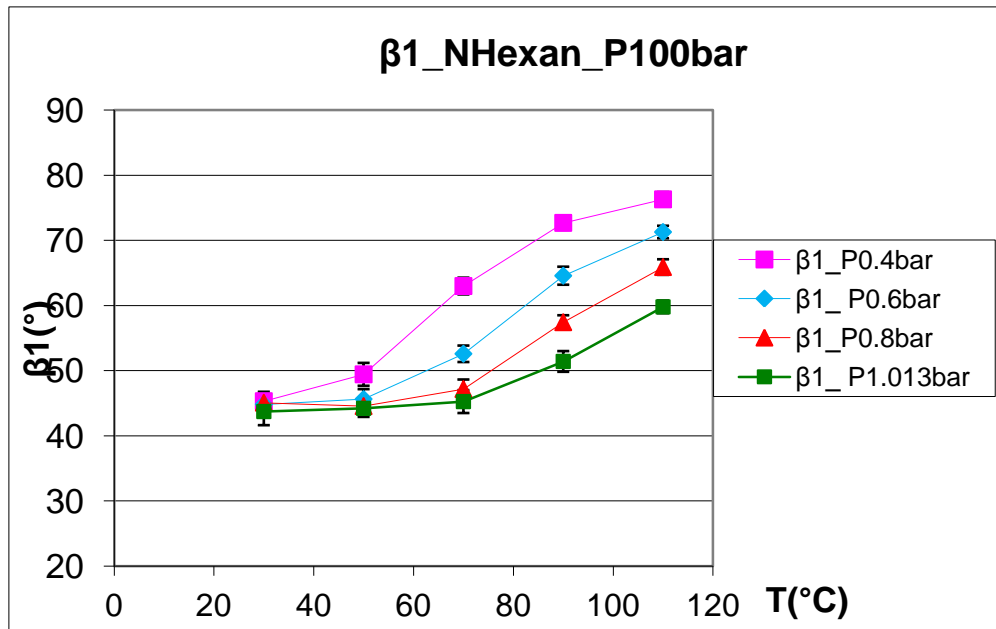


Figura 4.25: grafico β_1 -T per il Normal-esano a pressione di iniezione pari a 100 bar

Osservando il grafico del n-esano a pressione 50 bar e 100 bar, emerge che l'angolo β_1 tende ad aumentare all'aumentare della depressione.

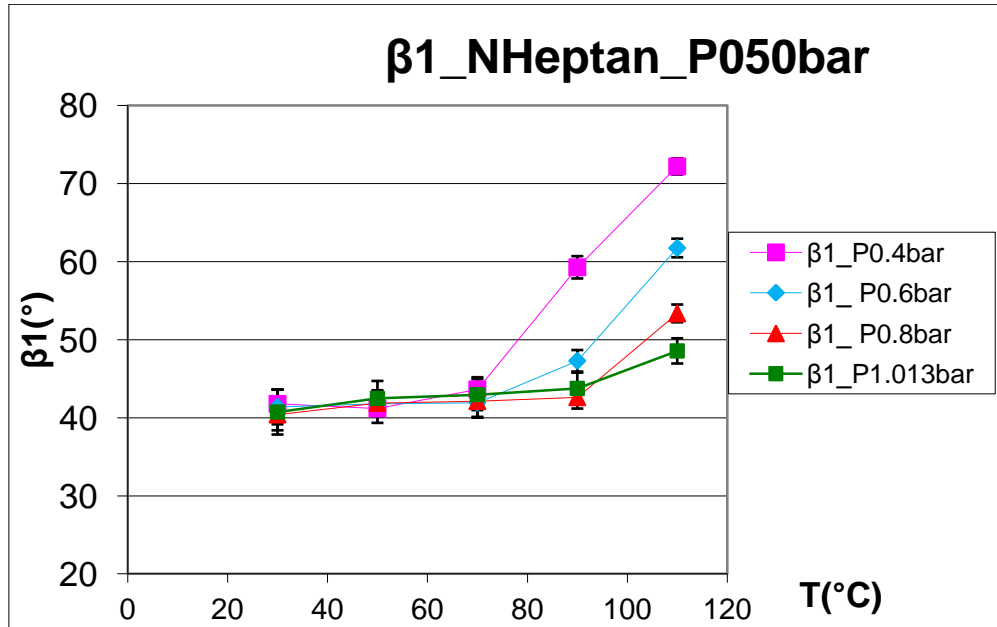


Figura 4.26: grafico β_1 -T per il Normal-eptano a pressione di iniezione pari a 50 bar

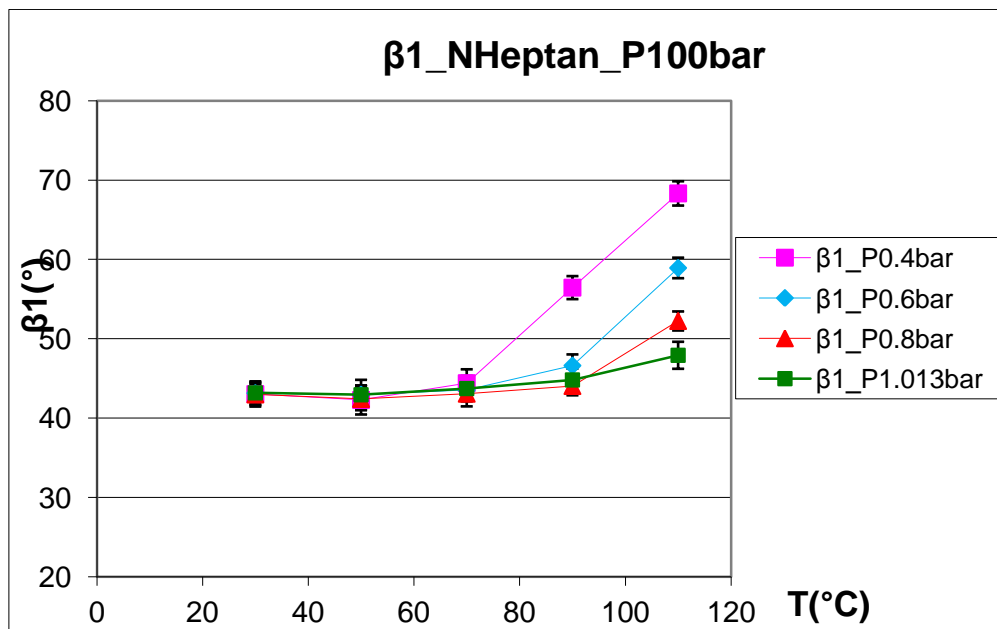


Figura 4.27: grafico β_1 -T per il Normal-eptano a pressione di iniezione pari a 100 bar

Analizzando i due grafici per il n-eptano, si osserva che l'andamento del β_1 è costante per tutte le condizioni operative e di iniezione fino al valore di 70°C; emerge inoltre che il valore di β_1 è maggiore nella condizione di 50 bar. Osservando tutti i grafici finora rappresentati, possiamo notare inoltre come la pressione di iniezione influisca poco sull'angolo di cono.

4.3- Andamento e confronto dell'angolo di cono β_1 nei vari combustibili

Vengono riportati di seguito i grafici che permettono di confrontare il β_1 in funzione della temperatura a parità di pressione di iniezione per i combustibili analizzati.

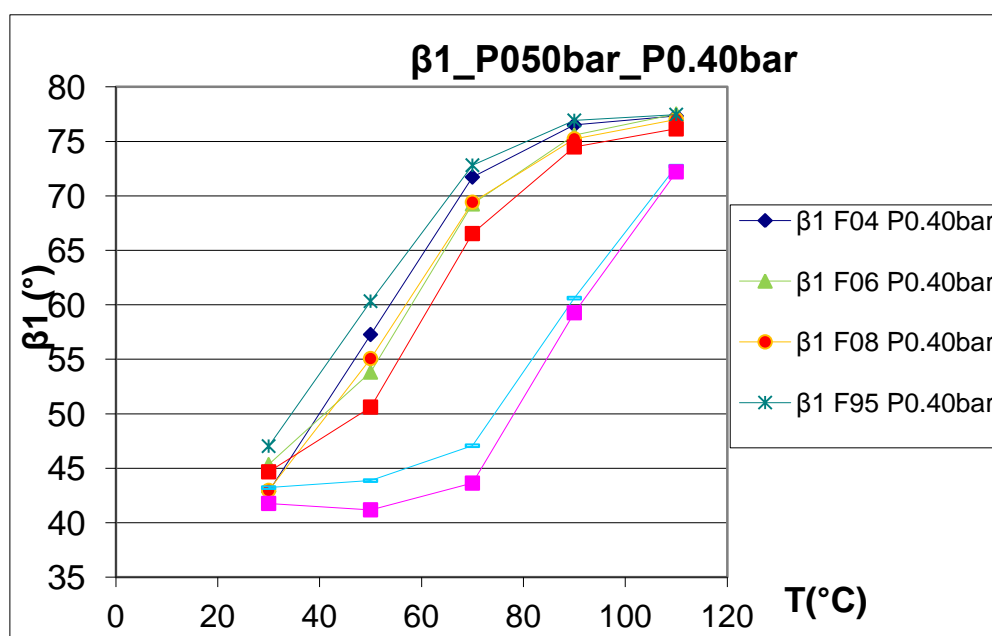


Figura 4.28: grafico confronto β_1 -T a pressione operativa 0.40 bar e pressione di iniezione a 50 bar

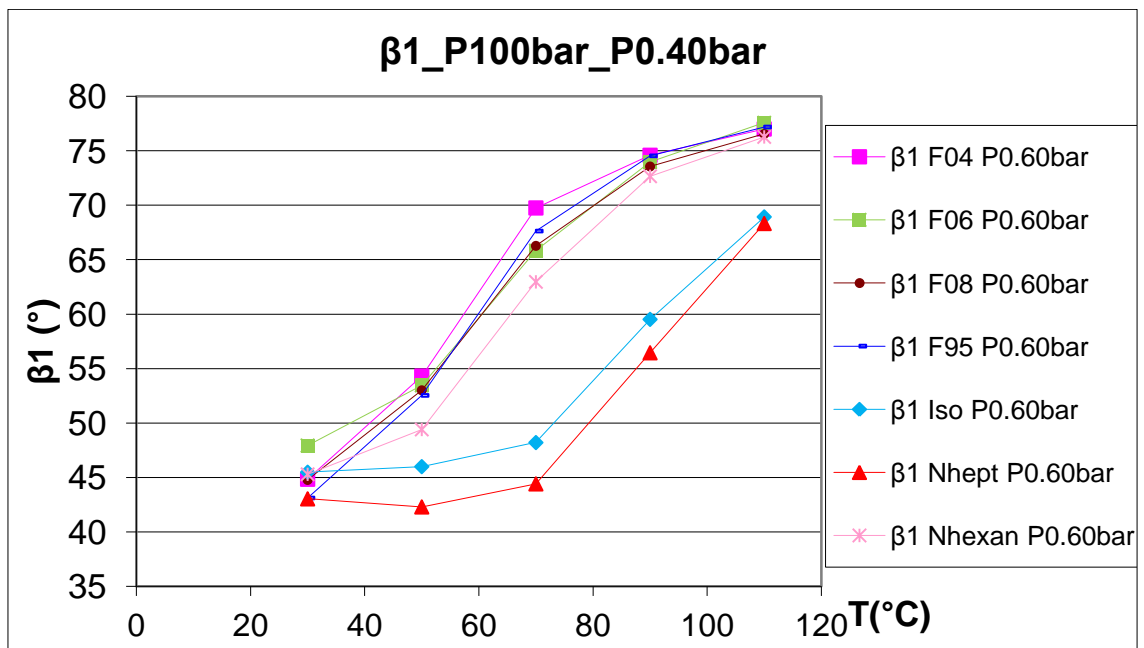


Figura 4.29: grafico confronto β_1 -T a pressione operativa 0.40 bar e pressione di iniezione a 100 bar

Emerge osservando questi due primi grafici come l'isooctano e l'eptano abbiano un comportamento diverso rispetto agli altri combustibili, in quanto puri. In realtà l'esano, pur essendo una sostanza pura, ha un comportamento simile alle benzine.

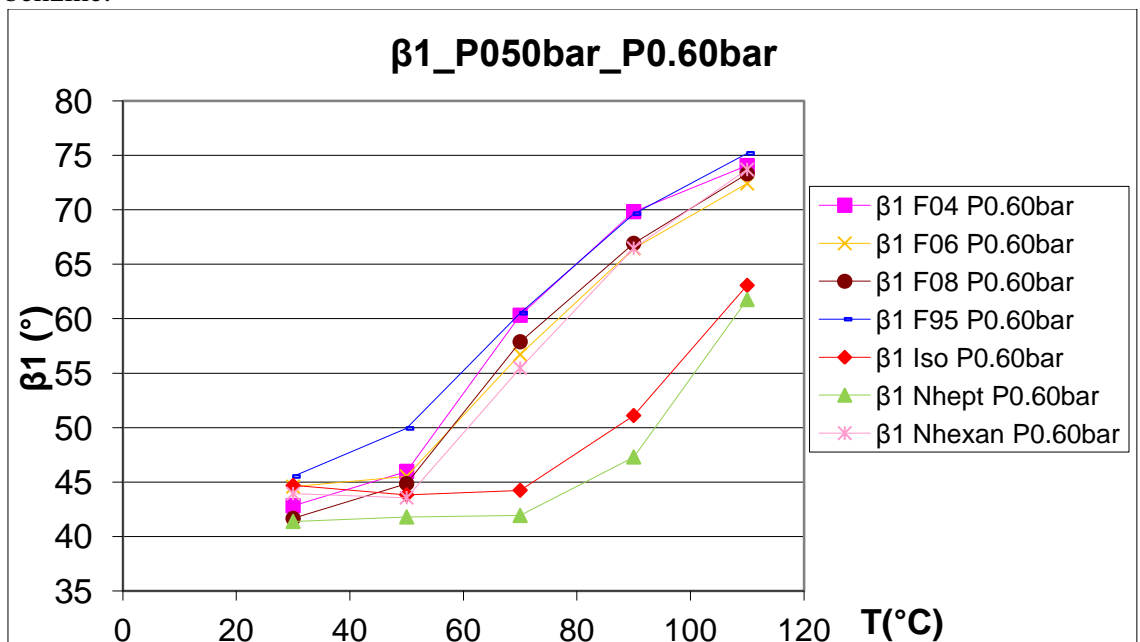


Figura 4.30: grafico confronto β_1 -T a pressione operativa 0.60 bar e pressione di iniezione a 50 bar

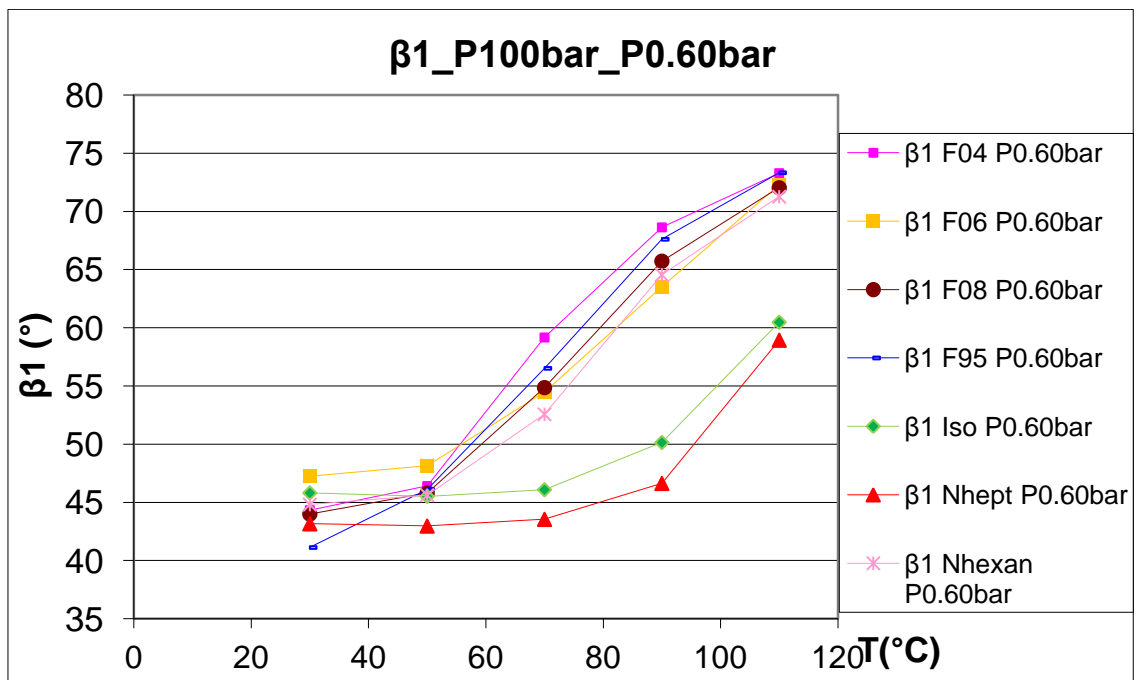


Figura 4.31: grafico confronto β_1 -T a pressione operativa 0.60 bar e pressione di iniezione a 100 bar

Alla pressione operativa di 0.60 bar si osserva lo stesso fenomeno già precedentemente evidenziato alla pressione di 0.40 bar, l'isooctano e il n-eptano hanno un diverso andamento rispetto a tutti gli altri combustibili ed il n-esano si comporta come le benzine.

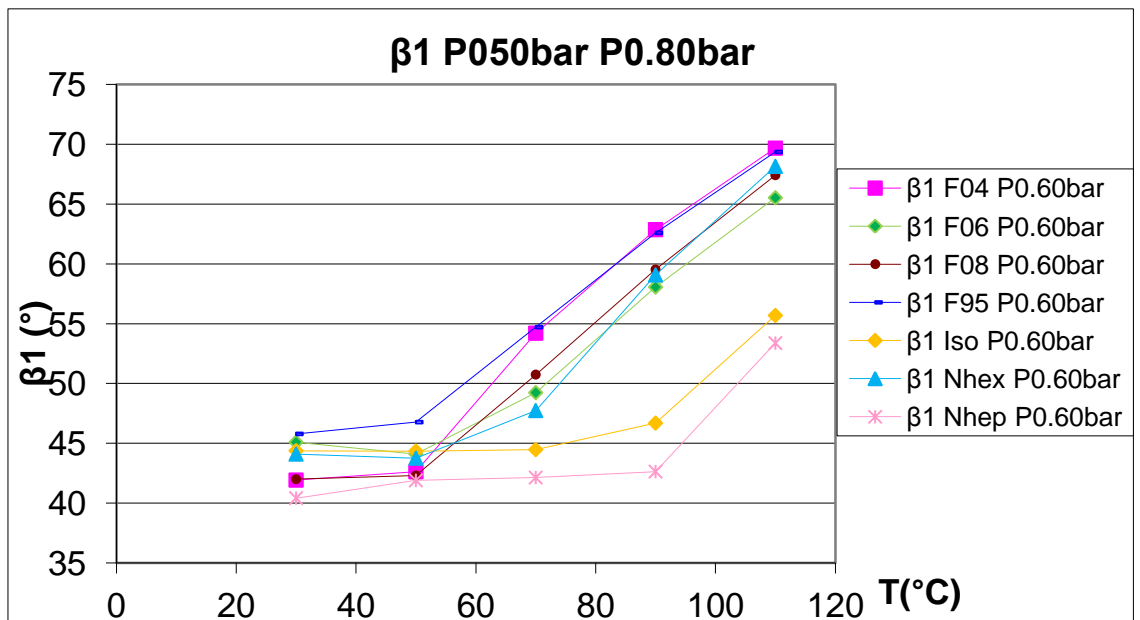


Figura 4.32: grafico confronto β_1 -T a pressione operativa 0.80 bar e pressione di iniezione a 50 bar

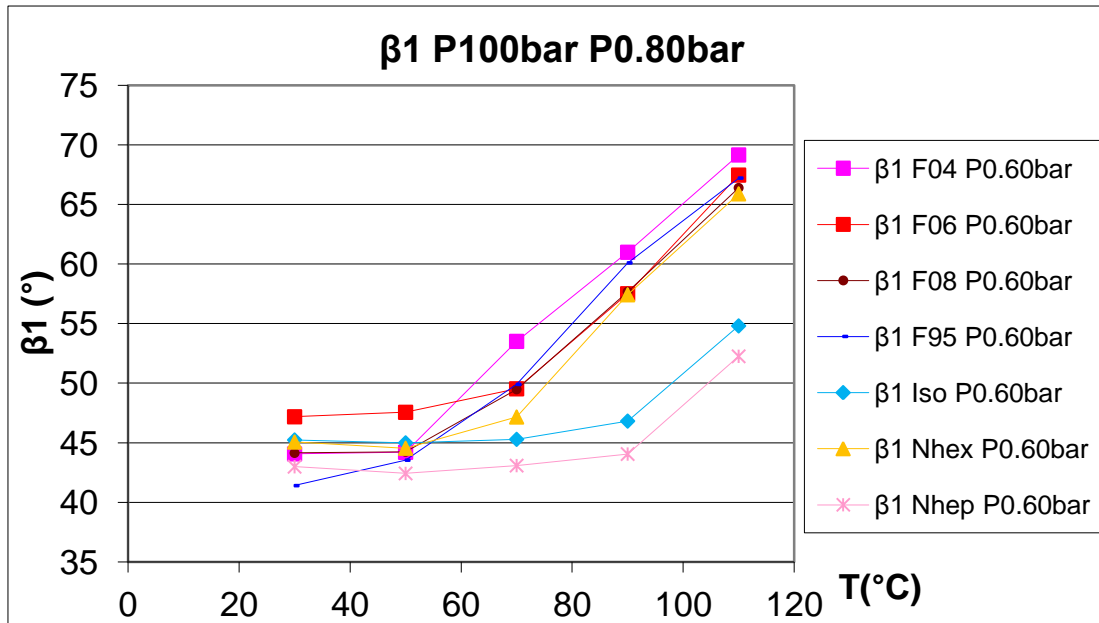


Figura 4.33: grafico confronto β_1 -T a pressione operativa 0.80 bar e pressione di iniezione a 100 bar

Emerge osservando i grafici a pressione operativa di 0.80 bar come i valori del β_1 siano di poco maggiori nel caso di 50 bar per ogni valore di temperatura rispetto ad una pressione di iniezione pari a 100 bar.

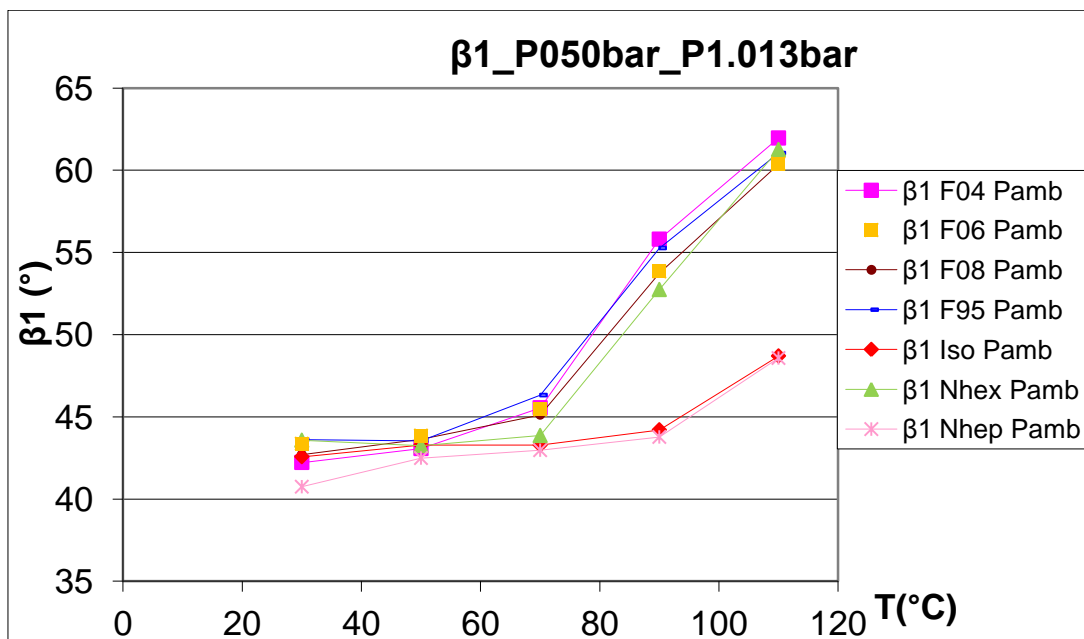


Figura 4.34: grafico confronto β_1 -T a pressione operativa 1.0130 bar e pressione di iniezione a 50 bar

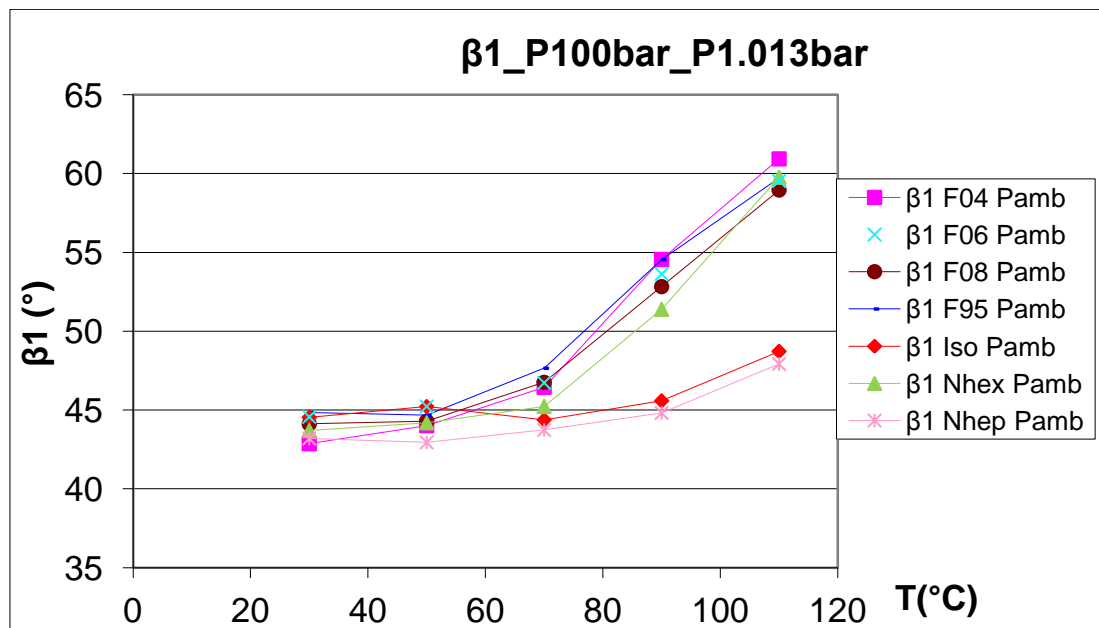


Figura 4.35: grafico confronto β_1 -T a pressione operativa 1.013 bar e pressione di iniezione a 100 bar

Anche in questo caso i valori del β_1 sono maggiori, anche se di pochi gradi, nel caso di una pressione di iniezione pari a 50bar rispetto ai 100bar. Si osserva inoltre che le curve ottenute per i diversi combustibili sono molto più vicine nel caso dei 50 bar.

4.4- Andamento dell'angolo di cono β_2 per le diverse pressioni a parità di combustibile

Nei grafici seguenti vengono illustrati i risultati di laboratorio riguardanti l'angolo di cono β_2 , misurato nell'intervallo 5-30 mm dalla punta dell'iniettore, in relazione alla temperatura per ogni carburante testato a parità di pressione di iniezione e di pressione operativa. Le immagini relative alla condizione operativa di 1.013 bar sono state fornite da Alexandre Trouche. [10]

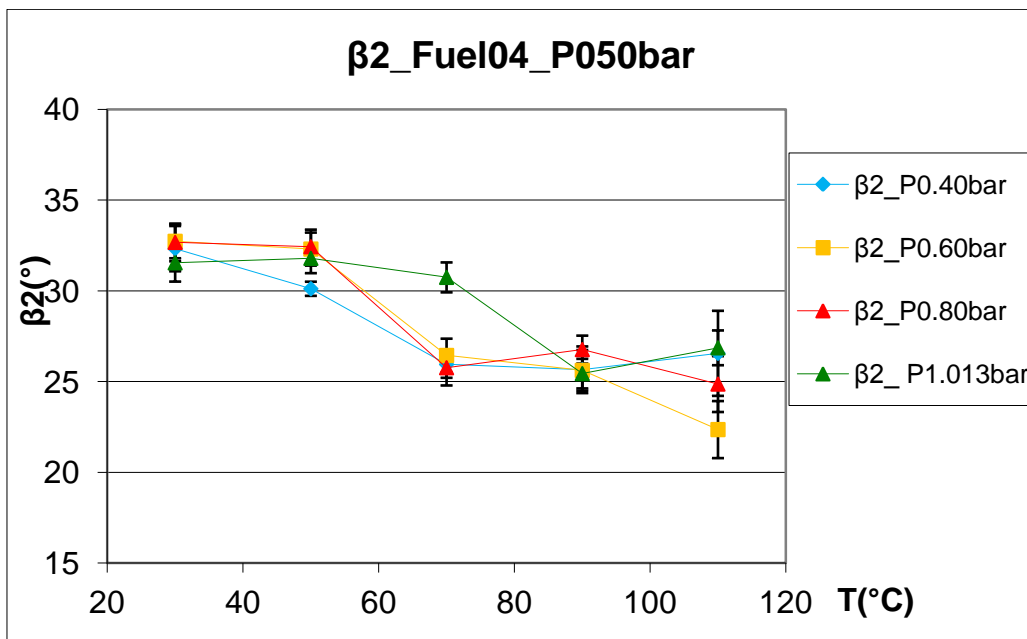


Figura 4.36: grafico β_2 -T per il Fuel04 a pressione di iniezione pari a 50 bar

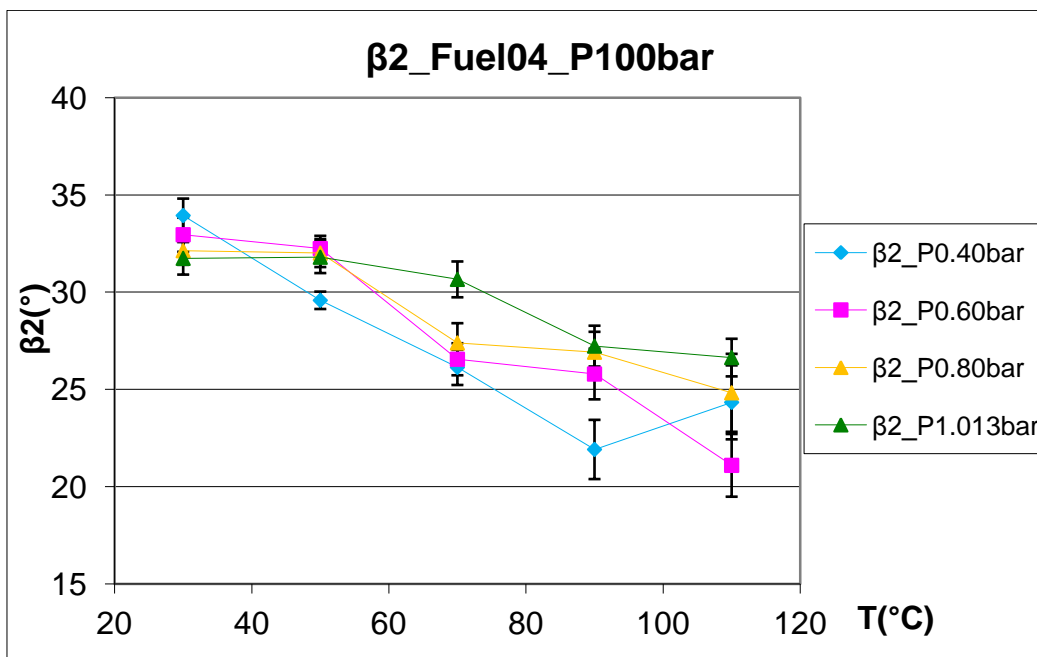


Figura 4.37: grafico β_2 -T per il Fuel04 a pressione di iniezione pari a 100 bar

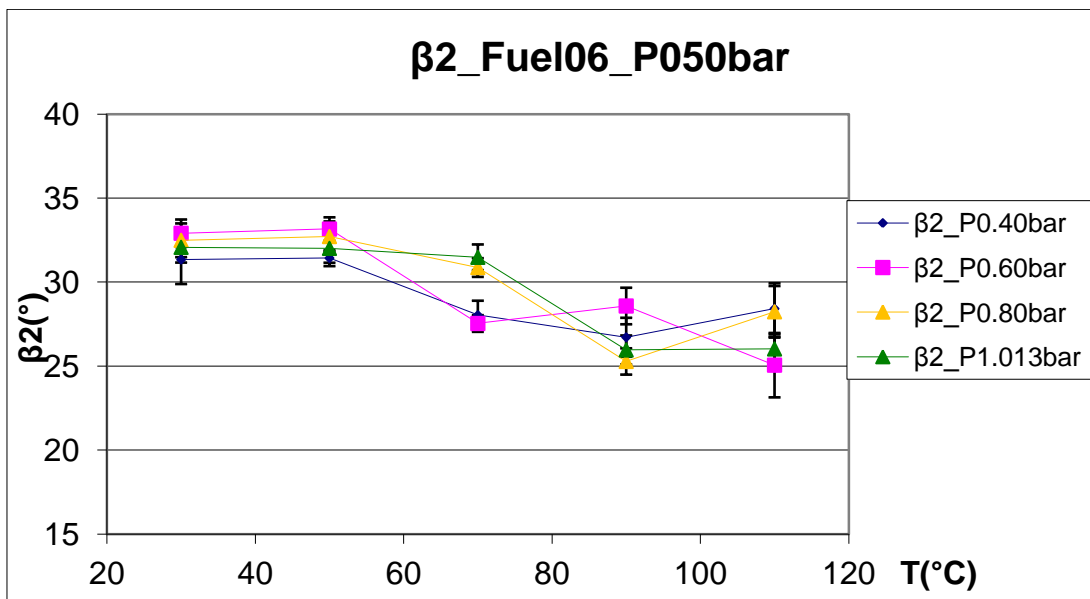


Figura 4.38: grafico β₂-T per il Fuel06 a pressione di iniezione pari a 50 bar

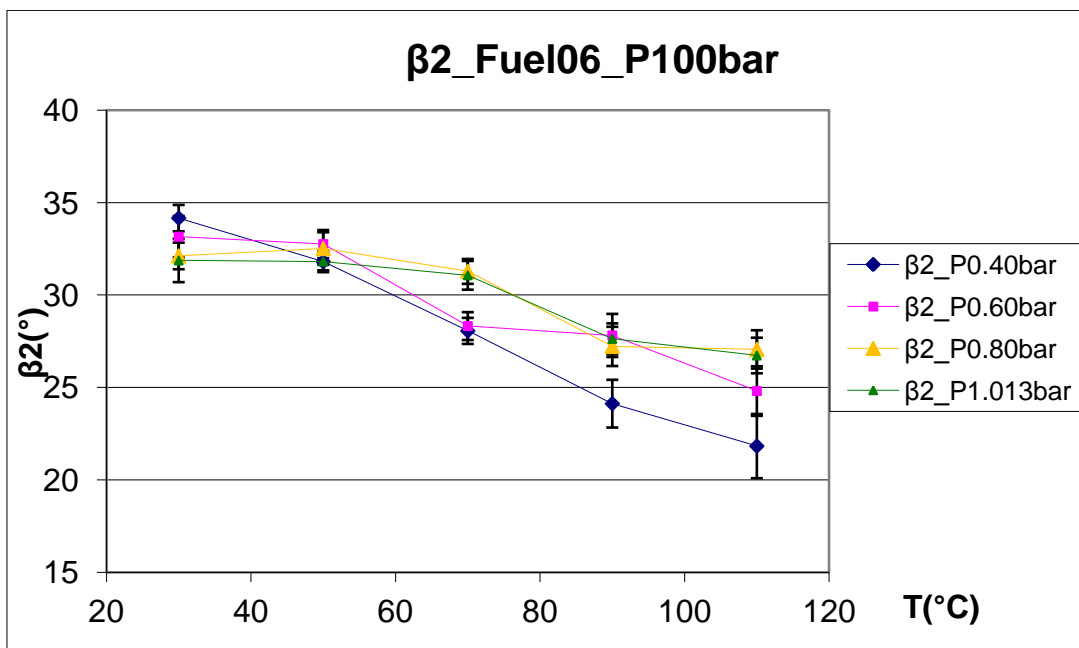


Figura 4.40: grafico β₂-T per il Fuel06 a pressione di iniezione pari a 100 bar

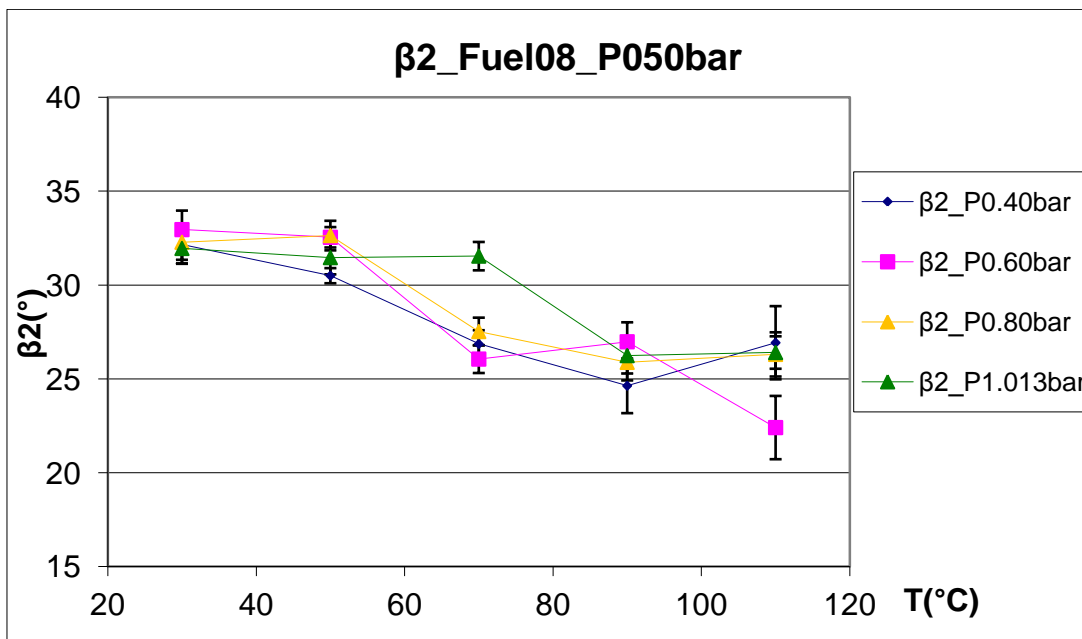


Figura 4.41: grafico β_2 -T per il Fuel08 a pressione di iniezione pari a 50 bar

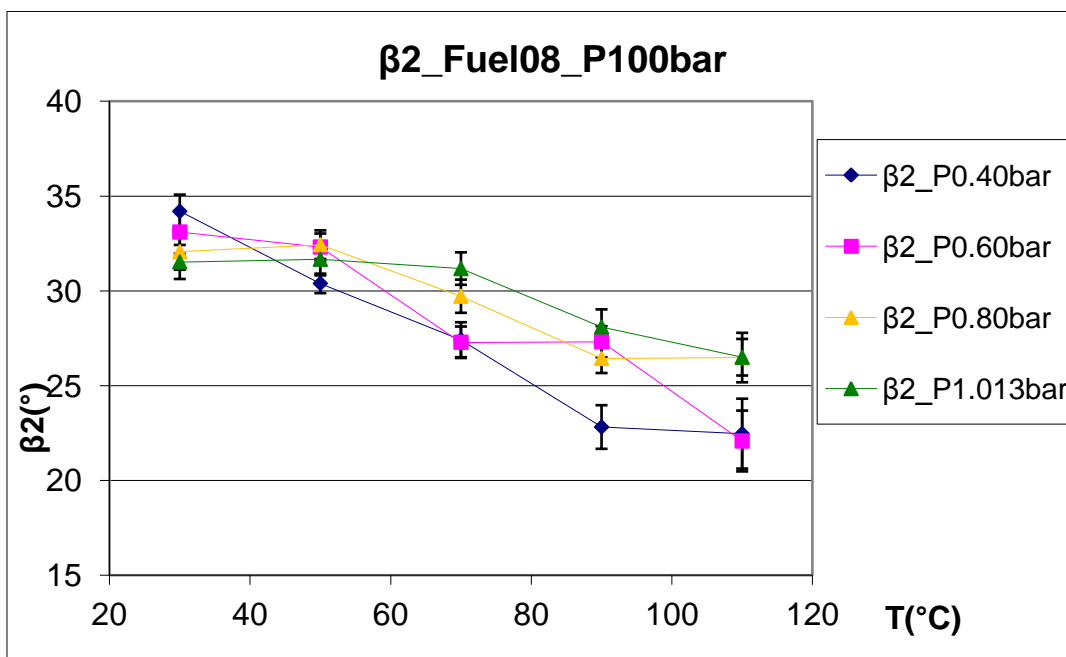


Figura 4.42: grafico β_2 -T per il Fuel08 a pressione di iniezione pari a 100 bar

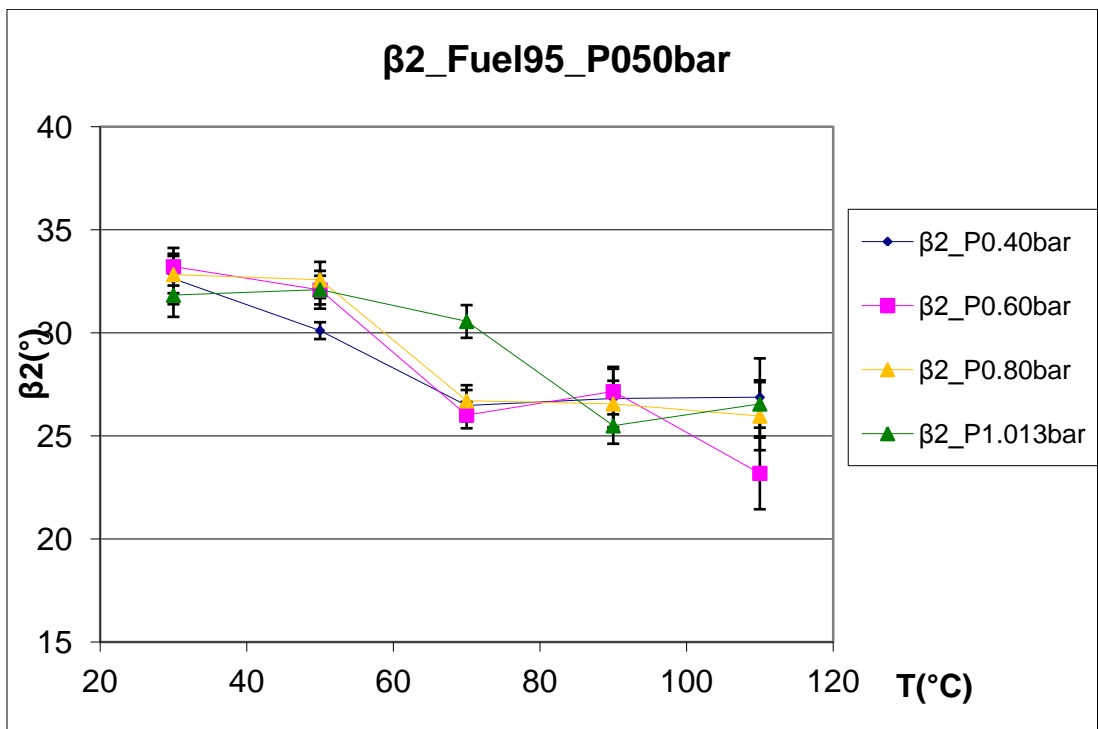


Figura 4.43: grafico β₂-T per il Fuel95 a pressione di iniezione pari a 50 bar

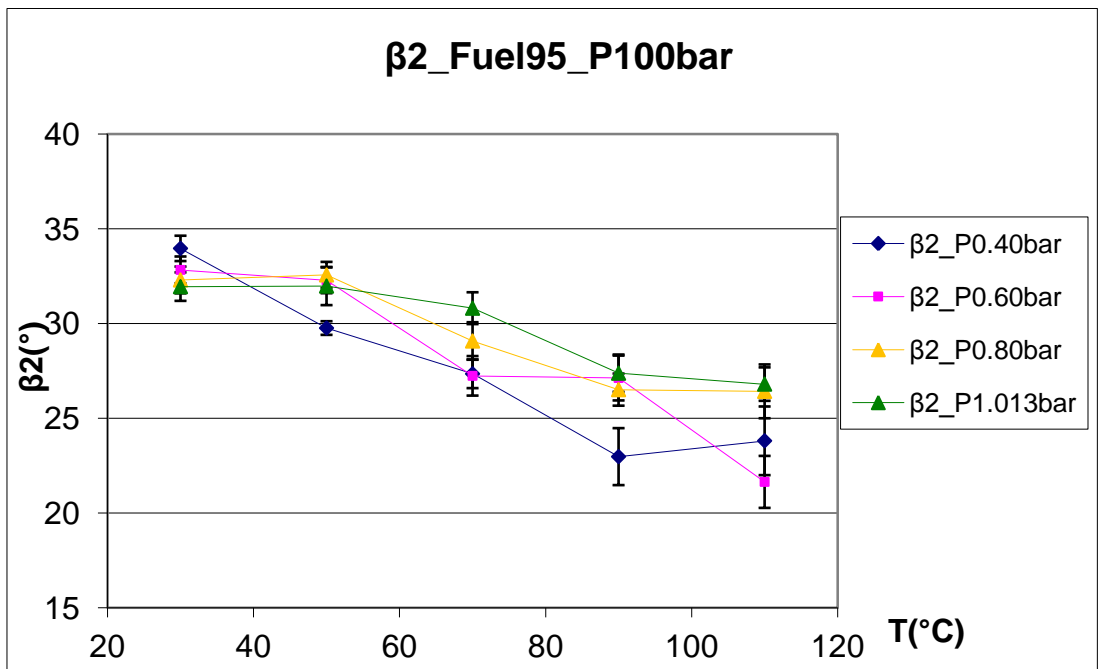


Figura 4.44: grafico β₂-T per il Fuel95 a pressione di iniezione pari a 100 bar

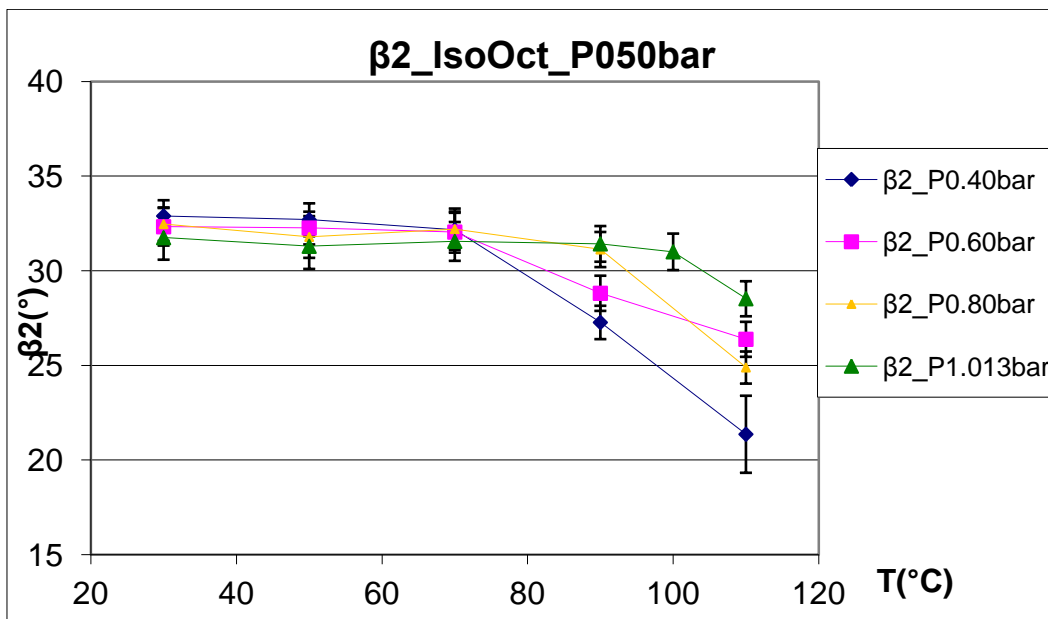


Figura 4.45: grafico β_2 -T per l'Isoottano a pressione di iniezione pari a 50 bar

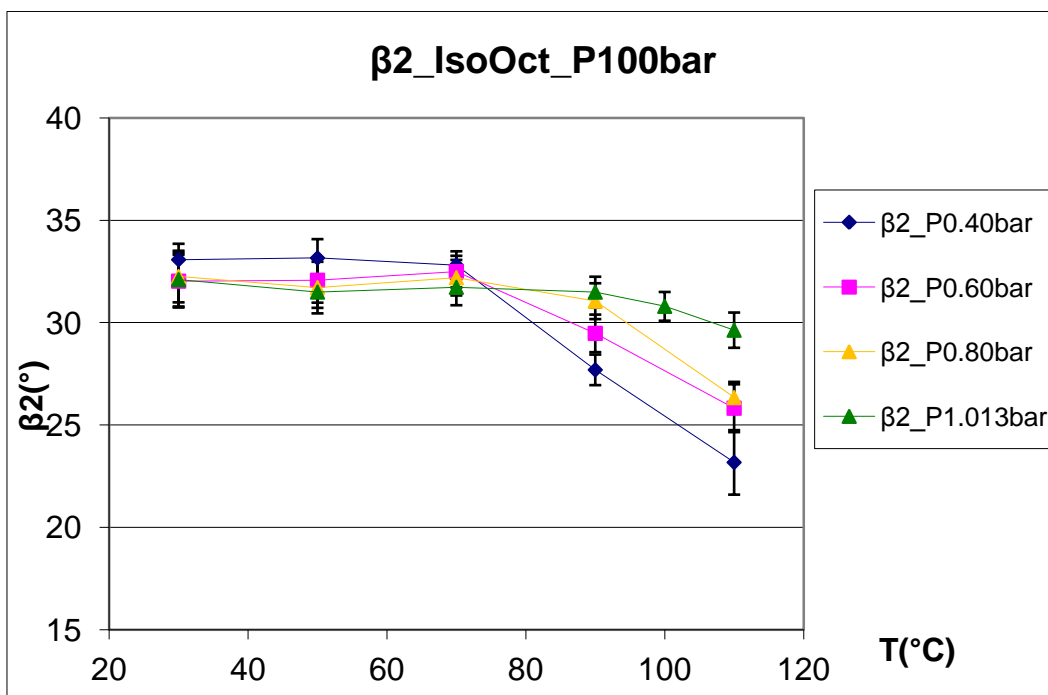


Figura 4.46: grafico β_2 -T per l'Isoottano a pressione di iniezione pari a 100 bar

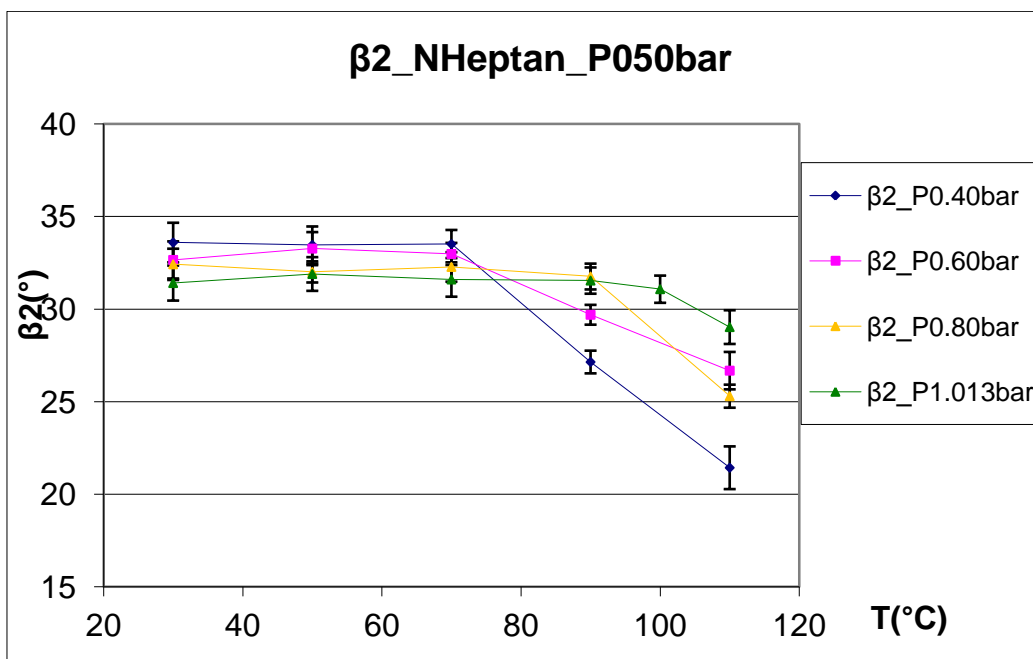


Figura 4.47: grafico β_2 -T per Normal-eptano a pressione di iniezione pari a 50 bar

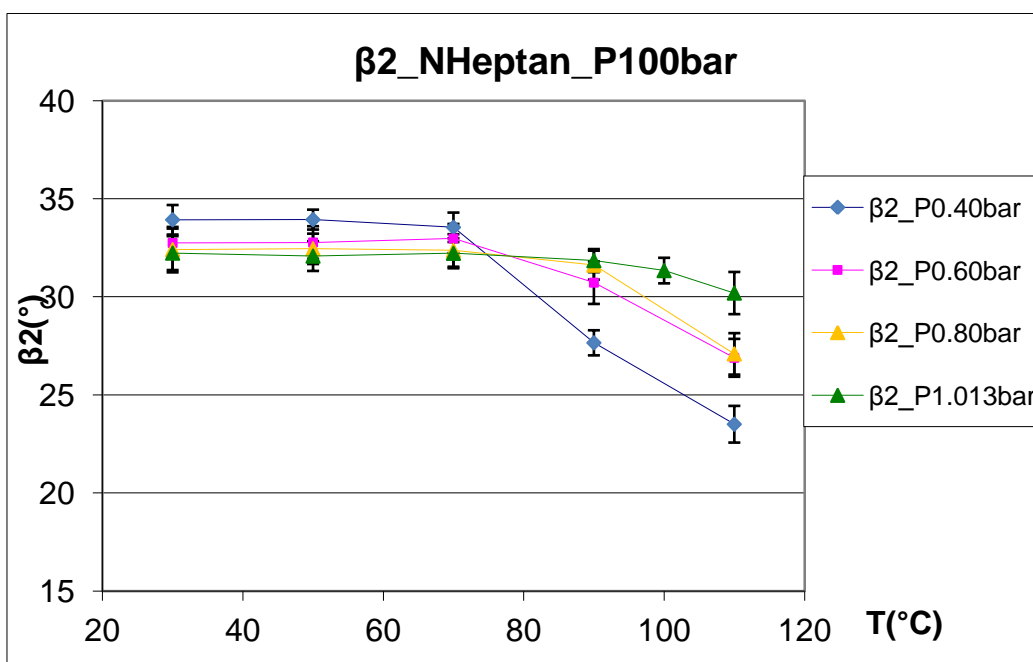


Figura 4.48: grafico β_2 -T per il Normal-eptano a pressione di iniezione pari a 100 bar

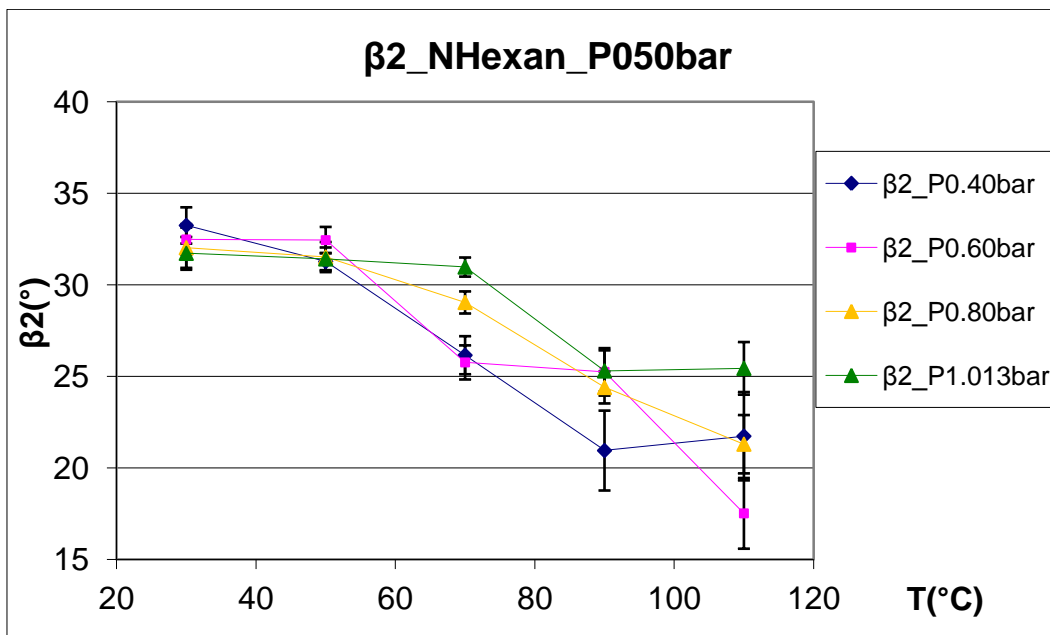


Figura 4.49: grafico β_2 -T per il Normal-esano a pressione di iniezione pari a 50 bar

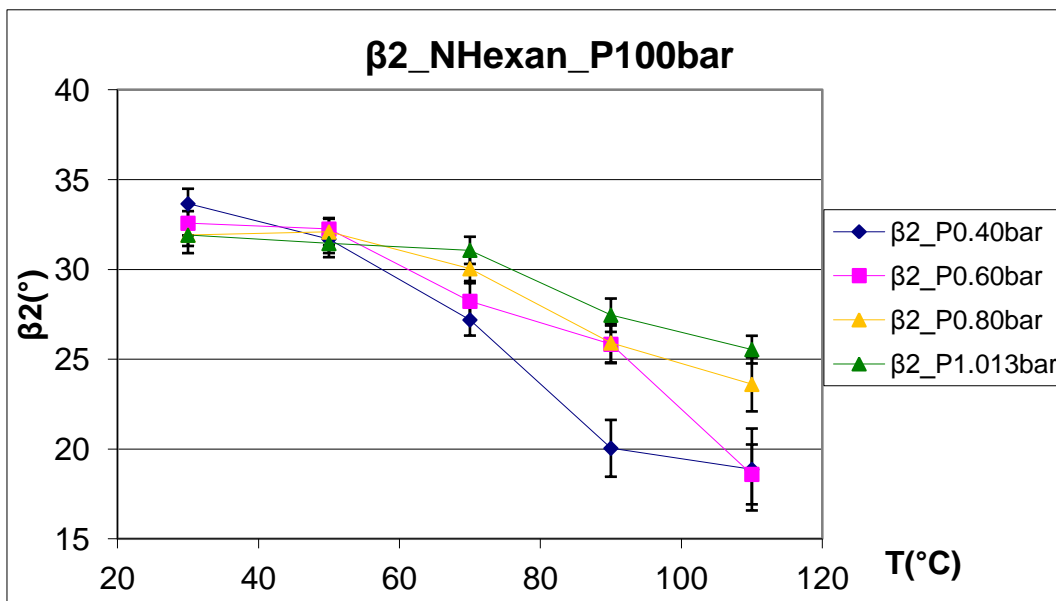


Figura 4.50: grafico β_2 -T per il Normal-esano a pressione di iniezione pari a 100 bar

Osservando i grafici β_2 in funzione della temperatura per i combustibili multicomponente emerge che tra i 50°C e i 90°C, e più precisamente intorno ai 70°C, vi sia una netta diminuzione dell'angolo β_2 . Analizzando i grafici 4.45, 4.46, 4.47, 4.48 relativi all'isooctano e al n-eptano alla pressione di 50 e 100 bar si nota che l'andamento dell'angolo è costante fino alla temperatura di 70°C e successivamente a seconda delle diverse pressioni

operative decresce con pendenza diversa. Osservando i grafici 4.49 e 4.50, emerge che l'andamento dell'angolo è costante fino alle temperatura di 50°C e in seguito decresce, il comportamento di questo combustibile è del tutto simile a quello delle normali benzine. Sostanzialmente possiamo notare come l'angolo β_2 tenda a diminuire quando vi è evaporazione.

4.5- Andamento e confronto dell'angolo di cono β_2 nei vari combustibili

Vengono riportati di seguito i grafici che permettono di confrontare il β_2 in funzione della temperatura a parità di pressione di iniezione per i combustibili analizzati.

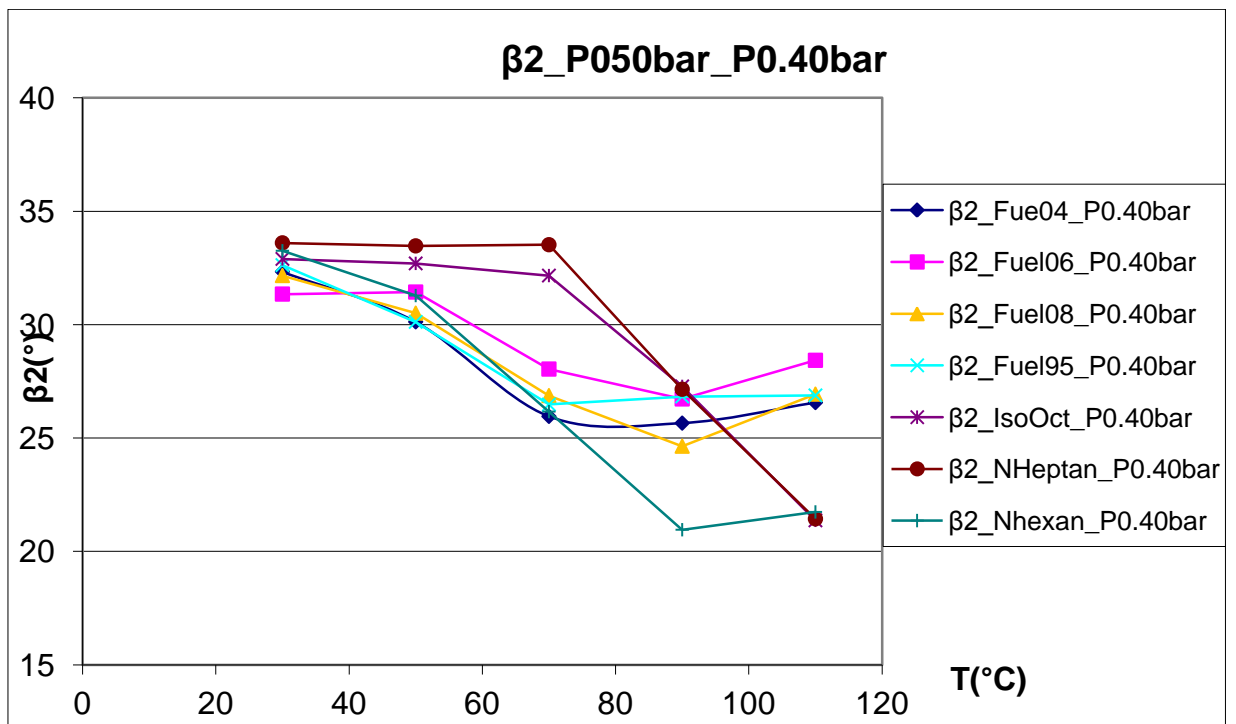


Figura 4.51: grafico confronto β_2 -T a pressione operativa 0.40 bar e pressione di iniezione a 50 bar

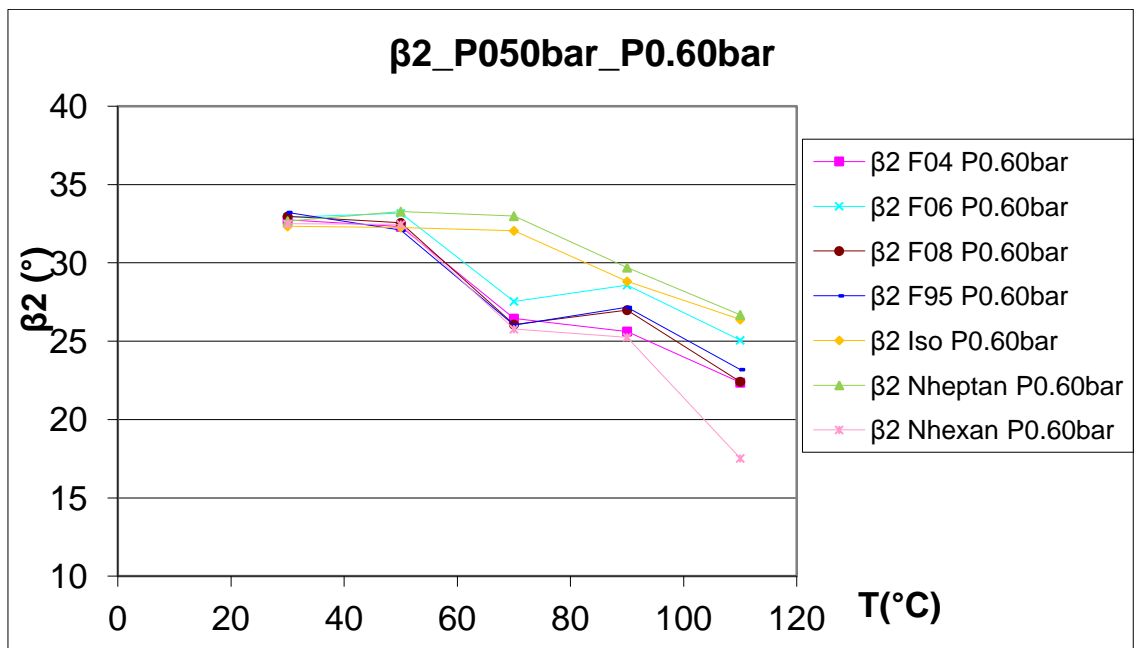


Figura 4.52: grafico confronto β_2 -T a pressione operativa 0.60 bar e pressione di iniezione a 50 bar

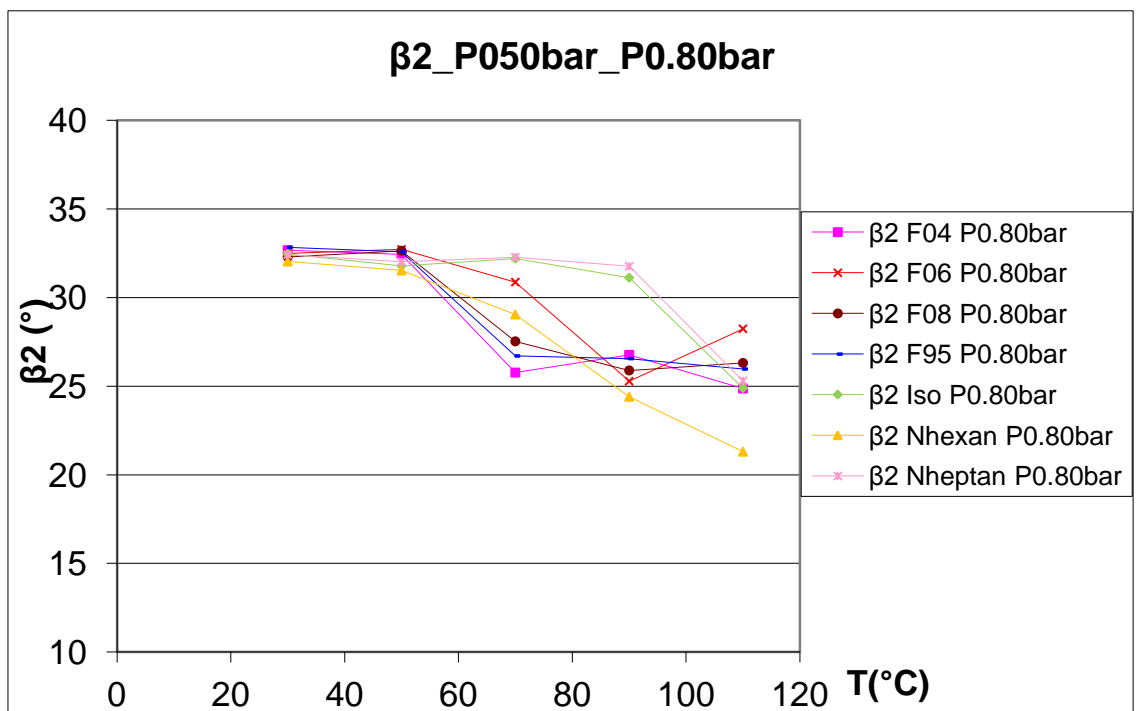


Figura 4.53: grafico confronto β_2 -T a pressione operativa 0.80 bar e pressione di iniezione a 50 bar

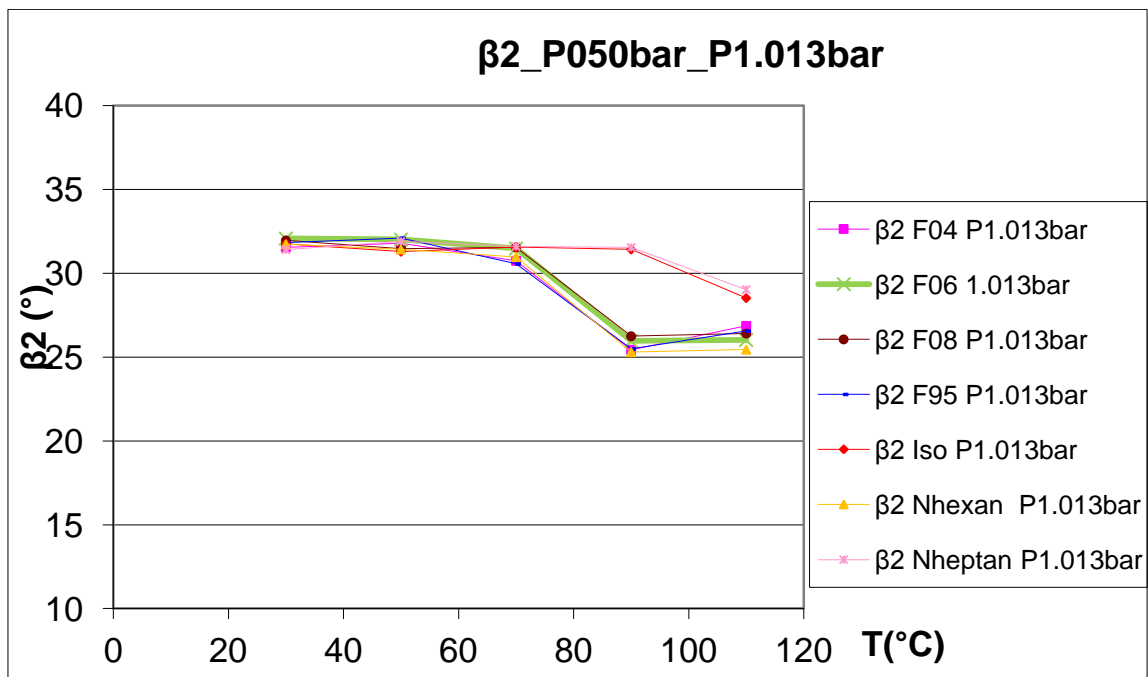


Figura 4.54: grafico confronto β_2 -T a pressione operativa 1.013 bar e pressione di iniezione a 50 bar

Osservando i grafici riguardanti il β_2 alla pressione di iniezione a 50 bar, emerge che alla pressione operativa di 0.40 bar il n-eptano e l'isoottano hanno un comportamento differente rispetto alle benzine e il loro β_2 decresce a partire dai 70°C; il n-esano, invece, ha un andamento analogo alle benzine ma a partire dai 70°C il suo β_2 decresce fortemente. Analizzando il grafico relativo alla pressione di 0.60 bar si osserva ancora una volta che il n-eptano e l'isoottano hanno andamenti diversi rispetto a quelli di tutti gli altri combustibili. Il n-esano invece ha un andamento del tutto simile a questi ultimi e presenta inoltre il valore più basso di β_2 ai 110°C. Alla pressione 0.80bar, si osservano tutti i fenomeni visti per la pressione di 0.60 bar.

Analizzando e confrontando i grafici 4.51, 4.52, 4.53, si evidenzia inoltre che la curva del Fuel 06 risulta superiore a quella delle altre benzine in tutte e tre le condizioni operative; mentre la curva del Fuel 04 risulta inferiore e quella del Fuel95 è intermedia. I valori del β_2 al variare della pressione operativa a parità di temperatura sono simili tra loro.

Il grafico relativo all'angolo β_2 -T mostra un andamento simile nelle benzine e nel n-esano, mentre il comportamento dei due idrocarburi puri, l'isoottano ed il n-eptano, si differenzia da quelle precedenti.

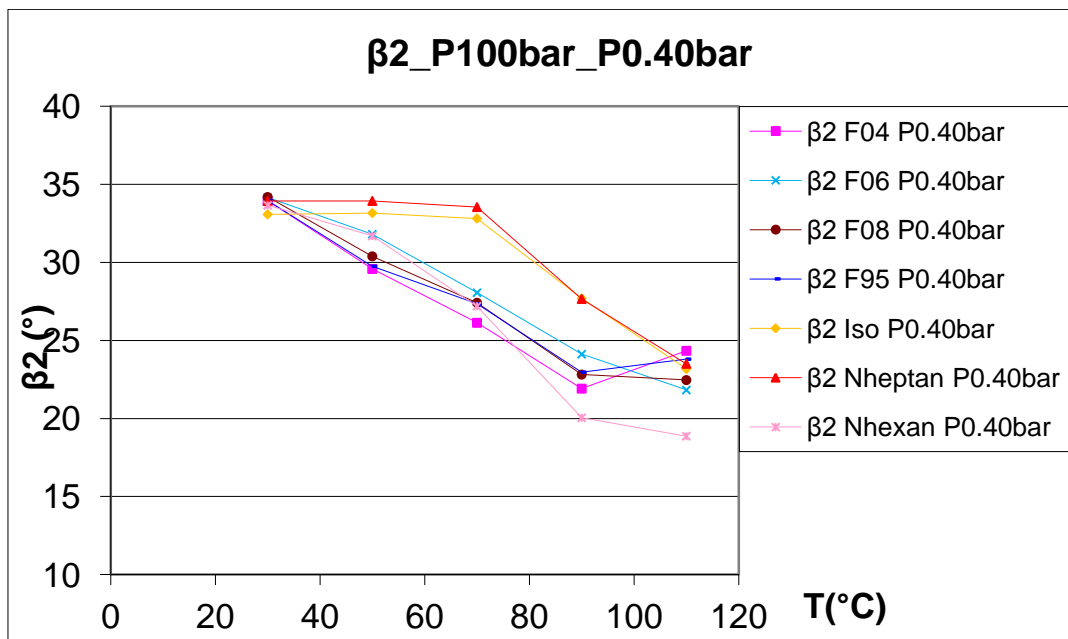


Figura 4.55: grafico confronto β_2 -T a pressione operativa 0.40 bar e pressione di iniezione a 100 bar

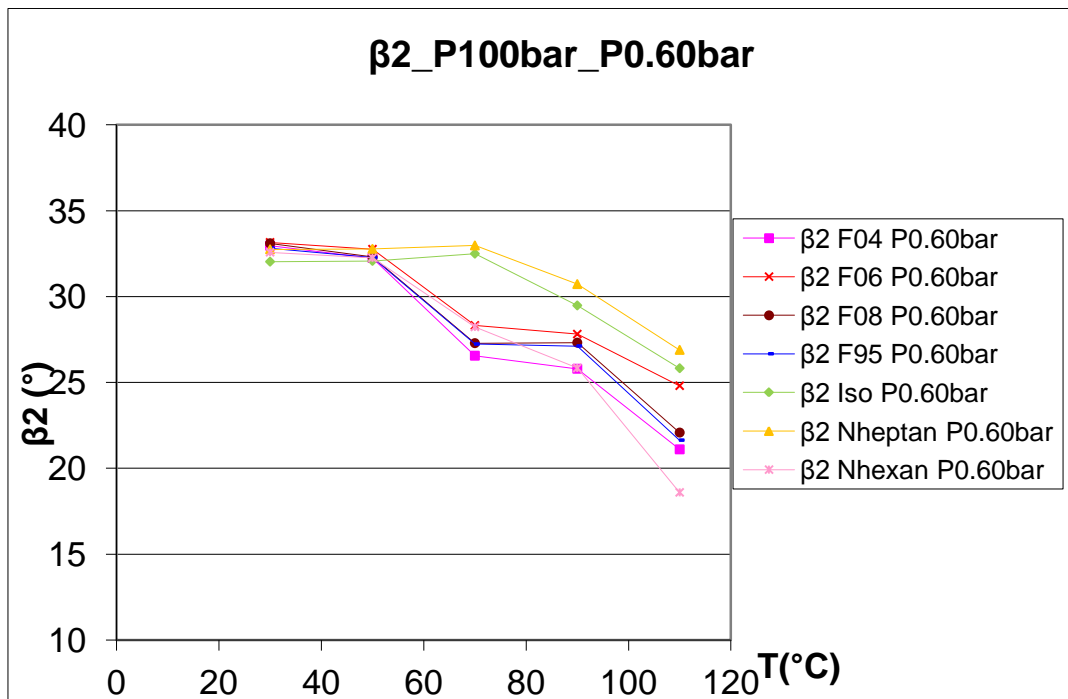


Figura 4.56: grafico confronto β_2 -T a pressione operativa 0.60 bar e pressione di iniezione a 100 bar

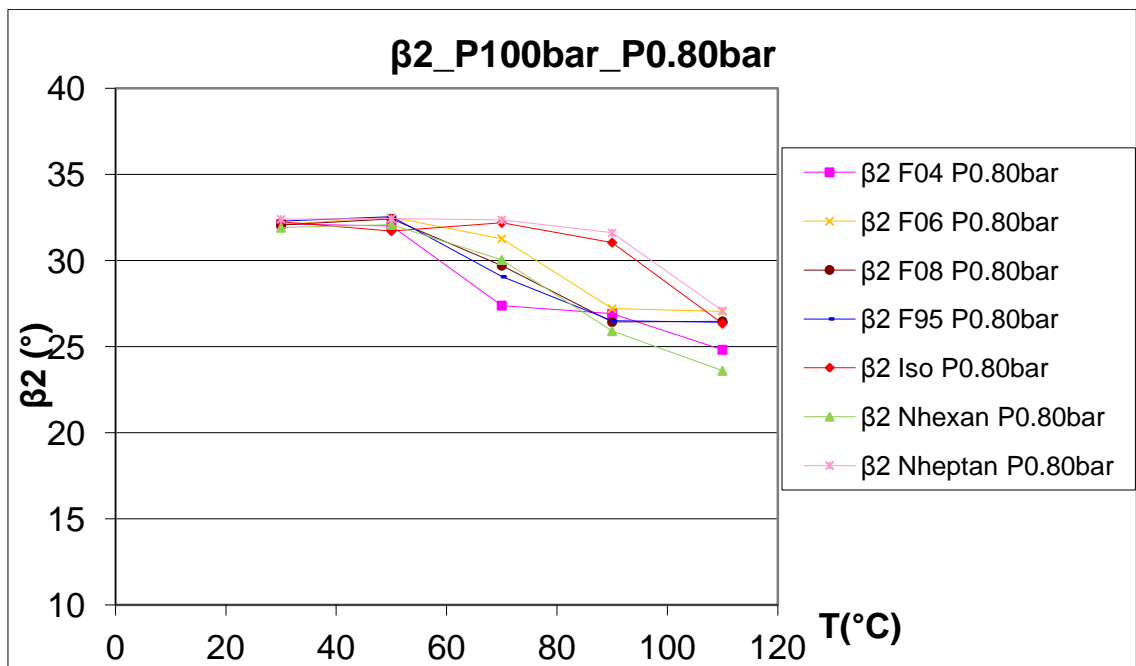


Figura 4.57: grafico confronto β_2 -T a pressione operativa 0.80 bar e pressione di iniezione a 100 bar

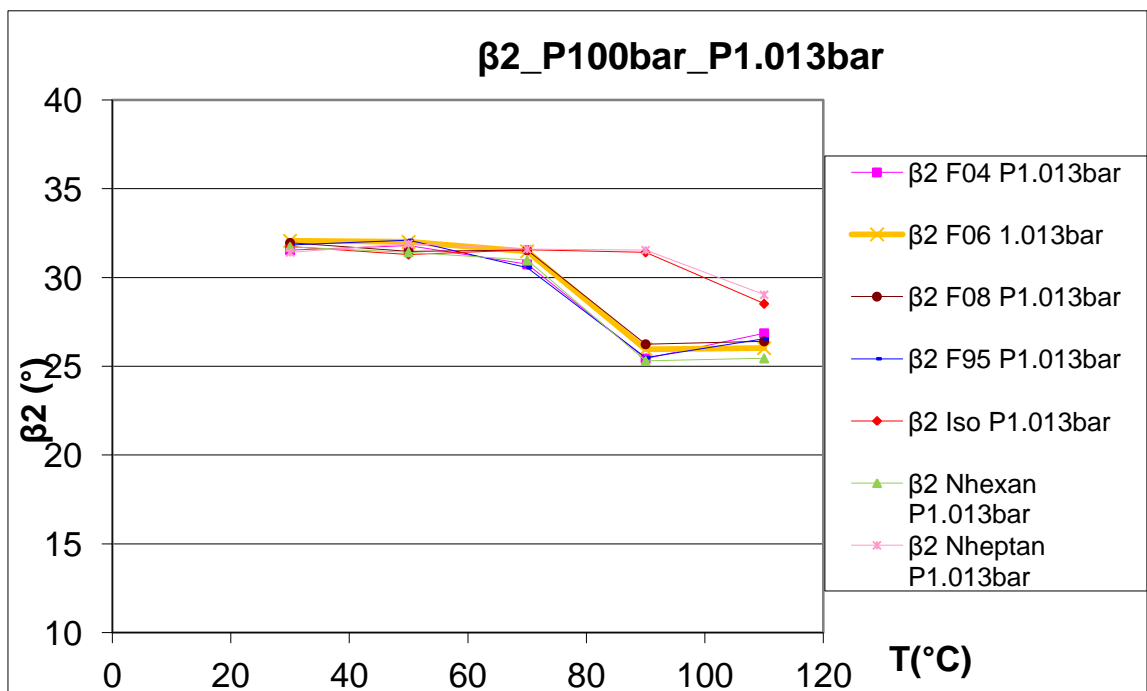


Figura 4.58: grafico confronto β_2 -T a pressione operativa 1.013 bar e pressione di iniezione a 100 bar
 Analizzando i grafici alla pressione di iniezione pari a 100bar si osservano tutti gli stessi fenomeni già evidenziati alla pressione di 50 bar.

Capitolo 5

Analisi dei risultati

I dati sperimentali ricavati dalle prove di laboratorio sono stati analizzati per comprendere quali sono le grandezze che influiscono sull'apertura dell'angolo di cono dello spray. Per tutti i combustibili utilizzati si è osservato che l'angolo β_1 , a parità di pressione in camera, tende ad aumentare quando la temperatura supera un certo valore. Si è inoltre notato che questo valore soglia della temperatura si riduce al diminuire della pressione in camera. È immediato associare questo comportamento ad un fenomeno di Flash boiling e quindi all'andamento della pressione di saturazione del combustibile in funzione della temperatura. Si è pensato perciò che il valore limite di temperatura per il quale si osserva l'aumento dell'angolo fosse collegato alla pressione in camera attraverso il valore di pressione di saturazione corrispondente a quella temperatura. Siamo perciò partiti con lo studio dei combustibili puri, in quanto sono disponibili in letteratura le caratteristiche chimiche e le curve di saturazione, per trarre delle informazioni e delle relazioni fisico-chimiche per le benzine commerciali.

5.1- Curva di saturazione per i combustibili puri

Vengono rappresentate di seguito le curve di saturazione dei combustibili puri a pressione ambiente, ottenute utilizzando i dati forniti dal NIST. [11]

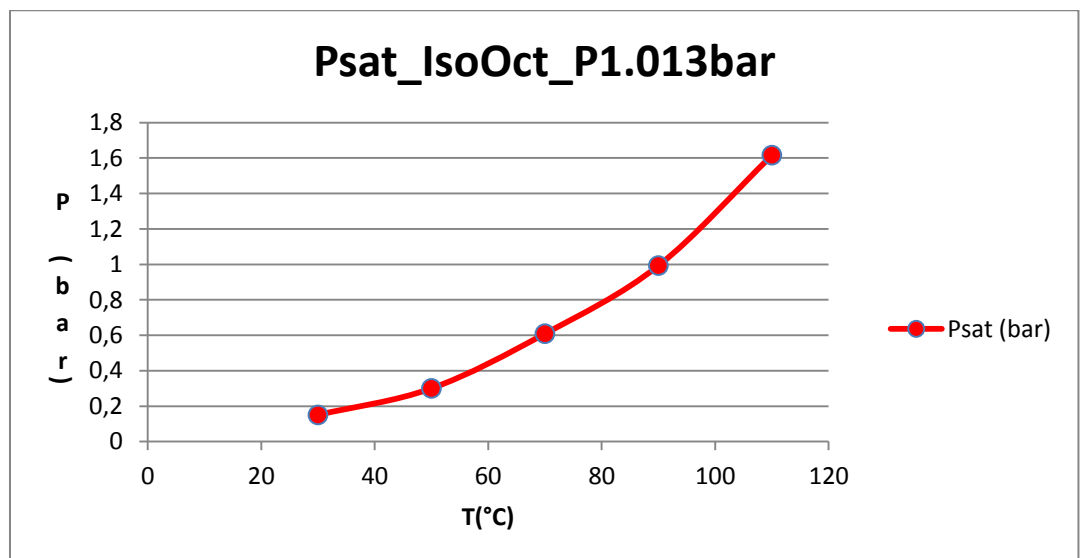


Figura 5.1: curva di saturazione Isoottano

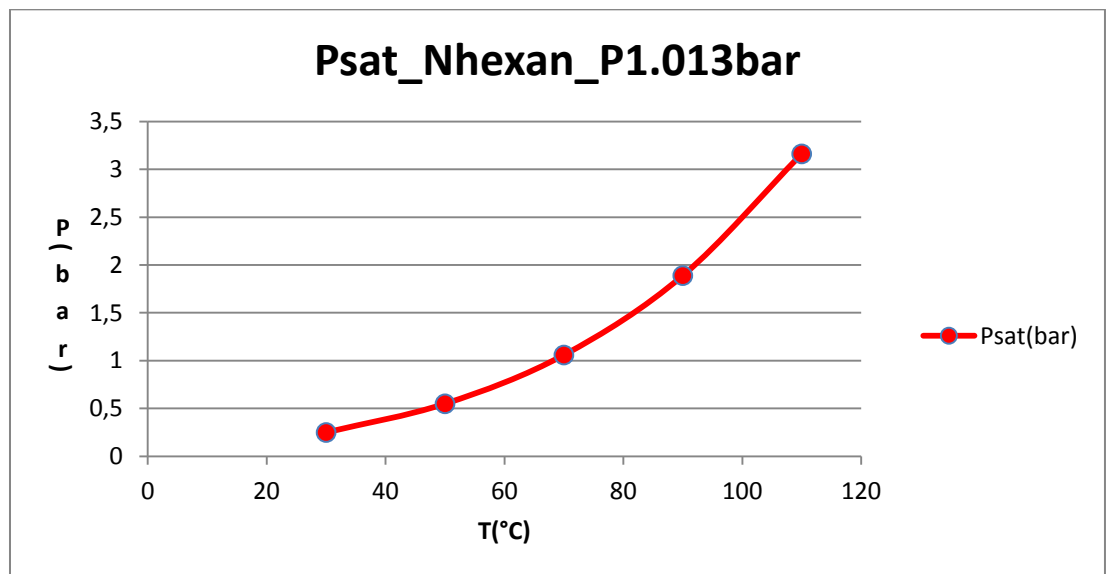


Figura 5.2: curva di saturazione N-esano

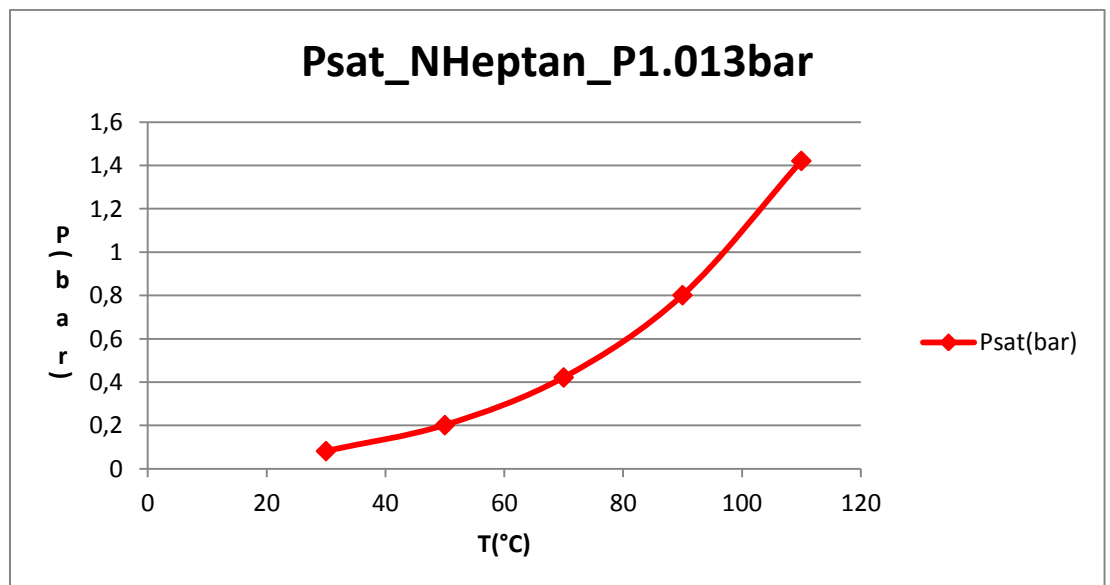


Figura 5.3: curva di saturazione N-eptano

5.2- Andamento β_1 in relazione al rapporto della pressione di saturazione e della pressione operativa per le sostanze pure

Sono stati realizzati inoltre i grafici che mettono in evidenza la relazione tra l'angolo di cono β_1 e il rapporto della pressione di saturazione su quella operativa. [16]

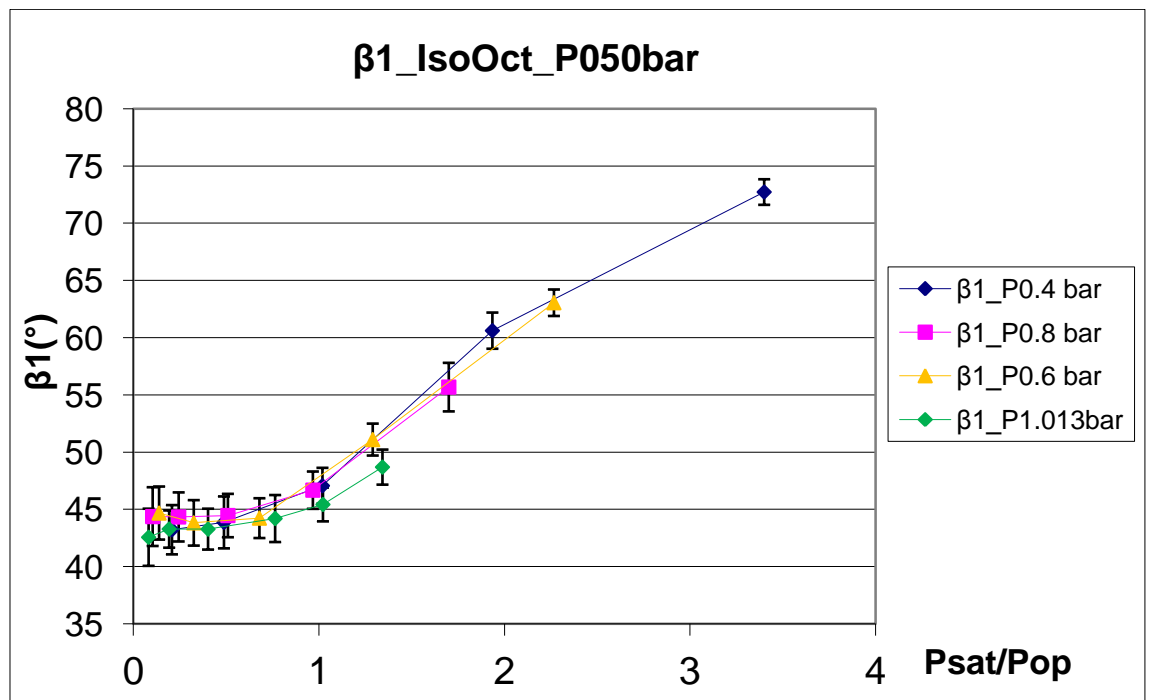


Figura 5.4: grafico β_1 -Psat/Pop per l'Isoottano a pressione di iniezione pari a 50 bar

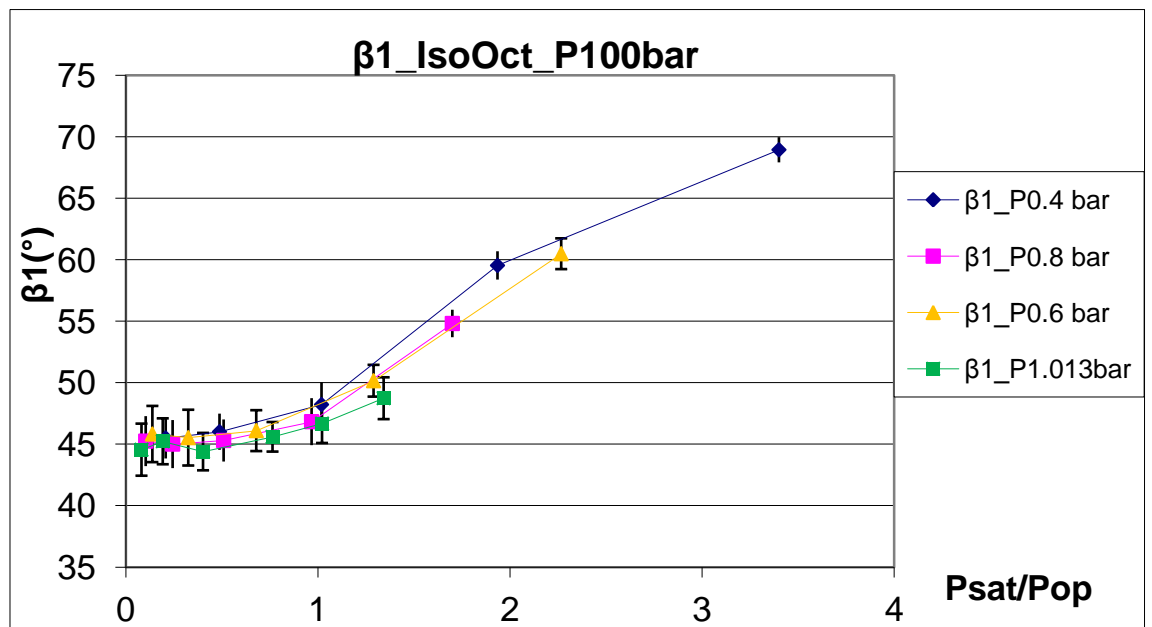


Figura 5.5: grafico β_1 -Psat/Pop per l'Isoottano a pressione di iniezione pari a 100 bar

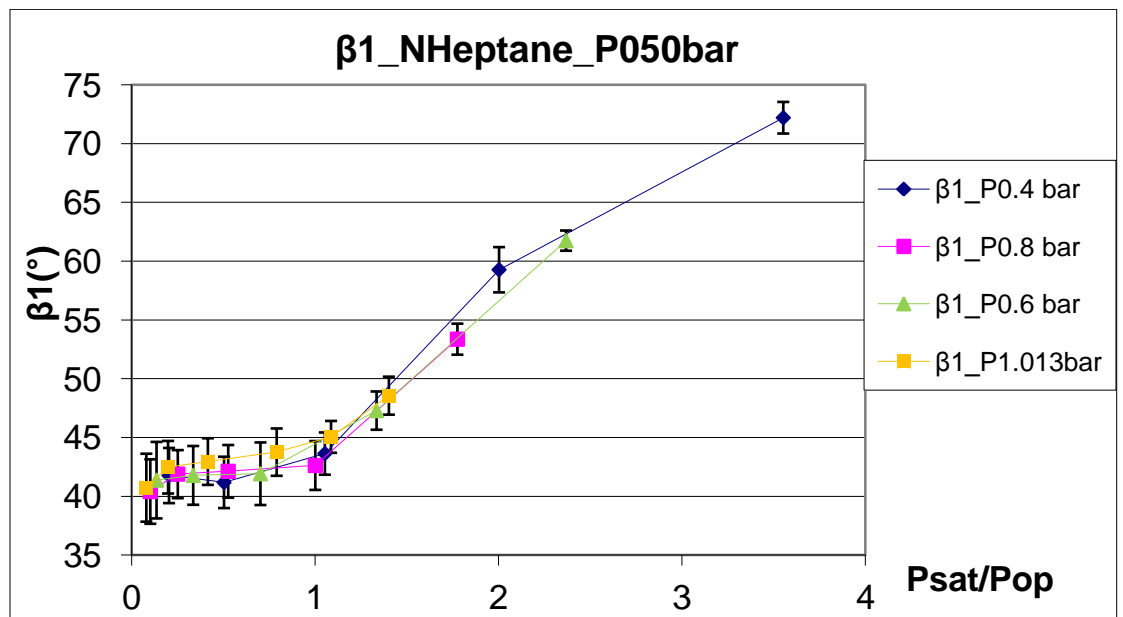


Figura 5.6: grafico β_1 -Psat/Pop per il Normal-eptano a pressione di iniezione pari a 50 bar

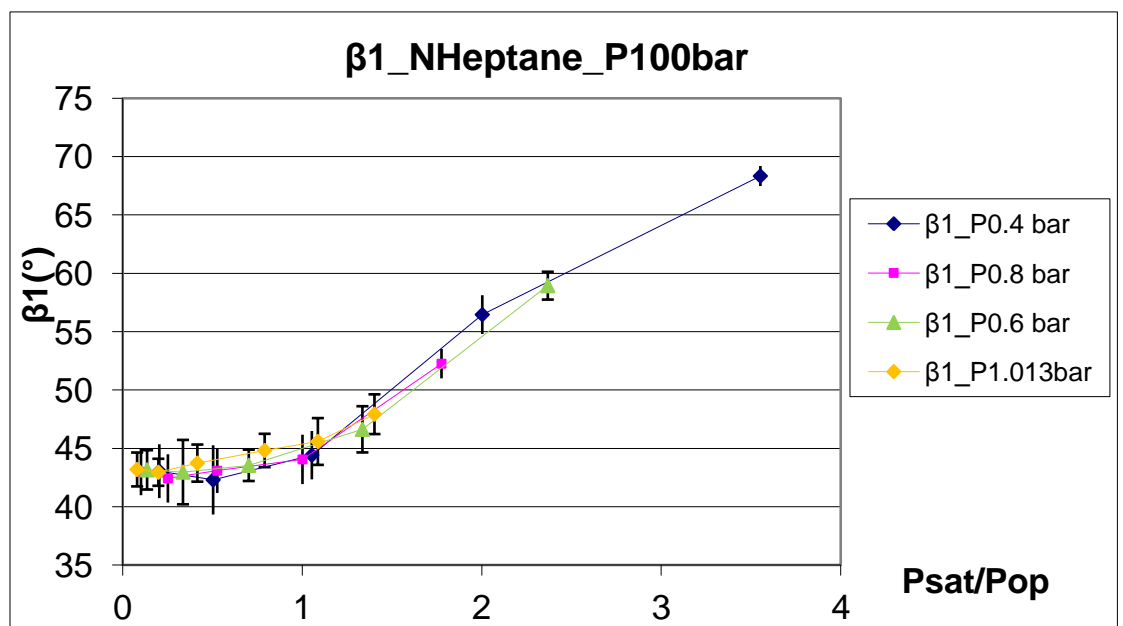


Figura 5.7: grafico β_1 -Psat/Pop per il Normal-eptano a pressione di iniezione pari a 100 bar

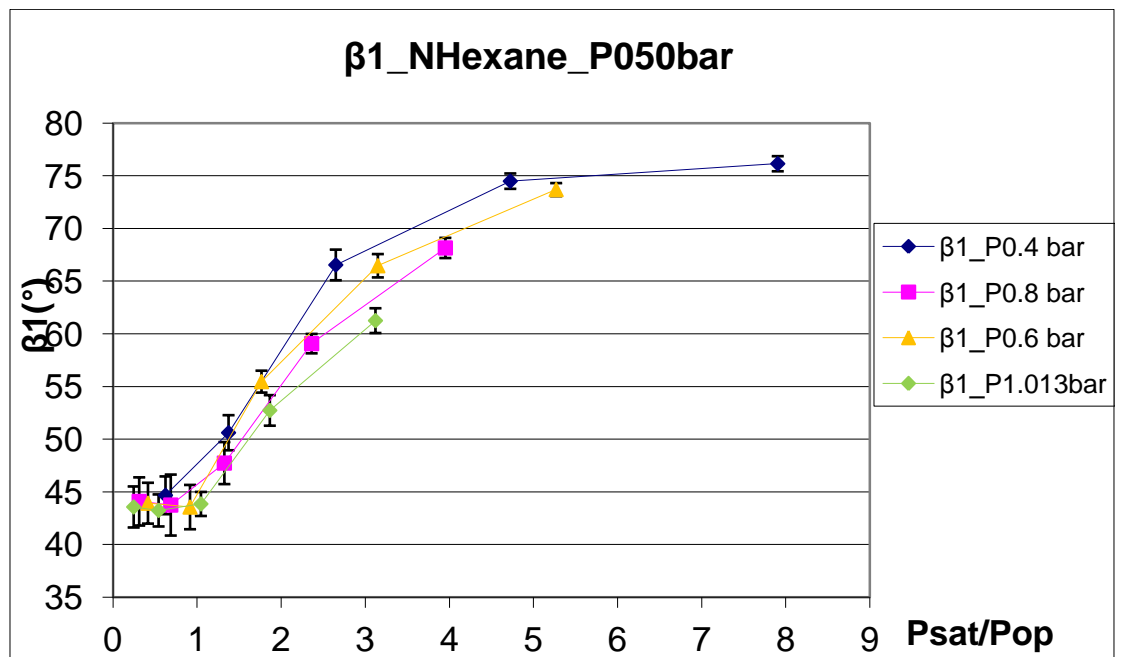


Figura 5.8: grafico β_1 -Psat/Pop per il Normal-esano a pressione di iniezione pari a 50 bar

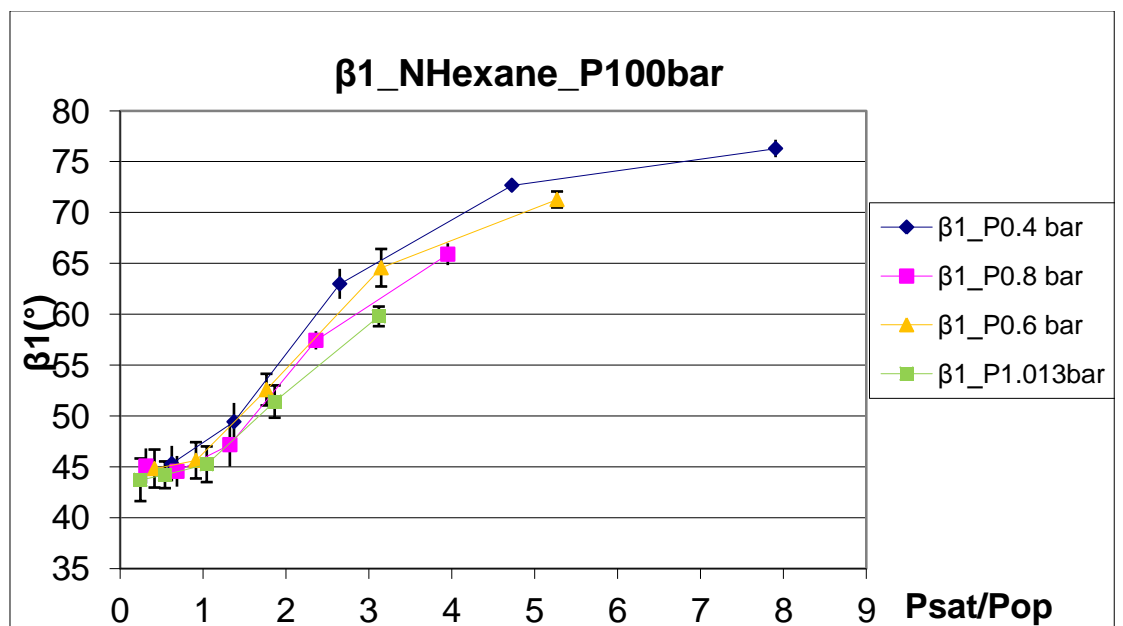


Figura 5.9: grafico β_1 -Psat/Pop per il Normal-esano a pressione di iniezione pari a 100 bar

Osservando i grafici 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7, si nota come l'angolo β_1 sia costante fino al valore di Psat/Pop prossimo a 1 e successivamente crescente per valori maggiori del rapporto di pressione. L'andamento del β_1 è simile alle diverse pressioni operative.

Osservando i grafici 5.8 e 5.9, si evidenzia un andamento differente dell'angolo di cono rispetto a quello dell'isottano e del n-eptano, in quanto pur essendo costante fino al valore pari a 1 del rapporto di pressioni, tende a crescere con pendenza diversa alle varie pressioni operative.

5.3- Legame Pressione di saturazione e curva di distillazione nelle benzine

Per le normali benzine, non è stato possibile realizzare in modo immediato i grafici $\beta 1$ -Psat/Pop in quanto non esistono delle curve di saturazione ma solo di distillazione. Per questo motivo, è stata effettuata un ricerca bibliografica per ottenere delle correlazioni che consentissero di ricavare il valore della pressione di bolle a partire dalle curve di distillazione delle sostanze in questione.

È nota la curva di distillazione a pressione atmosferica realizzata con il metodo ASTM-D86, ma la curva di distillazione non ci indica il punto di ebollizione effettivo dei componenti in una determinata frazione di combustibile. Per realizzare una curva che tenga conto di questo parametro e passare dal metodo ASTM al metodo TBP, cioè Temperature Boiling Point, abbiamo utilizzato la seguente relazione [12]

$$ASTM\ D86 = \left(\frac{1}{a}\right)^{1/b} * (TBP)^{1/b}$$

Con a e b presi come costanti a vari punti lungo la curva di distillazione.

Vol %	a	b	ASTM D86 -range °C
0	0,9177	1,0019	20-320
10	0,5564	1,09	35-305
30	0,7617	1,0425	50-315
50	0,9013	1,0176	55-320
70	0,8821	1,0226	65-330
90	0,9552	1,011	75-345
95	0,8177	1,0355	75-400

Tabella 5.1: costanti per l'eq. ASTM-TBP [12]

Per le varie benzine abbiamo quindi ottenuto le curve TBP-% vol rappresentate nelle Figure 5.10, 5.11, 5.12.

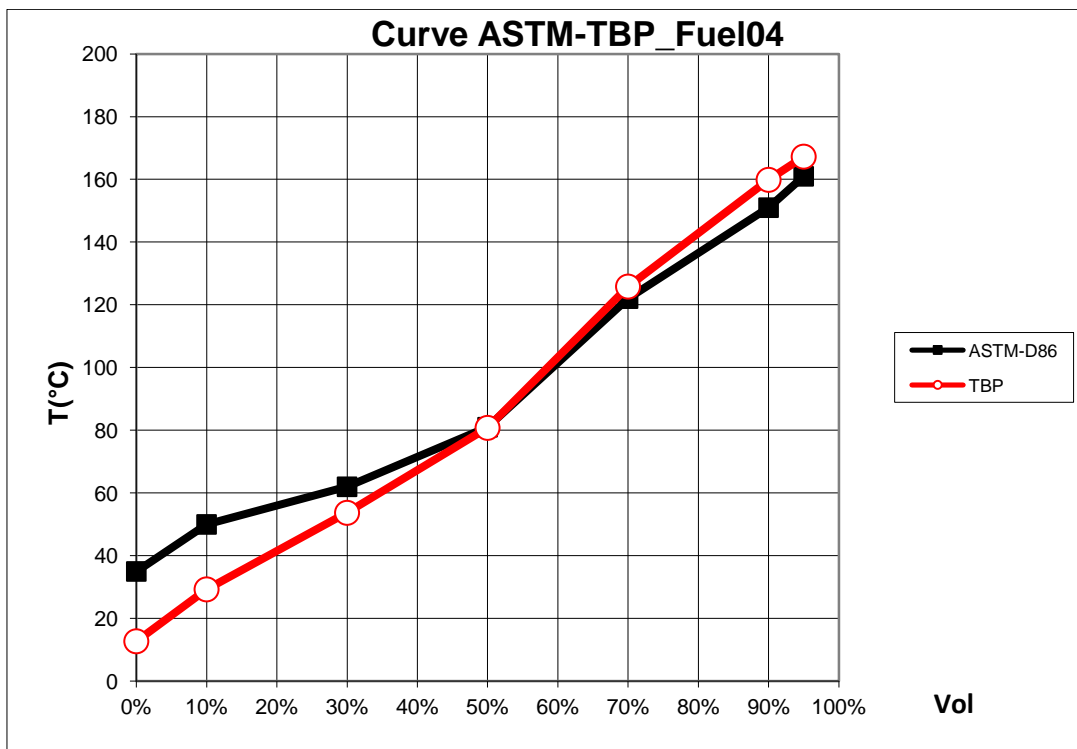


Figura 5.10: curve ASTM-TBP per il Fuel04

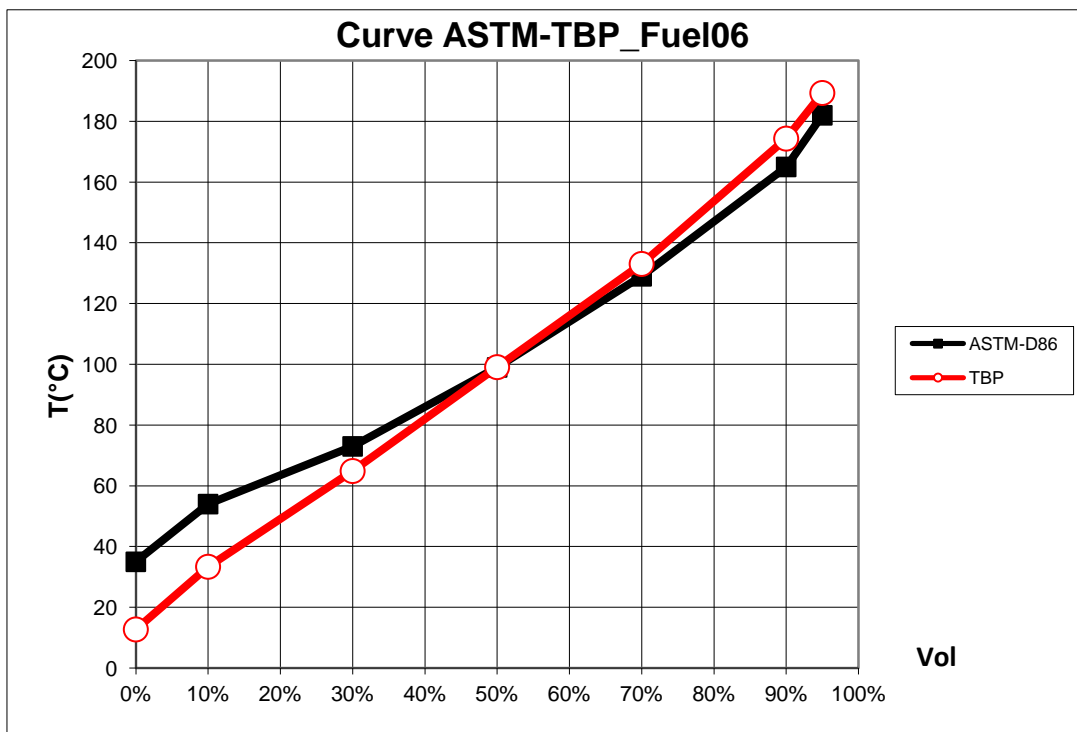


Figura 5.11: curve ASTM-TBP per il Fuel06

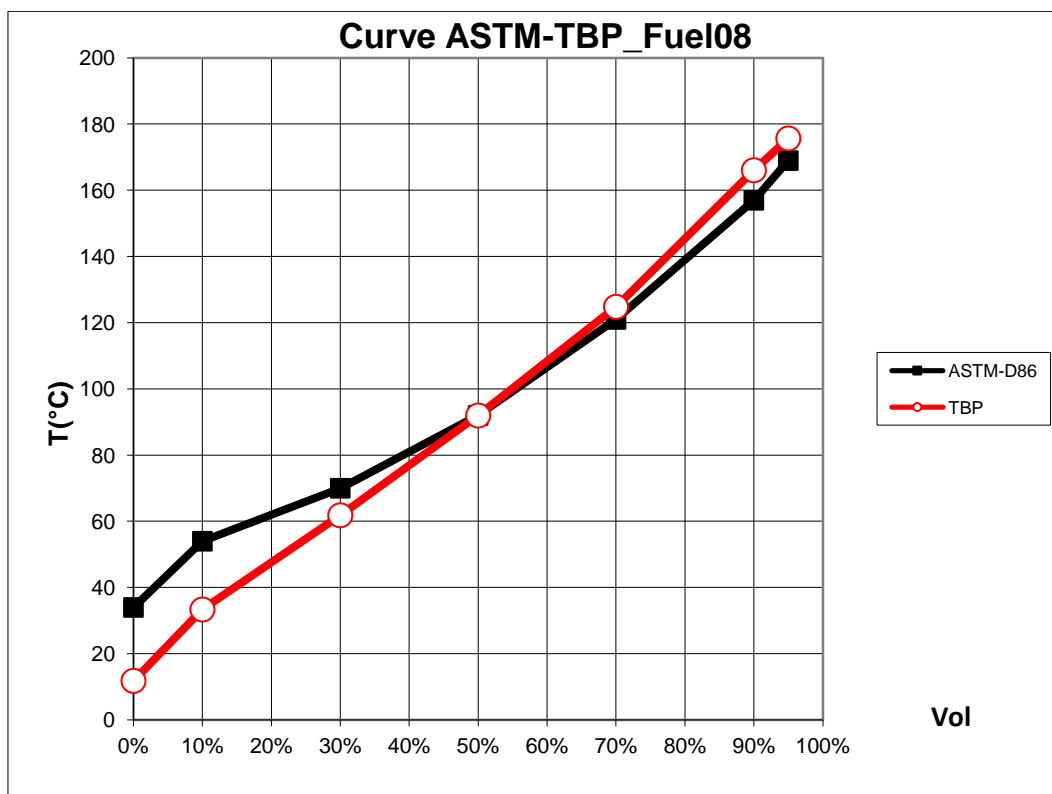


Figura 5.12: curve ASTM-TBP per il Fuel08

Sono note dunque le curve di TBP delle benzine e, dai dati standard forniti con le curve di distillazione ASTM, le percentuali delle famiglie di idrocarburi che compongono la benzina. Il legame tra pressione di saturazione e temperatura è noto per le sostanze pure, ma non lo è per le miscele delle quali non si conosce l'esatta composizione. Per trovare quindi una pressione di saturazione, definita pressione di bolle per le miscele, dalla temperatura siamo partiti dal Metodo per calcolare la pressione di vapore dei solventi di idrocarburi dalle semplici proprietà fisico-chimiche messo a punto da Erik Olsen. [13] Con l'impiego di questo metodo si ottengono delle curve di densità molare (Kmol/m^3) in funzione della temperatura di ebollizione partendo dai dati dei componenti puri divisi per famiglie. Per ottenere queste curve di densità molare, bisogna partire dalle curve di distillazione che possono essere suddivise in un numero di frazioni (tagli) in linea con gli intervalli di temperatura registrati. Ogni frazione viene considerata come uno pseudo componente e l'insieme di tutti gli pseudo componenti imita le proprietà di distillazione del campione reale. Il punto di ebollizione di ciascun pseudo componente è la media dei punti di ebollizione all'inizio e alla fine dell'intervallo di volume interessato.

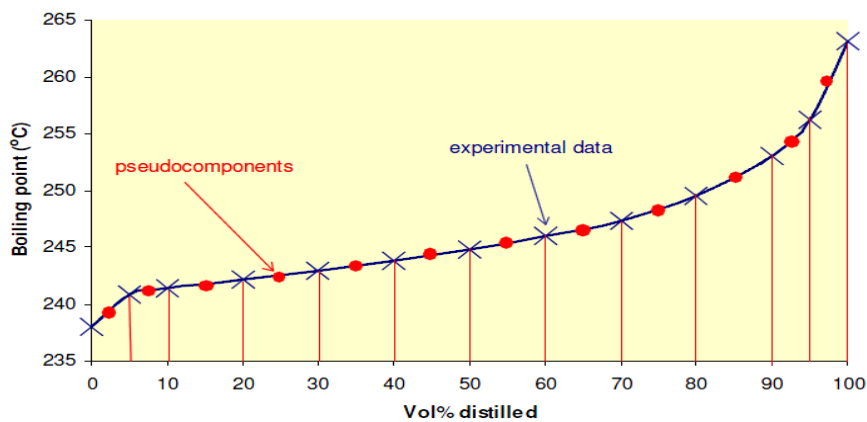


Figura 5.13: curva di distillazione e suddivisione in pseudo componenti [13]

Le famiglie dei componenti puri sono:

1. Monoaromatici;
2. N-paraffine;
3. Isoparaffine;
4. Cicloalcani;

Le curve di densità molari ottenute da Olsen sono rappresentate in figura 5.14:

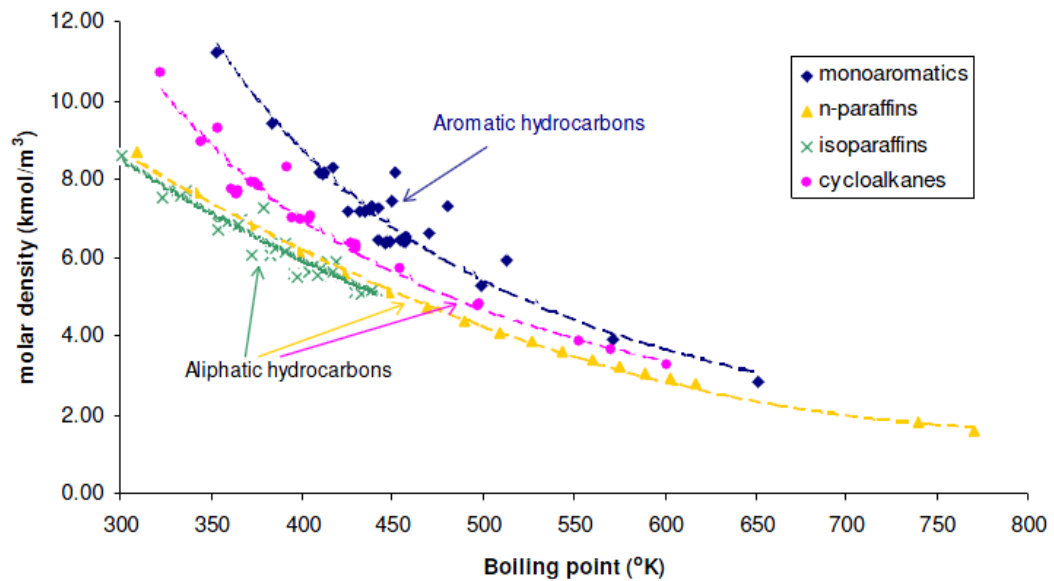


Figura 5.14: Rapporto tra le densità molari e il punto di ebollizione per i componenti puri [13]

Per ottenere le frazioni molari degli pseudo componenti vengono utilizzate solo le curve di regressione degli aromatici e dei paraffinici, rappresentate nella figura 5.15; perciò si considera la miscela come composta da aromatici e non aromatici. Sono note quindi le frazioni molari degli pseudo componenti e per

arrivare alla pressione della miscela ci occorrono le pressioni di vapore dei singoli pseudo componenti.

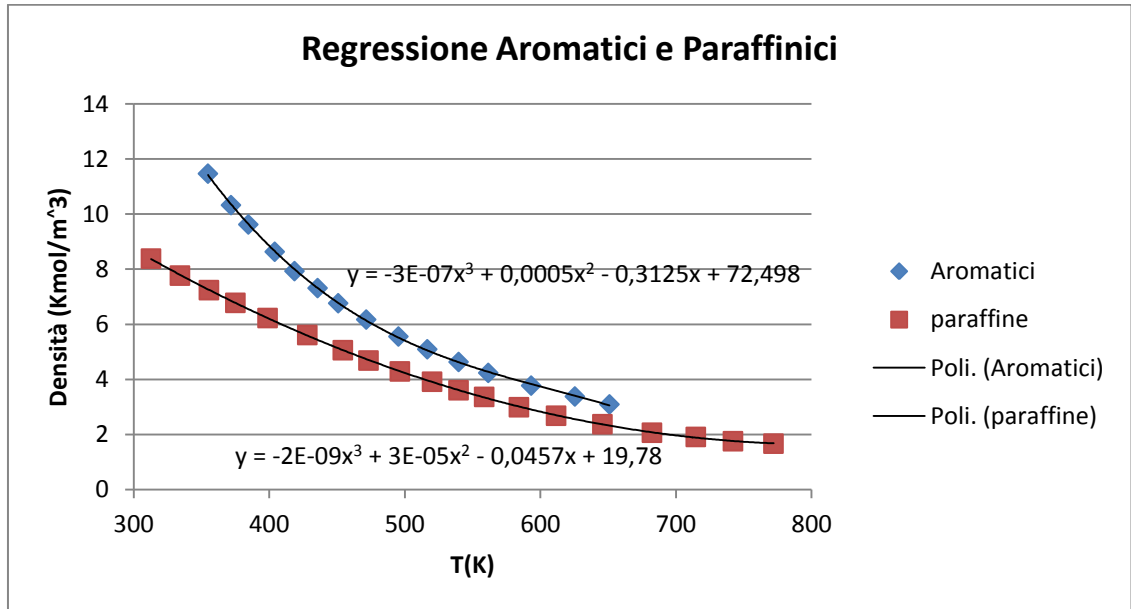


Figura 5.15: regressione Aromatici e paraffinici

Le frazioni molari ottenute sono rappresentate nella seguente tabella:

Vol. evaporato	xi		
	Fuel04	Fuel06	Fuel08
0%			
10%	0,13204	0,137818	0,133996
30%	0,241561	0,245425	0,240631
50%	0,215848	0,211929	0,211978
70%	0,184328	0,182096	0,184955
90%	0,155218	0,154358	0,157685
95%	0,071004	0,068374	0,070755

Tabella 5.2: frazioni molari per i Fuel04, Fuel06, Fuel08

Il metodo Olsen impiega una pressione di vapore a temperatura ambiente (20°C) che non ci aiuta per valori diversi da quest'ultimo. Abbiamo allora utilizzato uno studio effettuato da N.V.K. Dutt per le sostanze pure [14] sulla stima della pressione di vapore a partire dal punto di ebollizione normale degli idrocarburi. Egli costruisce delle correlazioni per famiglie di idrocarburi basate

sulla relazione di Antoine dando dei valori delle costanti legate alle famiglie e alla temperatura di ebollizione. Ricordiamo la relazione di Antoine :

$$\log P = A - \frac{B}{C + T}$$

Con P = pressione in mmHg

T = temperatura in °C

B e C sono costanti che dipendono dalla natura della sostanza, ricavate sperimentalmente ed in questo caso così definite:

$$B = m + n * \bar{T}b$$

$$C = m' + n' * \bar{T}b$$

Con $\bar{T}b$ pari alla TBP media fra due frazioni di % evaporata; A, m, m', n ed n' sono delle costanti che dipendono dalla famiglia dei componenti puri.

Homologous Series	No. of compounds	Temperature range °C	A_{ave}	m	n	m'	n'	No. of data points	Av. of % deviations	Av. of % max. deviations
n-Paraffins	20	-181 to 379	6.9281	958.08	2.9068	237.19	-0.2857	360	4.04	14.14
n-Mono olefins	19	-153 to 378	6.9047	970.45	2.7360	241.34	-0.3213	342	3.22	14.48
n-Alkyl cyclo pentanes, C_6-C_{22}	17	-40 to 406	6.9498	1025.82	2.7611	252.81	-0.3247	306	1.51	5.41
Alkyl cyclopentanes, C_5 to C_7	8	-12 to 129	6.8529	959.76	3.1187	241.33	-0.2114	144	0.30	1.00
Alkyl cyclohexanes, C_6	15	-0.3 to 158	6.8607	947.12	3.3084	240.91	-0.1933	270	0.72	2.63
Alkyl cyclohexanes, C_6	6	+10 to 157	6.8365	997.58	2.8413	253.06	-0.2886	108	0.45	1.88
n-Mono olefins, C_2-C_5	12	-153 to 60	6.8525	947.76	3.4077	238.62	-0.1473	216	1.36	4.92
Di-olefins, C_3-C_6	10	-99 to 69	6.8186	878.40	5.1529	224.27	+0.2557	180	6.02	20.06
Alkyl benzenes, C_6-C_9	14	6 to 205	6.9914	747.20	4.9464	186.85	+0.1683	250	3.00	10.89
Alkyl benzenes, C_{10}	22	50 to 235	7.0036	925.56	3.6261	224.53	-0.1198	373	1.56	4.99
Paraffins, C_1-C_5	8	-181 to 57	6.7753	932.10	3.2231	238.91	-0.1766	134	1.50	3.08
Paraffins, C_6	5	-41 to 92	6.8281	948.79	3.0846	242.71	-0.2574	90	1.02	3.53
Paraffins, C_7	9	-18 to 123	6.8481	992.98	2.6683	253.16	-0.3603	162	1.24	4.37
Paraffins, C_8	18	3 to 152	6.8681	1040.02	2.4225	262.63	-0.4091	316	1.26	4.85
Paraffins, C_9	35	12 to 178	6.8681	959.94	3.099	244.31	-0.2493	630	1.73	7.14
Overall	218							3881	2.06	7.57

Tabella 5.3: costanti per l'equazione di Antoine [14]

Il calcolo della pressione di saturazione tiene conto delle frazioni molari x_i calcolate con il metodo di Olsen e successivamente mediate in funzione degli aromatici e di tutti gli altri componenti per differenza. A questo punto abbiamo realizzato la curva di pressione di bolle per i Fuel04, Fuel06 e Fuel08. Per il Fuel95 non è stato possibile realizzare una curva di saturazione poiché non sono disponibili i dati relativi alla sua curva di distillazione.

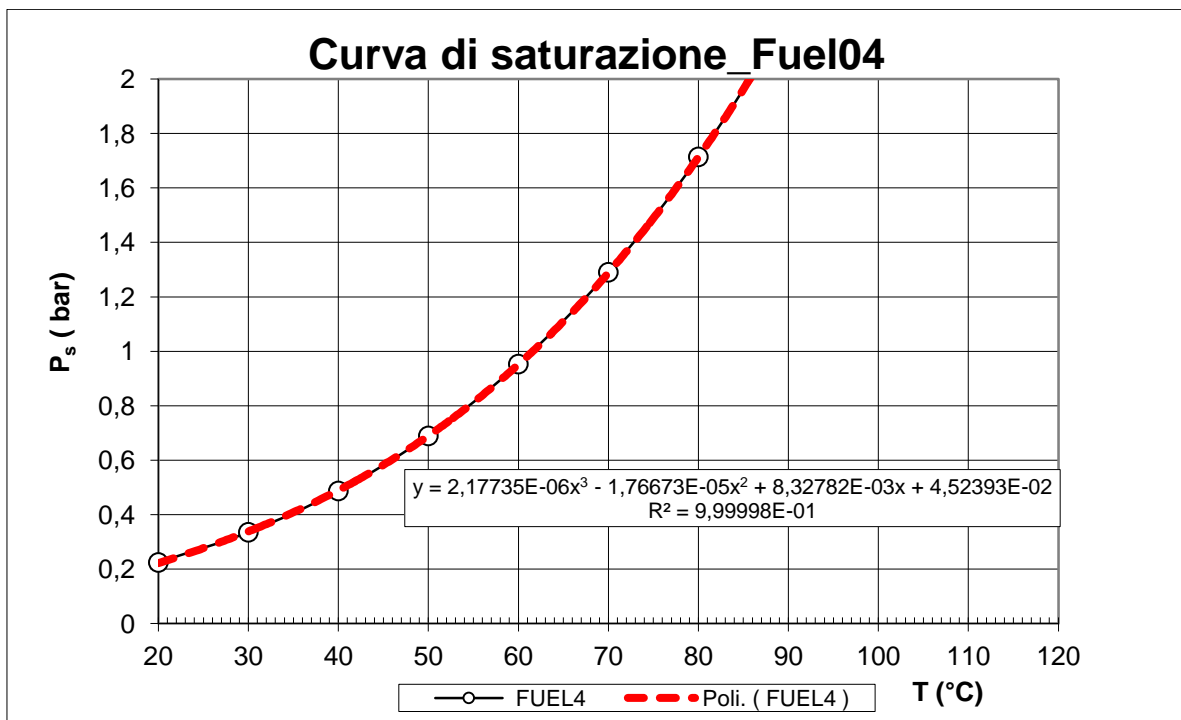


Figura 5.16: Curva di saturazione Fuel 04

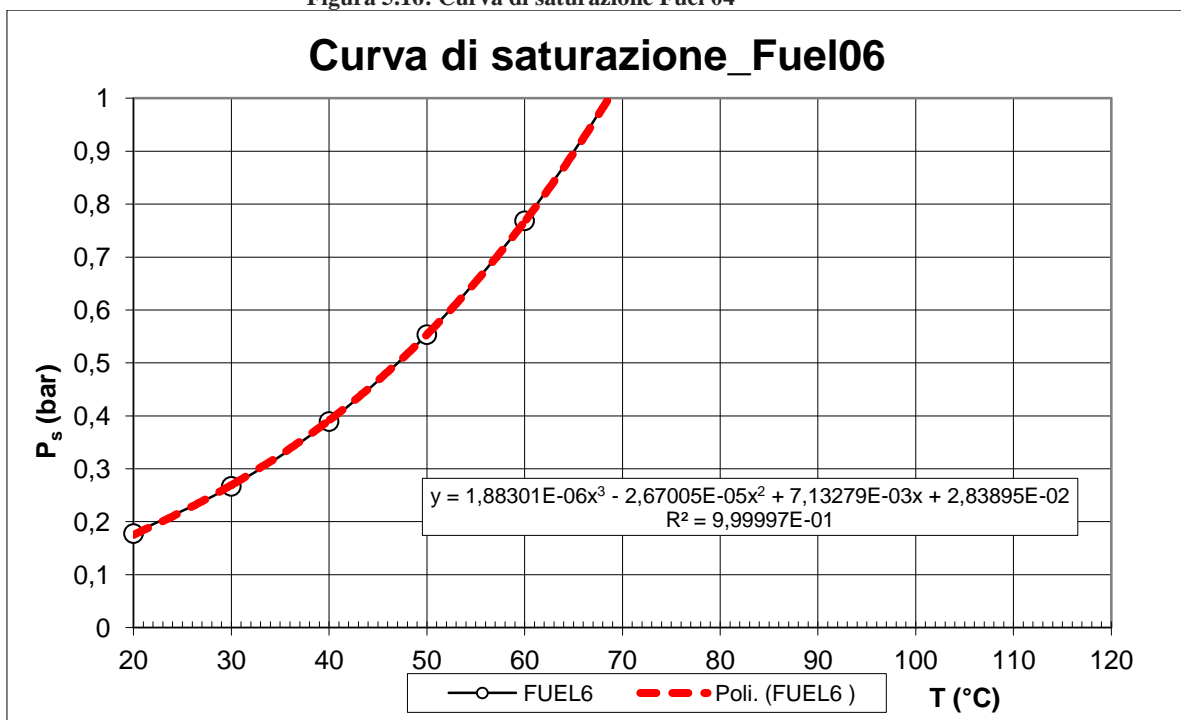


Figura 5.17: Curva di saturazione Fuel 06

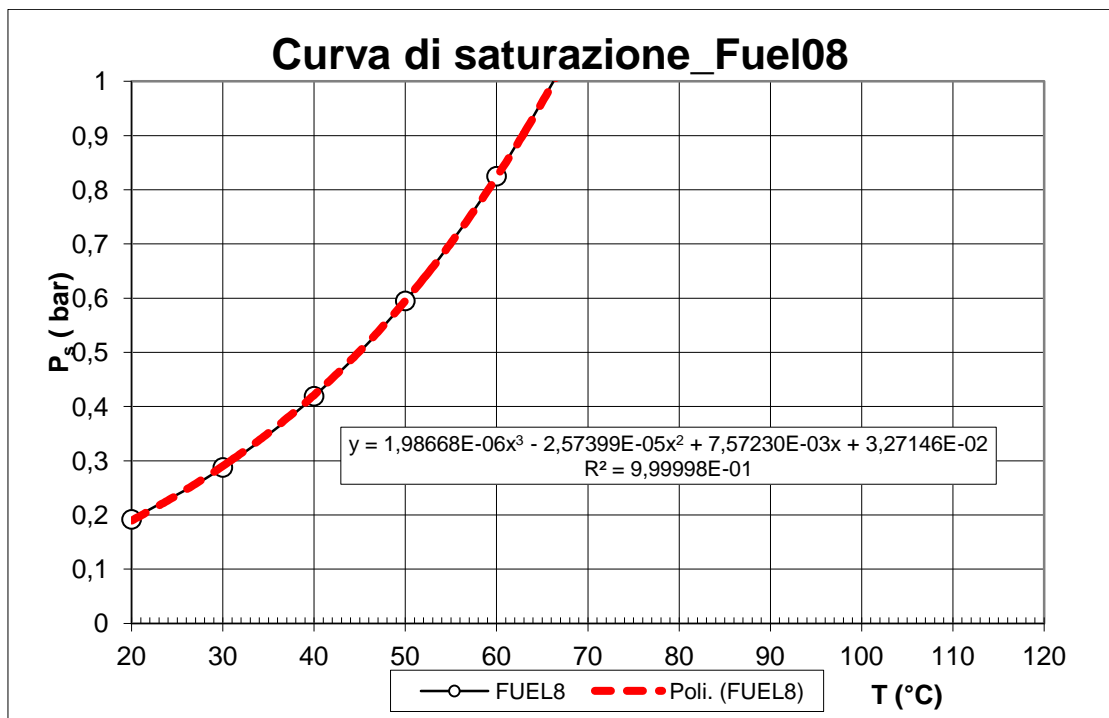


Figura 5.18: Curva di saturazione Fuel 08

5.4- Andamento β_1 in relazione al rapporto della pressione di saturazione e della pressione operativa per le benzine

Avendo a disposizione i valori della pressione di saturazione alle diverse temperature, è stato possibile mettere in relazione l'angolo β_1 rispetto al rapporto della pressione di saturazione e di quella operativa per i combustibili multicomponente.

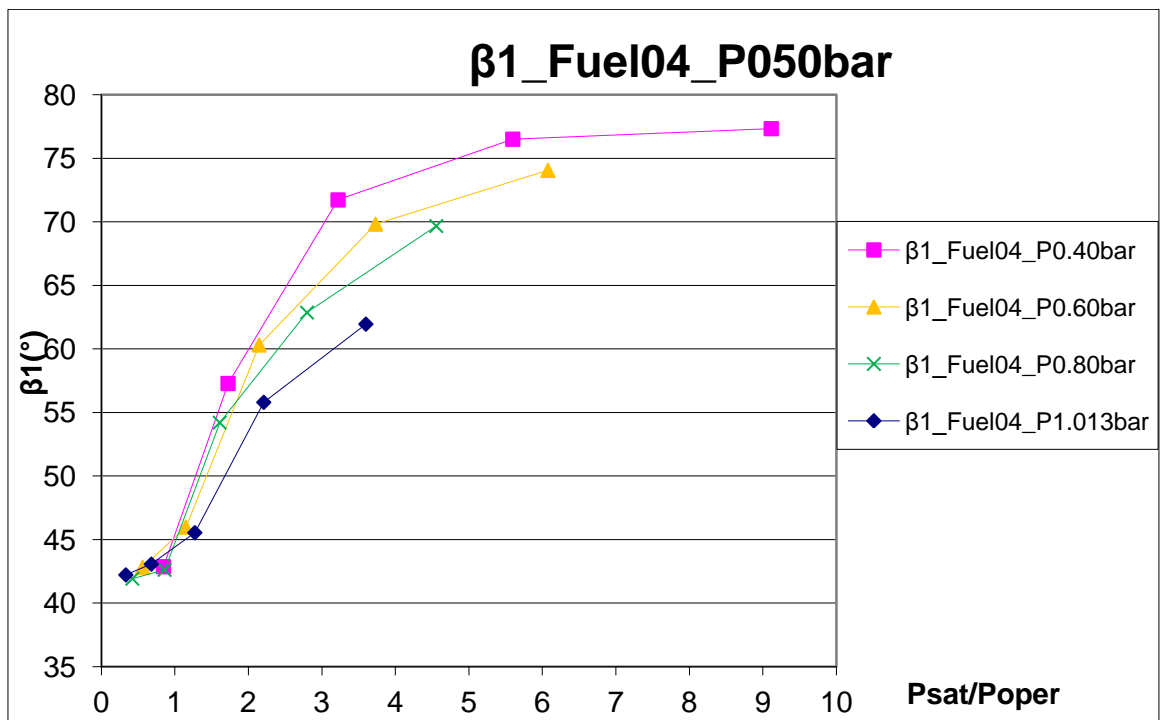


Figura 5.19: Grafico β1_Psat/Pop per il Fuel04 a pressione di iniezione pari a 50bar

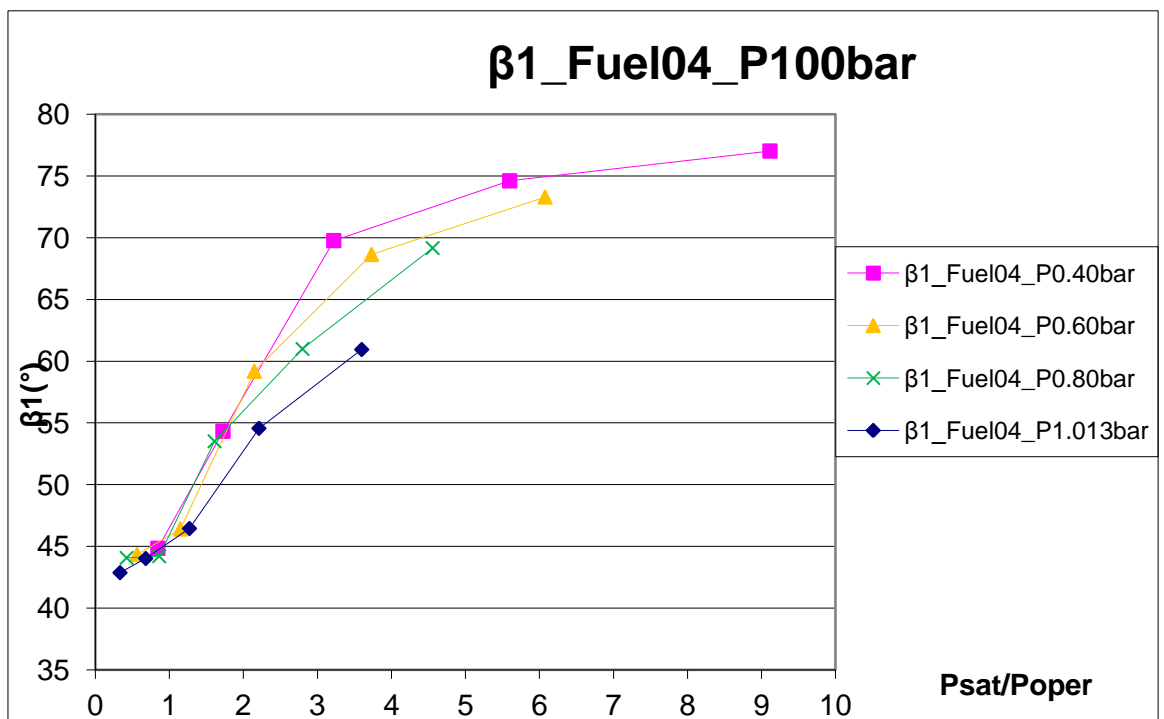


Figura 5.20: Grafico β1_Psat/Pop per il Fuel04 a pressione di iniezione pari a 100bar

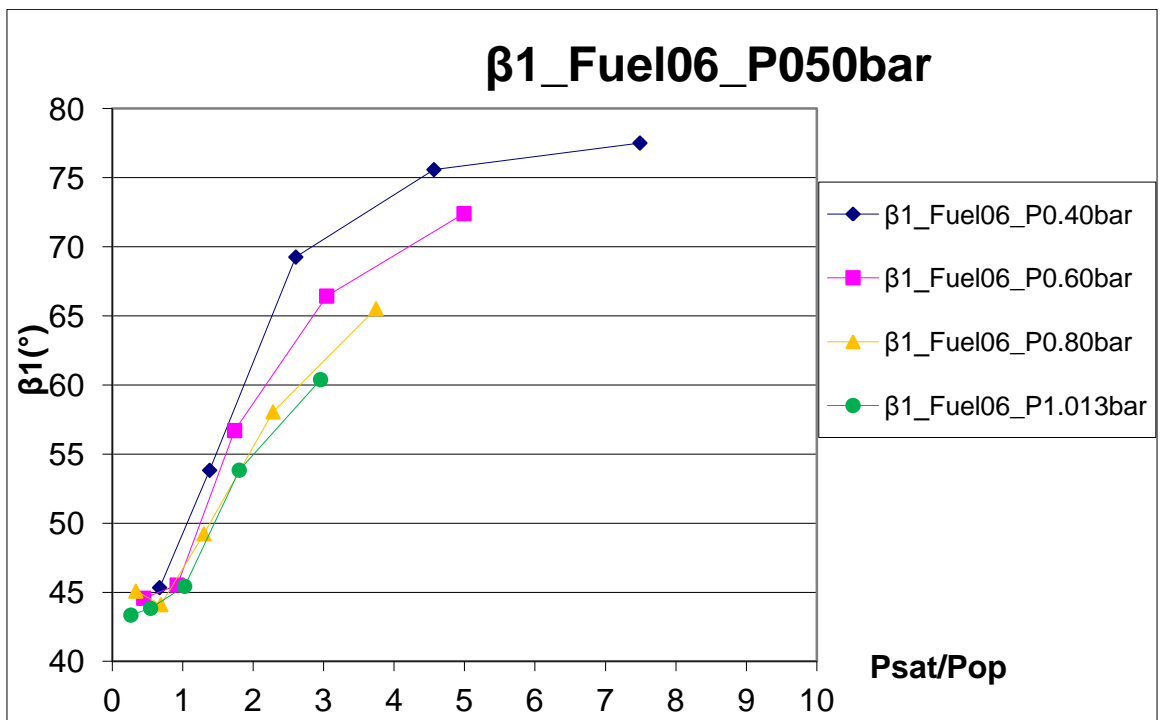


Figura 5.21: Grafico β1_Psat/Pop per il Fuel06 a pressione di iniezione pari a 50bar

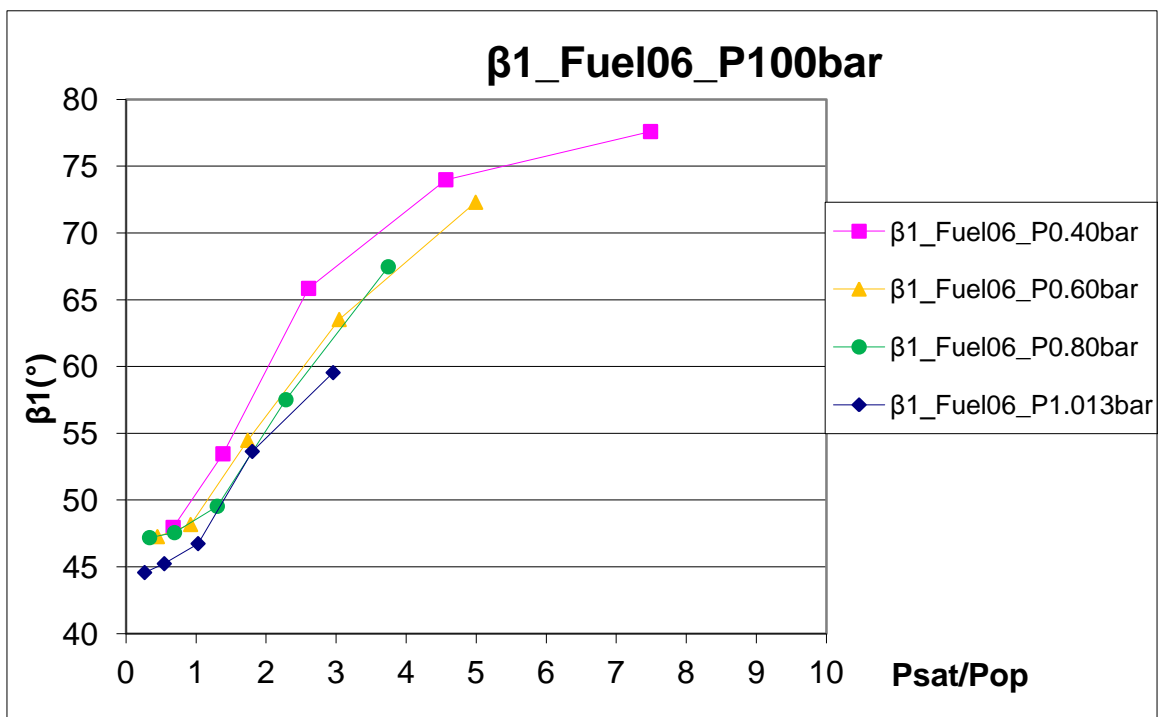


Figura 5.22: Grafico β1_Psat/Pop per il Fuel06 a pressione di iniezione pari a 100bar

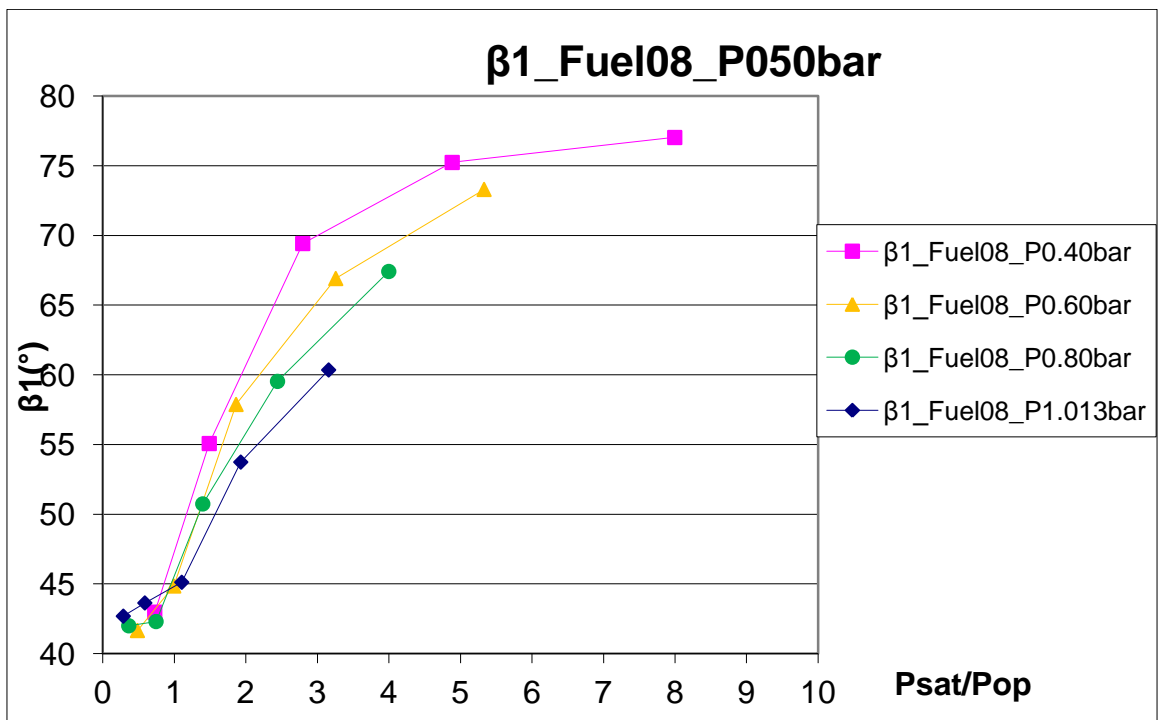


Figura 5.23: Grafico β_1 _Psat/Pop per il Fuel08 a pressione di saturazione pari a 50bar

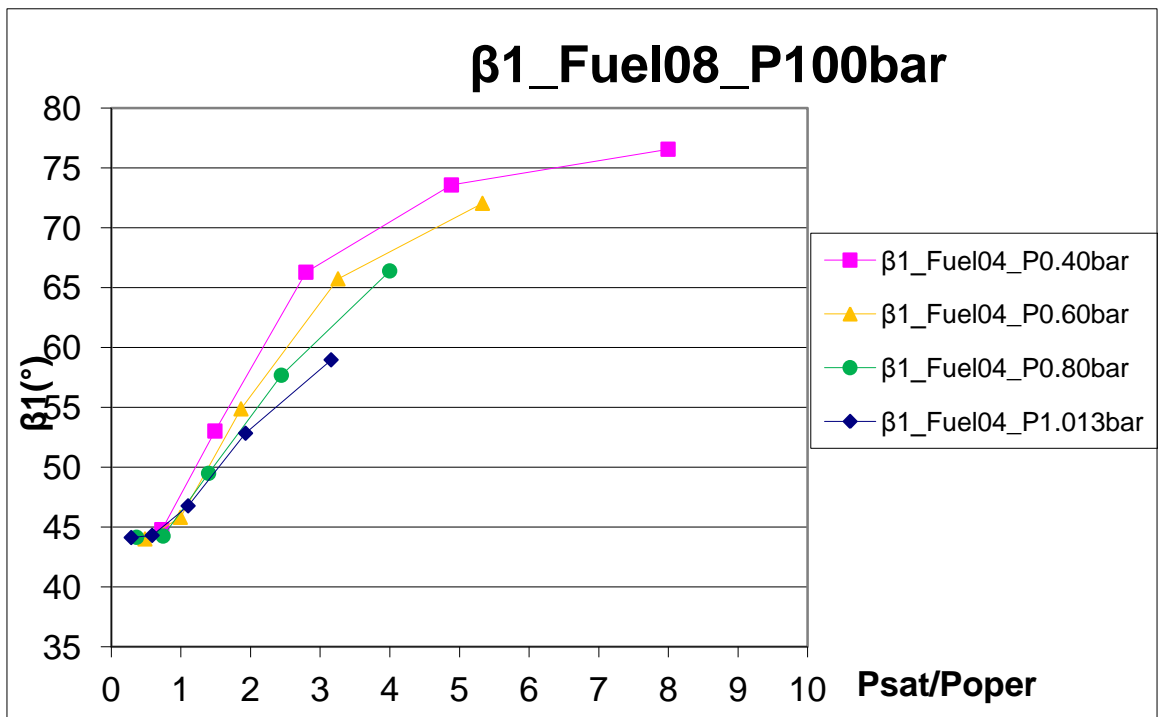


Figura 5.24: Grafico β_1 _Psat/Pop per il Fuel08 a pressione di iniezione pari a 100bar

Osservando i grafici ottenuti β_1 -Psat/Pop per i Fuel04, Fuel06, Fuel08, si può notare come tutte le curve crescano intorno al valore di Psat/Pop prossimo a 1 e come sostanzialmente il loro andamento sia simile fra loro e rispetto alle sostanze pure precedentemente analizzate. Più in dettaglio, si osserva che in tutte le sostanze analizzate le curve β_1 -Psat/Pop hanno un andamento crescente all'aumentare della depressione, analogamente a quello riscontrato nel n-esano e che la pressione di iniezione influisce poco sull'angolo β_1 .

Conclusioni e sviluppi futuri

Il normal-eptano e soprattutto l'isoottano vengono impiegati dalle industrie motoristiche nei test di laboratorio per simulare il comportamento delle benzine commerciali. I nostri dati mostrano invece come l'isoottano e il normal-eptano abbiano un comportamento, per quanto riguarda gli angoli di spray, totalmente differente rispetto ai combustibili multicomponente e come il n-esano, sostanza pura, abbia un comportamento analogo ai combustibili testati.

L'analisi dei dati sperimentali ci ha permesso di capire quali sono le grandezze che influenzano l'apertura dell'angolo di cono dello spray; fra queste la temperatura e la pressione.

All'aumentare della temperatura della benzina, lo spray inizia ad evaporare, si origina una componente trasversale della velocità all'uscita dell'ugello, dovuta all'espansione del vapore, che porta l'angolo di cono β_1 ad aumentare sempre più. All'avanzare dello spray, si genera un vortice toroidale, che causa il movimento dell'aria verso il centro dello spray con conseguente compressione dello spray e riduzione dell'angolo β_2 , quest'ultima legata alla diminuzione delle dimensione goccioline.

La pressione di iniezione invece, influenza poco il β_1 , in quanto analizzando le prove con una pressione di iniezione pari a 50 e 100 bar, l'angolo di cono varia pochissimo.

Lo studio delle benzine commerciali è fortemente limitato a causa dell'assenza di una curva di saturazione, disponibile invece per gli idrocarburi puri, e alla rara presenza di una curva di distillazione. Il nostro lavoro ha quindi riguardato la ricerca di una pressione di saturazione per questi combustibili attraverso studi presenti in letteratura che tengono conto della composizione fisica delle sostanze in questione. La pressione di saturazione è un parametro fondamentale per la caratterizzazione dello spray, in quanto a tale pressione avviene l'evaporazione del combustibile. Perciò, nota la pressione di saturazione è possibile sfruttare il fenomeno dell'evaporazione per migliorare l'atomizzazione, garantire una combustione più efficace, risparmiare combustibile e ridurre le emissioni di inquinanti.

Partendo dalla curva di distillazione ASTM-D86, abbiamo ricavato la curva TBP (Temperature Boiling Point) attraverso le correlazioni di Rialzi [12]; successivamente sfruttando le curve di densità molare ottenute da Olsen [13], abbiamo ricavato le frazioni molari di pseudo componenti in funzione degli aromatici e dei paraffinici e attraverso le pressioni di vapore calcolate

utilizzando il metodo di Dutt [14], siamo riusciti a trovare una pressione di saturazione, la pressione di bolle, per i Fuel04, Fuel06, Fuel08.

In questo modo, è stato possibile analizzare l'andamento del β_1 in funzione del rapporto tra la pressione di saturazione calcolata e la pressione operativa ed effettuare un confronto rispetto alle sostanze pure.

È emerso che l'andamento dell'angolo di cono β_1 rispetto al rapporto di pressione è simile in tutti gli idrocarburi analizzati puri e multicomponente. Nelle benzine, l'angolo β_1 cresce quando il rapporto di pressione è prossimo ad 1 così come accade nell'isooctano, nel n-esano e nel n-eptano ed il suo andamento è crescente all'aumentare della depressione così come accade nel n-esano.

Per il Fuel95, non essendo disponibile una curva di distillazione, non si è potuto applicare lo stesso metodo.

Si tratta comunque di dati ricavati mediante correlazioni matematiche empiriche che andrebbero testati sperimentalmente. Un possibile metodo per la verifica di tali dati potrebbe essere quello di misurare la pressione in un serbatoio inizialmente separato da una valvola in due zone: una prima zona in cui vi è del vuoto, e un'altra in cui viene inserita la benzina poi successivamente riscaldata. Aperta la valvola, il sistema si porta in equilibrio termodinamico e la pressione che viene misurata è esattamente la pressione di vapore.

Un ulteriore studio, che purtroppo non è stato possibile impiegare data la limitata disponibilità di dati, potrebbe essere quello riguardante le curve di distillazione. Le curve di distillazione, disponibili a pressione ambiente, possono essere portate a condizioni sub-atmosferiche mediante le correlazioni di Maxwell-Bonnell. [15] Questo metodo viene utilizzato dalle industrie petrolifere per la determinazione delle caratteristiche di distillazione dei prodotti petroliferi e frazioni che possono decomporsi se distillati a pressione atmosferica ed è impiegato per convertire le temperature di vapore osservate a pressione sub-atmosferiche nelle equivalenti temperature a pressione ambiente e viceversa.

Partendo dai grafici β_1 -T, si può individuare la temperatura a pressione ambiente alla quale l'angolo β_1 tende a crescere, soggetto ad evaporazione, e da questa determinare attraverso le curve di distillazione ottenute con le correlazioni di Maxwell & Bonnell, la temperatura di saturazione relativa alle varie pressioni operative, che consente quindi di determinare il grafico T_{sat} - P_{sat} cercato. (Rif. Appendice B)

Bibliografia

- [1] Kawano, Daisuke, “Numerical Study on Flash-Boiling Spray of Multicomponent Fuel”, Technical paper for students and young engineers - Fisita World Automotive Congress, Barcelona (2004)
- [2] Dilek YILDIZ, Patrick RAMBAUD, Jeroen VAN BEECK, Jean-Marie BUCHLIN, “Evolution of the spray characteristics in superheated liquid jet atomization in function of initial flow conditions”, Paper ID ICLASS06-122, Kyoto (2006)
- [3] Grazia Lamanna, Hend Kamoun , Bernhard Weigand, Johan Steelant, “Towards a unified treatment of fully flashing sprays”, International Journal of Multiphase Flow 58, 168-184 (2014)
- [4] Eran Sher, Tali Bar-Kohany, Alexander Rashkovan, “Flash-boiling atomization”, Progress in Energy and Combustion Science 34, 417–439 (2008)
- [5] Gaoming Zhang, Min Xu, Yuyin Zhang and David L. S. Hung, “Characteristics of Flash Boiling Fuel Sprays from Three Types of Injector for Spark Ignition Direct Injection (SIDI) Engines”, Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress, 443-454 (2012)
- [6] Giancarlo Ferrari , “Motori a combustione interna”, Il Capitello (2008)
- [7] Stefano Tuci, “Confronto fra benzine in spray GDI mediante tecnica Schlieren” , Tesi Politecnico di Milano (2007)
- [8] <http://www.treccani.it/enciclopedia/carburante/>
- [9] <http://www.dguv.de/ifa/index-2.jsp>
- [10] Alexandre Trouche, “Influence de la composition de l'essence sur la forme du spray GDI”, Tesi Politecnico di Milano (2014)
- [11] <http://webbook.nist.gov/chemistry/>
- [12] M.R. Rialzi, “Characterization and properties of petroleum fractions”, ASTM (2005)

- [13] Erik Olsen , “Method to calculate the vapour pressure of hydrocarbon solvents from simple physic-chemical properties”, National Institute of Occupational Health, Copenhagen (2003)
http://www.esig.org/uploads/ModuleXtender/Publications/141/91-660-vp_paper_olsen_june_2003-1-.pdf
- [14] N.V.K. Dutt , “Estimation of Vapor Pressure from Normal Boiling Point of Hydrocarbons”, Regional Research Laboratory, The Canadian Journal Of Chemical Engineering. Volume 60. Ottobre (1982)
- [15] ASTM International, “Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products at Reduced Pressure”, D 1160 – 02a, West Conshohocken, United States (1996)
- [16] Araneo L., Ben Slima K., Dondè R., “Flash Boiling effect on swirled injector spray angle”, Proceeding of Ilass- Europe 2002, 91-96 (2002)

Indice delle figure

Figura 1.1: modalità di funzionamento motori GDI

Figura 1.2: struttura di un moderno impianto GDI

Figura 2.1: Iniettore B36

Figura 2.2: posizione dei getti sull'iniettore B36

Figura 2.3: Il generatore e la centralina elettronici

Figura 2.4 : generatore ad impulsi

Figura 2.5: segnale TTL che aziona l'iniettore

Figura 2.6: accumulatore di pressione

Figura 2.7: Pompa di benzina a bassa pressione per ricaricare il serbatoio

Figura 2.8: bombola a gas

Figura 2.9: l'alimentazione del sensore di pressione del combustibile e delle elettrovalvole di regolazione

Figura 2.10: Manometro e vacuometro

Figura 2.11: Booster

Figura 2.12: sistema di controllo con regolatori PID Watlow

Figura 2.13: camera di prova

Figura 2.14: lampada stroboscopica

Figura 2.15: specchio Edmund sferico

Figura 2.16: fotocamera digitale PCO Sensicam

Figura 2.17: schema di un sistema ottico schlieren con configurazione a specchi

Figura 2.18: curva di distillazione

Figura 2.19: recipiente di isoottano

Figura 2.19: Curva di distillazione dei combustibili

Figura 3.1: schema funzionamento del sistema

Figura 3.2: Spray invertito

Figura 3.3: Spray binarizzato

Figura 3.4: taglio delle immagini

Figura 3.5: ricerca dei due valori soglia alla distanza di 20mm

Figura 3.6: schema del metodo per la misurazione degli angoli

**Figura 4.1: immagini B36_Fuel08_P050bar_T050C_P0.40bar_d1000 e
B36_Fuel08_P050bar_T050C_P0.40bar_d3000**

**Figura 4.2: immagini B36_Fuel08_P050bar_T050C_P0.60bar_d1000 e
B36_Fuel08_P050bar_T050C_P0.60bar_d3000**

**Figura 4.3: immagini B36_Fuel08_P050bar_T050C_P0.80bar_d1000 e
B36_Fuel08_P050bar_T050C_P0.80bar_d3000**

**Figura 4.5: immagini B36_Fuel08_P100bar_T050C_P0.60bar_d1000 e
B36_Fuel08_P100bar_T050C_P0.60bar_d3000**

**Figura 4.6: immagini B36_Fuel08_P100bar_T050C_P0.80bar_d1000 e
B36_Fuel08_P100bar_T050C_P0.80bar_d3000**

**Figura 4.7: immagini B36_Fuel08_P050bar_T030C,
T070C,T110C_P0.40bar_d3000**

**Figura 4.8: immagini B36_Fuel08_P050bar_T030C,
T070C,T110C_P0.60bar_d3000**

**Figura 4.9: immagini B36_Fuel08_P050bar_T030C,
T070C,T110C_P0.80bar_d3000**

**Figura 4.10: immagini B36_Fuel08_P100bar_T030C,
T070C,T110C_P0.40bar_d3000_0028**

**Figura 4.11: immagini B36_Fuel08_P100bar_T030C,
T070C,T110C_P0.60bar_d3000**

**Figura 4.12: immagini B36_Fuel08_P100bar_T030C,
T070C,T110C_P0.80bar_d3000_0014**

**Figura 4.13: immagini P100bar T030C P0.60 bar d3000_0030 e P100bar T110C
P0.60 bar d3000_0030**

Figura 4.14: grafico β 1-T per il Fuel06 a pressione di iniezione pari a 50 bar

Figura 4.15: grafico β 1-T per il Fuel06 a pressione di iniezione pari a 100 bar

Figura 4.16: grafico β 1-T per il Fuel04 a pressione di iniezione pari a 50 bar

Figura 4.17: grafico β 1-T per il Fuel04 a pressione di iniezione pari a 100 bar

Figura 4.18: grafico β 1-T per il Fuel08 a pressione di iniezione pari a 50 bar

Figura 4.19: grafico β 1-T per il Fuel08 a pressione di iniezione pari a 100 bar

Figura 4.20: grafico β 1-T per il Fuel95 a pressione di iniezione pari a 50 bar

Figura 4.21: grafico β 1-T per il Fuel08 a pressione di iniezione pari a 50 bar

Figura 4.22: grafico β 1-T per l'Isoottano a pressione di iniezione pari a 50 bar

Figura 4.23: grafico β 1-T per l'Isoottano a pressione di iniezione pari a 100 bar

**Figura 4.24: grafico β 1-T per il Normal-esano a pressione di iniezione pari a 50
bar**

**Figura 4.25: grafico β 1-T per il Normal-esano a pressione di iniezione pari a 100
bar**

**Figura 4.26: grafico β 1-T per il Normal-eptano a pressione di iniezione pari a 50
bar**

**Figura 4.27: grafico β 1-T per il Normal-eptano a pressione di iniezione pari a 100
bar**

**Figura 4.28: grafico confronto β 1-T a pressione operativa 0.40 bar e pressione di
iniezione a 50 bar**

**Figura 4.29: grafico confronto β 1-T a pressione operativa 0.40 bar e pressione di
iniezione a 100 bar**

**Figura 4.30: grafico confronto β 1-T a pressione operativa 0.60 bar e pressione di
iniezione a 50 bar**

Figura 4.31: grafico confronto $\beta 1$ -T a pressione operativa 0.60 bar e pressione di iniezione a 100 bar

Figura 4.32: grafico confronto $\beta 1$ -T a pressione operativa 0.80 bar e pressione di iniezione a 50 bar

Figura 4.33: grafico confronto $\beta 1$ -T a pressione operativa 0.80 bar e pressione di iniezione a 100 bar

Figura 4.34: grafico confronto $\beta 1$ -T a pressione operativa 1.0130 bar e pressione di iniezione a 50 bar

Figura 4.35: grafico confronto $\beta 1$ -T a pressione operativa 1.013 bar e pressione di iniezione a 100 bar

Figura 4.36: grafico $\beta 2$ -T per il Fuel04 a pressione di iniezione pari a 50 bar

Figura 4.37: grafico $\beta 2$ -T per il Fuel04 a pressione di iniezione pari a 100 bar

Figura 4.38: grafico $\beta 2$ -T per il Fuel06 a pressione di iniezione pari a 50 bar

Figura 4.40: grafico $\beta 2$ -T per il Fuel06 a pressione di iniezione pari a 100 bar

Figura 4.41: grafico $\beta 2$ -T per il Fuel08 a pressione di iniezione pari a 50 bar

Figura 4.42: grafico $\beta 2$ -T per il Fuel08 a pressione di iniezione pari a 100 bar

Figura 4.43: grafico $\beta 2$ -T per il Fuel95 a pressione di iniezione pari a 50 bar

Figura 4.44: grafico $\beta 2$ -T per il Fuel95 a pressione di iniezione pari a 100 bar

Figura 4.45: grafico $\beta 2$ -T per l'Isoottano a pressione di iniezione pari a 50 bar

Figura 4.46: grafico $\beta 2$ -T per l'Isoottano a pressione di iniezione pari a 100 bar

Figura 4.47: grafico $\beta 2$ -T per Normal-eptano a pressione di iniezione pari a 50 bar

Figura 4.48: grafico $\beta 2$ -T per il Normal-eptano a pressione di iniezione pari a 100 bar

Figura 4.49: grafico $\beta 2$ -T per il Normal-esano a pressione di iniezione pari a 50 bar

Figura 4.50: grafico $\beta 2$ -T per il Normal-esano a pressione di iniezione pari a 100 bar

Figura 4.51: grafico confronto $\beta 2$ -T a pressione operativa 0.40 bar e pressione di iniezione a 50 bar

Figura 4.52: grafico confronto $\beta 2$ -T a pressione operativa 0.60 bar e pressione di iniezione a 50 bar

Figura 4.53: grafico confronto β_2 -T a pressione operativa 0.80 bar e pressione di iniezione a 50 bar

Figura 4.54: grafico confronto β_2 -T a pressione operativa 1.013 bar e pressione di iniezione a 50 bar

Figura 4.55: grafico confronto β_2 -T a pressione operativa 0.40 bar e pressione di iniezione a 100 bar

Figura 4.56: grafico confronto β_2 -T a pressione operativa 0.60 bar e pressione di iniezione a 100 bar

Figura 4.57: grafico confronto β_2 -T a pressione operativa 0.80 bar e pressione di iniezione a 100 bar

Figura 4.58: grafico confronto β_2 -T a pressione operativa 1.013 bar e pressione di iniezione a 100 bar

Figura 5.1: curva di saturazione Isoottano

Figura 5.2: curva di saturazione N-esano

Figura 5.3: curva di saturazione N-eptano

Figura 5.4: grafico β_1 -Psat/Pop per l'Isoottano a pressione di iniezione pari a 50 bar

Figura 5.5: grafico β_1 -Psat/Pop per l'Isoottano a pressione di iniezione pari a 100 bar

Figura 5.6: grafico β_1 -Psat/Pop per il Normal-eptano a pressione di iniezione pari a 50 bar

Figura 5.7: grafico β_1 -Psat/Pop per il Normal-eptano a pressione di iniezione pari a 100 bar

Figura 5.8: grafico β_1 -Psat/Pop per il Normal-esano a pressione di iniezione pari a 50 bar

Figura 5.9: grafico β_1 -Psat/Pop per il Normal-esano a pressione di iniezione pari a 100 bar

Figura 5.10: curve ASTM-TBP per il Fuel04

Figura 5.11: curve ASTM-TBP per il Fuel06

Figura 5.12: curve ASTM-TBP per il Fuel08

Figura 5.13: curva di distillazione e suddivisione in pseudo componenti [13]

Figura 5.14: Rapporto tra le densità molari e il punto di ebollizione per i componenti puri [13]

Figura 5.15: regressione Aromatici e paraffinici

Figura 5.16: Curva di saturazione Fuel 04

Figura 5.17: Curva di saturazione Fuel 06

Figura 5.18: Curva di saturazione Fuel 08

Figura 5.19: Grafico β_1_{Psat}/Pop per il Fuel04 a pressione di iniezione pari a 50bar

Figura 5.20: Grafico β_1_{Psat}/Pop per il Fuel04 a pressione di iniezione pari a 100bar

Figura 5.21: Grafico β_1_{Psat}/Pop per il Fuel06 a pressione di iniezione pari a 50bar

Figura 5.22: Grafico β_1_{Psat}/Pop per il Fuel06 a pressione di iniezione pari a 100bar

Figura 5.23: Grafico β_1_{Psat}/Pop per il Fuel08 a pressione di saturazione pari a 50bar

Figura 5.24: Grafico β_1_{Psat}/Pop per il Fuel08 a pressione di iniezione pari a 100bar

Indice delle tabelle

Tabella 2.1: dimensioni camera di prova

Tabella 2.2: caratteristiche dei combustibili utilizzati

Tabella 2.3: caratteristiche dei composti puri utilizzati

Tabella 3.1: parametri dell'acquisizione fotografica

Tabella 3.2: tabella riepilogativa delle prove

Tabella 5.1: costanti per l'eq. ASTM-TBP [12]

Tabella 5.2: frazioni molari per i Fuel04, Fuel06, Fuel08

Tabella 5.3: costanti per l'equazione di Antoine [14]

Appendice A

Macro Image Pro Plus

----- DICHIARAZIONI -----

Dim AttivaStop As Integer ' stop a vari passi per debug
Dim FileOK As Integer ' = 1 se esistono files
Dim FileN As Integer ' la posizione del file nella directory
Dim FileNome As String * 256
Dim DirNome As String * 256

Dim FotoXmax As Integer ' larghezza (orizzontale) della foto
Dim FotoYmax As Integer ' altezza (verticale) della foto
Dim FotoInfo As IPDOCINFO ' legge le informazion della foto
Dim Risoluzione As Single ' risoluzione in pixel/mm

Dim FormatoImmagine As String * 3 ' per definire il tipo di immagini da leggere, tif o jpg, TRE

CARATTERI

Dim Nspray As Integer ' per definire il numero dello spray su cui sto
lavorando

Dim NsprayMax As Integer ' per definire il numero di spray, max 10
Dim SprayRotate(10) As Single ' per ruotare lo spray in orizzontale
Dim SprayOriginX(10) As Integer ' per definire la posizione X dell'inizio spray
Dim SprayOriginY(10) As Integer ' per definire la posizione Y dell'inizio spray
Dim SprayMoltiplica(10) As Single ' per correggere la lunghezza di ogni spray, porre=1 per non variare

Dim SfondoMoltiplica As Single ' per moltiplicare lo sfondo da sottrarre
Dim SfondoSottrai As Integer ' da sottrarre ulteriormente dall'immagine quando si
sottrae lo sfondo

Dim LarghezzaPosizione(5) As Single ' posizione a cui misurare le larghezze 0 1 2 3 4 5 espresse in mm;
=0 non processa per velocizzare

Dim LarghezzaMezza(5) As Single ' =0 lavora normale, =-1 scarta la metà sopra=destra=Ypiccoli, =1
scarta la metà sotto=sinistra=Ygrandi -----

Dim TagliaAngolo As Integer ' angolo (non semiangolo) su cui limitare
l'analisi dello spray, in gradi

Dim TagliaAngoloBase As Integer ' larghezza (non più semilarghezza) dell'angolo su cui
limitare l'analisi dello spray, in pixel

Dim InvertiImmagine As Integer 'inverte le immagini ottenute in shadowgrafia
Dim BinarizzaImmagine As Integer 'binarizza l'immagine ottenuta in shadowgrafia,
0..nero..BinarizzaImmagine..bianco..255

Dim EqualizzaSfondo(7) As Single 'per equalizzare lo sfondo (1) logico, (2-5) X-Y-X-Y per area
campione, 6e7 valori medi

Dim FiltroErodImmagine As Integer 'erode gli oggetti luminosi, elimina i punti bianchi isolati

Dim Statistiche(10) As Single 'usata per ottenere le statistiche da LineProfile,
Statistiche(1) sarà il valore medio


```

Dim Soglia As Single          ' soglia (0.10 = 10%) del massimo usata per
trovare i bordi
Dim Larghezza As Single      ' larghezza dello spray all'uscita, per misurare
l'Angolo. OPZIONE DAL CENTRO AL BORDO O VICEVERSA
Dim Nlarghezza As Integer    ' variabile di iterazione

Dim PixLeggi As Integer      ' il pixel in lettura, usato anche come indice di iterazioni
Dim PixMax As Integer        ' la posizione del massimo del line profile
Dim PixSoglia As Integer     ' la posizione del 10% del massimo

Dim IntLetta() As Single     ' l'intensità del line-profile, ridimensionare quando serve con
FotoXmax o FotoYmax!
Dim IntMax As Single         ' l'intensità del massimo del line-profile

' Dim LargLeggi(10) As Single ' statistiche sul line profile Forse non serve più
'----- fine dichiarazioni, INIZIALIZZA VARAIBILI-----
-----

ret = IpAppCloseAll( )
'!!!! QUI C'E' IL FILE CON LA LISTA DELLE DIR DA ANALIZZARE
Open "D:\Comprimende\_lista_Spray_multipenetrazione_6b.txt" For Input As #2
Input #2, DirNome
If Trim(DirNome)<>"Per_Versione_6b" Then Stop
For FileN = 2 To 50          'passa le righe iniziali, la prima già letta
    Input #2, DirNome
    Debug.Print FileN;" "; DirNome
Next fileN

' INIZIALIZZA ALCUNI VALORI STANDARD PER EVITARE
SORPRESE
AttivaStop = 1              ' 0 = disattivo
FormatoImmagine = "tif"    ' sezione dati di default
Risoluzione = 10           ' pixels per millimetro
InvertiImmagine= 0         ' 0 = disattivo, 1 = attivo, per foto BackLight
EqualizzaSfondo(1)=0      ' 0 = disattivo, 1 = attivo
EqualizzaSfondo(2)= 1     ' X sinistra
EqualizzaSfondo(3)= 1     ' Y alto
EqualizzaSfondo(4)= 10    ' X destra
EqualizzaSfondo(5)= 10    ' Y basso
EqualizzaSfondo(6)= 1     ' media sfondo (prima immagine)
EqualizzaSfondo(7)= 1     ' media immagine in analisi
SfondoSottrai = 0
SfondoMoltiplica = 1
FiltroErodiImmagine= 0    ' 0 = disattivo, 1 = attivo
BinarizzaImmagine = 0     ' 0 = disattivo, >0 0..nero..BinarizzaImmagine..bianco..255
TagliaAngolo=0            ' in gradi apertura totale non semiapertura, =0 non taglia
TagliaAngoloBase = 20     ' ampiezza della base in pixels
LarghezzaPosizione(0)=0.5 ' in mm, 0=non lo fa
LarghezzaPosizione(1)=10  ' in mm
LarghezzaPosizione(2)=20  ' in mm
LarghezzaPosizione(3)=0   ' in mm
LarghezzaPosizione(4)=0   ' in mm
LarghezzaPosizione(5)=0   ' in mm
LarghezzaMezza(0)=0       ' Logico, 0      prende tutta la larghezza
LarghezzaMezza(1)=0       ' Logico, -1    scarta la metà in alto
LarghezzaMezza(2)=0       ' Logico, 1     scarta la metà in basso

```

```

LarghezzaMezza(3)=0           'Logico
LarghezzaMezza(4)=0           'Logico
LarghezzaMezza(5)=0           'Logico
Soglia=0.1                     'soglia = 10% del massimo (classico valore)
PixSoglia)
'----- fine inizializzazioni, CICLO VERO-----

While Not EOF(2)                ' il file con i nomi delle directories in cui lavorare
    ret = IpAppCloseAll()
    Input #2, DirNome           ' LEGGE NOME DIRECTORY, NUMERO SPRAY E
    VALORI INIZIO REALE SPRAY

        While Left$(DirNome,4)="New_"
            If Trim(DirNome)="New_ActivaStop" Then Input #2, AttivaStop      ' 0/1
            If Trim(DirNome)="New_FormatoImmagine" Then Input #2, FormatoImmagine
            '
            If Trim(DirNome)="New_Risoluzione" Then Input #2, Risoluzione      ' pixels per
            millimetro, numero di getti da analizzare
            If Trim(DirNome)="New_EqualizzaSfondo" Then Input #2, EqualizzaSfondo(1),
            EqualizzaSfondo(2), EqualizzaSfondo(3), EqualizzaSfondo(4), EqualizzaSfondo(5)
            If Trim(DirNome)="New_InvertiImmagine" Then Input #2, InvertiImmagine
            If Trim(DirNome)="New_SfondoMoltiplica" Then Input #2, SfondoMoltiplica
            If Trim(DirNome)="New_SfondoSottrai" Then Input #2, SfondoSottrai:
            SfondoSottrai=Abs(SfondoSottrai)
            If Trim(DirNome)="New_FiltroErodiImmagine" Then Input #2, FiltroErodiImmagine
            If Trim(DirNome)="New_BinarizzaImmagine" Then Input #2, BinarizzaImmagine
            If Trim(DirNome)="New_TagliaAngolo" Then Input #2, TagliaAngolo,
            TagliaAngoloBase
            If Trim(DirNome)="New_LarghezzaPosizione0to5" Then Input #2,
            LarghezzaPosizione(0), LarghezzaPosizione(1), LarghezzaPosizione(2), LarghezzaPosizione(3),
            LarghezzaPosizione(4), LarghezzaPosizione(5)
            If Trim(DirNome)="New_LarghezzaMezza0to5" Then Input #2, LarghezzaMezza(0),
            LarghezzaMezza(1), LarghezzaMezza(2), LarghezzaMezza(3), LarghezzaMezza(4), LarghezzaMezza(5)
            If Trim(DirNome)="New_Soglia" Then Input #2, Soglia
            If Trim(DirNome)="New_Coordinate" Then
                Input #2, NsprayMax
                For Nspray = 1 To NsprayMax
                    Input #2, SprayRotate(Nspray)      ' direzione dello spray
                    Input #2, SprayOriginX(Nspray)      ' dove inizia lo spray, cioè lo
                    zero dell'ugello
                    Input #2, SprayOriginY(Nspray)      ' dove inizia lo spray, cioè lo
                    zero dell'ugello
                    Input #2, SprayMoltiplica(Nspray)   ' correzione lunghezza dello
                    spray
                Next Nspray
            End If
            Input #2, DirNome           ' LEGGE MOME DIRECTORY, NUMERO
            SPRAY E VALORI INIZIO REALE SPRAY !!!
        Wend

        '----- qui si scrive l'intestazione del file in uscita

        Open Trim$(DirNome)+"_v2.csv" For Output As #1
        'Open Trim$(DirNome)+"_RisultatiV6b.csv" For Output As #1

        Print #1, "Spr_Rotate:";

```

```

For Nspray = 1 To NsprayMax
    Print #1, " ("; Nspray; " )"; SprayRotate(Nspray);
Next Nspray
Print #1,

Print #1, "Spr_Orig_X:";
For Nspray = 1 To NsprayMax
    Print #1, " ("; Nspray; " )"; SprayOriginX(Nspray);
Next Nspray
Print #1,

Print #1, "Spr_Orig_Y:";
For Nspray = 1 To NsprayMax
    Print #1, " ("; Nspray; " )"; SprayOriginY(Nspray);
Next Nspray
Print #1,

Print #1, "Macro_v6; parameters:,,,Resolution [pixel/mm],,; Risoluzione;" ,,
Invert_Image__;InvertiImmagine
Print #1, "Equalize_Background__"; EqualizzaSfondo(1); " ,, "; EqualizzaSfondo(2);" ,
";EqualizzaSfondo(3); " , ";EqualizzaSfondo(4); " , ";EqualizzaSfondo(5)
Print #1, "Subtract_Background,,"; SfondoSottrai;" ,, Multiply_Background ,, ";
SfondoMoltiplica
Print #1, "Erod_Image__"; FiltroErodiImmagine;" ,, Binarize,"; BinarizzaImmagine;" ,,
Threshold , "; Soglia*100;"%"
Print #1, "Cut_Angle[°]__"; TagliaAngolo; ,, CutAngleBase [pixel]__"; TagliaAngoloBase; " ,,
ExcludeHalfSpray__"; LarghezzaMezza(0);
LarghezzaMezza(1);LarghezzaMezza(2);LarghezzaMezza(3);LarghezzaMezza(4);LarghezzaMezza(5)
Print #1, "Six WidthPosit[mm]; 0mm=skip,, "; LarghezzaPosizione(0);" , ";
LarghezzaPosizione(1);" , ";LarghezzaPosizione(2);" , ";LarghezzaPosizione(3);" ,
";LarghezzaPosizione(4);" , ";LarghezzaPosizione(5)

Print #1, "Image, time(ms)";
For Nspray = 1 To NsprayMax
    Print #1, " , Pix";Soglia*100; "% ("; Nspray; " )";
    For Nlarghezza=0 To 5
        If Abs(LarghezzaMezza(Nlarghezza))=1 Then 'cambia la scritta se analizzo
metà spray
Print #1, " , 2*1/2W@"; LarghezzaPosizione(Nlarghezza); "mm (";
Nspray; " )";
Else
Print #1, " , Width@"; LarghezzaPosizione(Nlarghezza); "mm (";
Nspray; " )";
End If
Next Nlarghezza
Next Nspray
Print #1,
'----- fine intestazione del file in uscita

FileN = 0 'contatore dei files nella directory
FileOK=IpStSearchDir(Trim$(DirNome),"*."+FormatoImmagine,FileN,FileNome)

ret = IpWsLoad(FileNome,FormatoImmagine) 'apre il file da sottrarre come sfondo,
deve essere il primo della directory
ret = IpOpNumberArithmetics(SfondoMoltiplica, OPA_MULT, 1) 'mette lo sfondo in
Untitled1 moltiplicandolo

```

```

ret = IpDocMove(100, 100)
ret = IpAppSelectDoc(0)
ret = IpDocClose()
ret = IpAppSelectDoc(1)

If EqualizzaSfondo(1)=1 Then                                     'equalizzazione, prende valor
medio sfondo
    ret = IpProfCreate()
    ret = IpProfSetAttr(LINETYPE, THICKHORZ)
    ret = IpProfLineMove (EqualizzaSfondo(2), EqualizzaSfondo(3), EqualizzaSfondo(4),
EqualizzaSfondo(5))
    ' ret = IpProfSetAttr(STATISTICS, 1) ' per visualizzarle, ma non serve?
    ret = IpProfGet(GETSTATS, 0, Statistiche(0))                ' becca il valore
medio
    EqualizzaSfondo(6)=Statistiche(0)
    ret = IpProfSelect(0)
    ret = IpProfDestroy()
End If                                                         'fine equalizzazione sfondo
If InvertiImmagine=1 Then ret = IpLutSetAttr(LUT_CONTRAST, -2) 'inverte sfondo

While FileOK=1                                               'lavora sulle immagini nella
directory finchè ce ne sono
    ret = IpWsLoad(FileNome,FormatoImmagine)                 'immagine da analizzare
    If EqualizzaSfondo(1)=1 Then                             'equalizzazione,
prende valor medio immagine
        ret = IpProfCreate()
        ret = IpProfSetAttr(LINETYPE, THICKHORZ)
        ret = IpProfLineMove (EqualizzaSfondo(2), EqualizzaSfondo(3),
EqualizzaSfondo(4), EqualizzaSfondo(5))
        ret = IpProfGet(GETSTATS, 0, Statistiche(0))          ' becca il
valore medio
    'If AttivaStop = 1 Then Stop ' pausa
        EqualizzaSfondo(7)= 1
        If Statistiche(0)<>0 Then EqualizzaSfondo(7) = EqualizzaSfondo(6) /
Statistiche(0) * 1 ' rapporto intensità, dovrebbe essere prossimo a 1
        Debug.Print
        Debug.Print "Equalizza_Sfondo_Spray_Rapporto "; EqualizzaSfondo(6);
Statistiche(0); EqualizzaSfondo(7)
        ret = IpOpNumberArithmetics(EqualizzaSfondo(7), OPA_MULT, 0)
    ' equalizza l'immagine
        ret = IpProfSelect(0)
        ret = IpProfDestroy()
    End If                                                     'fine
equalizzazione immagine
    If InvertiImmagine=1 Then ret = IpLutSetAttr(LUT_CONTRAST, -2) 'inverte
immagine
        ret = IpOpImageArithmetics(1, -1*SfondoSottrai, OPA_SUB, 0) 'sottrae
SfondoSottrai all'immagine, diminuisce un po' la luminosità
        If FiltroErodiImmagine=1 Then ret = IpFltErode(MORPHO_3x3CROSS, 1)
    ' filtro che erode oggetti luminosi
    'If AttivaStop = 1 Then Stop ' pausa
        ' ret = IpFltLoPass(5, 5, 1)                            ' un filtro
non più in uso

```

```

        If BinarizzaImmagine >0 Then
        ' binarizza l'immagine, nero sotto al valore, bianco sopra al valore
            ret = IpSegSetRange(0, BinarizzaImmagine, 255)
            ret = IpSegCreateMask(5, 0, 1)
        End If

        ' !!!!! CAMBIARE se serve la posizione del tempo nella riga dopo

        ' InStr(FileNome, ".") fornisce la posizione del "."; sapendo che il tempo è TOT caratteri
        prima, viene letto correttamente
        ' caso 3 cifre, ms
            'Print #1, IpTrim$(FileNome);";"; Val(Mid$(FileNome, InStr(FileNome, ".")-
            10, 3))/1; F23d_020ms_0006.tif fornisce 20ms
            'Debug.Print IpTrim$(FileNome);";"; Val(Mid$(FileNome,
            InStr(FileNome, ".")-10, 3))/1;
        ' caso 4 cifre, us
            Print #1, IpTrim$(FileNome);";"; Val(Mid$(FileNome, InStr(FileNome, ".")-11,
            4))/1000; ' ???_2000us_0006.tif diventa 2us
            Debug.Print IpTrim$(FileNome);";"; Val(Mid$(FileNome, InStr(FileNome, ".")-11,
            4))/1000;
        ' caso 5 cifre, us
            'Print #1, IpTrim$(FileNome);";"; Val(Mid$(FileNome, InStr(FileNome, ".")-
            12, 5))/1000; ' ???_12000us_0006.tif diventa 12us
            'Debug.Print IpTrim$(FileNome);";"; Val(Mid$(FileNome,
            InStr(FileNome, ".")-12, 5))/1000;

        For Nspray = 1 To NsprayMax

            If SprayRotate(Nspray) <> 0 Then ret = IpWsRotate(SprayRotate(Nspray), 0)
            ruota l'immagine se necessario, mette su nuova finestra

            ' qui si acquisiscono le dimensioni dell'immagine ruotata
            ret = IpDocGet(GETDOCINFO, DOCSEL_ACTIVE, FotoInfo)
            FotoXmax = FotoInfo.Extent.Right
            FotoYmax = FotoInfo.Extent.bottom
            ReDim IntLetta(FotoXmax)
            If FotoYmax > FotoXmax Then ReDim IntLetta(FotoYmax)
            ' Dim IntLetta(FotoXmax) nelle intestazioni non serve

            If TagliaAngolo <> 0 Then ' se deve tagliare una porzione ad angolo

                ' qui si crea l'AOI e si cancella tutto ciò che non è lo spray di
                interesse

                Pts(0).x = SprayOriginX(Nspray)
                Pts(0).y = SprayOriginY(Nspray) - TagliaAngoloBase/2
                Pts(1).x = SprayOriginX(Nspray)
                Pts(1).y = SprayOriginY(Nspray) + TagliaAngoloBase/2
                Pts(2).y = SprayOriginY(Nspray) + TagliaAngoloBase/2
                +(FotoXmax - SprayOriginX(Nspray)) * Tan(TagliaAngolo/2/180*3.14)
                If Pts(2).y < FotoYmax Then
                    Pts(2).x = FotoXmax
                Else
                    Pts(2).x = SprayOriginX(Nspray) + (FotoYmax -
                    SprayOriginY(Nspray) - TagliaAngoloBase/2) / Tan(TagliaAngolo/2/180*3.14)
                    Pts(2).y = FotoYmax
                End If
            End If
        Next Nspray
    
```

```

End If
Pts(3).x = FotoXmax
Pts(3).y = FotoYmax
Pts(4).x = 0
Pts(4).y = FotoYmax
Pts(5).x = 0
Pts(5).y = 0
Pts(6).x = FotoXmax
Pts(6).y = 0
Pts(7).y=SprayOriginY(Nspray)-TagliaAngoloBase/2-(FotoXmax-
SprayOriginX(Nspray))*Tan(TagliaAngolo/2/180*3.14)
If Pts(7).y > 0 Then
    Pts(7).x = FotoXmax
Else
    Pts(7).x=SprayOriginX(Nspray)+(SprayOriginY(Nspray)-
TagliaAngoloBase/2)/Tan(TagliaAngolo/2/180*3.14)
    Pts(7).y=0
End If

ret = IpAoiCreateIrregular(Pts(0), 8)
ret = IpWsFill(0, 3, 0)
ret = IpAoiShow(FRAME_NONE)
End If ' fine della zona che cancella l'esterno

a TagliaAngolo

' qui si genera il line profile orizzontale per misurare la penetrazione
ret = IpProfCreate()
ret = IpProfSetAttr(LINETYPE, THICKHORZ)

ret = IpProfLineMove (SprayOriginX(Nspray), 1, FotoXmax, FotoYmax )
ret = IpProfGet (GETVALUES, FotoXmax, IntLetta(0))
ret = IpProfSelect(0)
ret = IpProfDestroy()
'qui si cerca la penetrazione
PixMax = 0
IntMax = 0
For PixLeggi = 0 To FotoXmax-SprayOriginX(Nspray) ' cerca il massimo
    If IntLetta(PixLeggi) > IntMax Then IntMax = IntLetta(PixLeggi):
pixmap=PixLeggi
Next PixLeggi
PixSoglia=0
For PixLeggi = PixMax To FotoXmax-1-SprayOriginX(Nspray) ' trova
PixSoglia
    If (PixSoglia = 0 And IntLetta(PixLeggi)< IntMax*Soglia) Then
PixSoglia = PixLeggi
Next PixLeggi
'qui si scrive su file la penetrazione
Print #1, "; PixSoglia/Risoluzione*SprayMoltiplica(Nspray);
Debug.Print "; PixSoglia/Risoluzione*SprayMoltiplica(Nspray);

For Nlarghezza = 0 To 5
    If LarghezzaPosizione(Nlarghezza)>0 Then ' non verifica
l'errore se è fuori dall'immagine
        ' qui si genera il line profile orizzontale per misurare la
larghezza alle varie distanze
        ret = IpProfCreate()

```

```

ret = IpProfSetAttr(LINETYPE, THICKvert)
ret = IpProfLineMove
(SprayOriginX(Nspray)+(LarghezzaPosizione(Nlarghezza)-0.5)*risoluzione, 0,
SprayOriginX(Nspray)+(LarghezzaPosizione(Nlarghezza)+0.5)*risoluzione, FotoYmax )
ret = IpProfGet (GETVALUES, FotoXmax, IntLetta(0))
ret = IpProfSelect(0)

If AttivaStop = 1 Then Stop ' pausa

ret = IpProfDestroy()
'qui si cerca la LARGHEZZA
PixMax = 0
IntMax = 0
For PixLeggi = 0 To FotoYmax ' cerca il massimo
    If IntLetta(PixLeggi) > IntMax Then IntMax =
IntLetta(PixLeggi): PixMax = PixLeggi
Next PixLeggi

PixSoglia = 0
'qui si cerca PixSoglia 1°, ATTIVA UNA DELLE DUE
For PixLeggi = 0 To PixMax ' trova PixSoglia_1 dal
BORDO al centro, VEDE RUMORI
    If (PixSoglia = 0 And IntLetta(PixLeggi)>
IntMax*Soglia) Then PixSoglia = PixLeggi
'For PixLeggi = PixMax To 0 Step -1 ' trova PixSoglia_1
dal CENTRO al bordo, PERDE PLUME SEPARATI
    If (PixSoglia = 0 And IntLetta(PixLeggi)<
IntMax*Soglia) Then PixSoglia = PixLeggi
Next PixLeggi
If PixSoglia < risoluzione Then
    PixSoglia = -FotoYmax ' se manca il primo
bordo, valore negativo
else
    If LarghezzaMezza(Nlarghezza) = -1 Then
PixSoglia = SprayOriginY(Nspray) ' se scarto la prima metà, sopra, Y parte dall'asse
end If
Larghezza=PixSoglia ' in pixel

PixSoglia = 0
'qui si cerca PixSoglia 2°, ATTIVA UNA DELLE DUE
For PixLeggi = FotoYmax To PixMax Step -1 ' trova
PixSoglia_2 dal BORDO al centro, VEDE RUMORI
    If (PixSoglia = 0 And IntLetta(PixLeggi)>
IntMax*Soglia) Then PixSoglia = PixLeggi
'For PixLeggi = PixMax To FotoYmax ' trova
PixSoglia_2 dal CENTRO al bordo, PERDE PLUME SEPARATI
    If (PixSoglia = 0 And IntLetta(PixLeggi)<
IntMax*Soglia) Then PixSoglia = PixLeggi
Next PixLeggi
If PixSoglia > FotoYmax-risoluzione Then
    PixSoglia = 2*FotoYmax ' se manca il secondo
bordo, valore due volte la larghezza foto
else
    If LarghezzaMezza(Nlarghezza) = 1 Then
PixSoglia = SprayOriginY(Nspray) ' se scarto la seconda metà, sotto, Y arriva solo all'asse
end if

```

```

mm
Larghezza = (PixSoglia-Larghezza)/risoluzione ' già in

' se ha lavorato su mezza larghezza, raddoppia
If Abs(LarghezzaMezza(Nlarghezza)) =1 Then Larghezza
=Larghezza *2

Else
Larghezza = 0
End If
' scrive su file
Print #1, ","; Larghezza;
Debug.Print ", "; Larghezza;
Next Nlarghezza

If SprayRotate(Nspray)<>0 Then ret = IpDocClose() ' chiude
(se esiste) l'immagine ruotata
Next Nspray

ret = IpDocClose() 'chiusura file (non ruotato)
Print #1,
Debug.Print

FileN=FileN+1 ' incrementea contatore files
FileOK=IpStSearchDir(Trim$(DirNome),"*."+FormatoImmagine,FileN,FileNome)
'vede se c'è ancora un file da elaborare

Wend

Close #1 ' chiude file scritto con risultati di questa directory
ret = IpAppSelectDoc(2)
ret = IpDocClose() ' chiude sfondo (Untitled1)
Wend
Close #2 ' chiude file da cui ha letto lista directory
End Sub

```

```

Sub compress_TIF_to_TIF
' test to process a complete directory, convert from .tif to .tif compressed
Dim FileN As Integer
Dim FileOK As Integer
Dim NomeFile As String * 255

FileN = 0 'inizializza
contatore files
FileOK = IpStSearchDir ("D:\Comprimende\", "*.tif", FileN, NomeFile)
Do While FileOK=1 'se c'è un file.tif
alla posizione del contatore va avanti
ret = IpWsLoad(NomeFile,"tif") 'carica file
Rem ret = IpWsChangeInfo(INF_DPIX, 254) 'cambia risoluzione a 100 dpi
Rem ret = IpWsChangeInfo(INF_DPIY, 254)
ret = IpLutSetAttr(LUT_CONTRAST, -2) ' inverte sfondo
ret = IpWsSaveEx(NomeFile,"tif",6,8) ' salva file compresso
ret = IpDocClose() ' chiude file
Debug.Print NomeFile
FileN = FileN + 1 ' incrementa contatore files

```



```

        FileOK = IpStSearchDir ("D:\Comprimende\", "*.tif", FileN, NomeFile)
Loop
Debug.Print FileOK
End Sub

Sub converti_TIF_to_JPG()

' test to process a complete directory, convert from .tif to .jpg
Dim FileN As Integer
Dim FileOK As Integer
Dim Posizione As Integer
Dim Tempo As Integer
Dim NomeFile As String * 250

FileN = 0                                     'inizializza
contatore files
FileOK = IpStSearchDir ("D:\Comprimende\", "*.tif", FileN, NomeFile)
Do While FileOK=1                               'se c'è un file.tif
    alla posizione del contatore va avanti
        ret = IpWsLoad(NomeFile,"tif")           'carica file
        ret = IpWsChangeInfo(INF_DPIX, 254)      'cambia risoluzione a 200 dpi
        ret = IpWsChangeInfo(INF_DPIY, 254)
        Debug.Print NomeFile

        If InStr(NomeFile, ".TIF")>0 Then Mid$(NomeFile, InStr(NomeFile, ".TIF")) = ".jpg"
        If InStr(NomeFile, ".Tif")>0 Then Mid$(NomeFile, InStr(NomeFile, ".Tif")) = ".jpg"
        If InStr(NomeFile, ".tif")>0 Then Mid$(NomeFile, InStr(NomeFile, ".tif")) = ".jpg"

        If InStr(NomeFile, "US")>0 Then Mid$(NomeFile, InStr(NomeFile, "US")) = "us"

        ret = IpWsSaveAs(NomeFile, ".jpg")      'salva file compresso
        ret = IpDocClose()                       'chiude file
        Debug.Print NomeFile
        FileN = FileN + 1                        'incrementa contatore files
        FileOK = IpStSearchDir ("D:\Comprimende\", "*.tif", FileN, NomeFile)
Loop
Debug.Print FileOK
End Sub

Sub converti_JPG_to_JPG()

' to process a complete directory, convert from .jpg to .jpg
Dim FileN As Integer
Dim FileOK As Integer
Dim Posizione As Integer
Dim Tempo As Integer
Dim NomeFile As String * 250

FileN = 0                                     'inizializza
contatore files
FileOK = IpStSearchDir ("D:\Comprimende\", "*.jpg", FileN, NomeFile)
Do While FileOK=1                               'se c'è un file.tif
    alla posizione del contatore va avanti
        ret = IpWsLoad(NomeFile, ".jpg")        'carica file
        'ret = IpWsChangeInfo(INF_DPIX, 254)    'cambia risoluzione a 200 dpi
        'ret = IpWsChangeInfo(INF_DPIY, 254)
        Debug.Print NomeFile

```

```

        ret = IpWsSaveAs(NomeFile,"jpg") ' salva file compresso
        ret = IpDocClose() ' chiude file
        Debug.Print NomeFile
        FileN = FileN + 1 ' incrementa contatore files
        FileOK = IpStSearchDir ("D:\Comprimende\", "* .jpg", FileN, NomeFile)
Loop
Debug.Print FileOK
End Sub

Sub compress_TIF_to_TIFandJPG__changeDPI
' to process a complete directory, convert from .tif to .tif compressed, and to jpg in a new file
Dim FileN As Integer
Dim FileOK As Integer
Dim NomeFile As String * 250

FileN = 0 'inizializza
contatore files
FileOK = IpStSearchDir ("D:\Lucio\Ferrari\_immagini_Tiff\", "*.tif", FileN, NomeFile)
Do While FileOK=1 'se c'è un file.tif
alla posizione del contatore va avanti
        ret = IpWsLoad(NomeFile,"tif") 'carica file
        If InStr(NomeFile,"US")>0 Then Mid$(NomeFile,InStr(NomeFile,"US")) = "us"

        ret = IpWsChangeInfo(INF_DPIX, 254) 'cambia risoluzione a 100 dpi, 200,
254(=10p/mm), 508(=20p/mm)
        ret = IpWsChangeInfo(INF_DPIY, 254)

        ret = IpWsSaveEx(NomeFile,"tif",6,8) ' salva file compresso TIF LZW

        If InStr(NomeFile,".TIF")>0 Then Mid$(NomeFile,InStr(NomeFile,".TIF")) = ".jpg"
        If InStr(NomeFile,".Tif")>0 Then Mid$(NomeFile,InStr(NomeFile,".Tif")) = ".jpg"
        If InStr(NomeFile,".tif")>0 Then Mid$(NomeFile,InStr(NomeFile,".tif")) = ".jpg"

        ret = IpWsSaveAs(NomeFile,"jpg") ' salva file compresso JPEG
        ret = IpAppCloseAll() ' chiude file
        Debug.Print NomeFile
        FileN = FileN + 1 ' incrementa contatore files
        FileOK = IpStSearchDir ("D:\Comprimende\", "*.tif", FileN, NomeFile)
Loop
Debug.Print FileOK

End Sub

Sub converti_TIF_to_JPG_ruota180()

' test to process a complete directory, convert from .tif to .jpg
Dim FileN As Integer
Dim FileOK As Integer
Dim Posizione As Integer
Dim Tempo As Integer
Dim NomeFile As String * 250

FileN = 0 'inizializza
contatore files

```

```

FileOK = IpStSearchDir ("d:\comprimende\", "*.tif", FileN, NomeFile)
Do While FileOK=1                                     'se c'è un file.tif
alla posizione del contatore va avanti
    ret = IpWsLoad(NomeFile,"tif")                    'carica file originale, completo di
percorso
    ' ret = IpWsChangeInfo(INF_DPIX, 200)             'cambia risoluzione a 200 dpi
    ' ret = IpWsChangeInfo(INF_DPIY, 200)
    ret = IpWsRotate(180, 0)                          ' ruota di 180      *****
    Debug.Print NomeFile; " ";

    If InStr(NomeFile, ".TIF")>0 Then Mid$(NomeFile, InStr(NomeFile, ".TIF")) = ".jpg"
    If InStr(NomeFile, ".Tif")>0 Then Mid$(NomeFile, InStr(NomeFile, ".Tif")) = ".jpg"
    If InStr(NomeFile, ".tif")>0 Then Mid$(NomeFile, InStr(NomeFile, ".tif")) = ".jpg"

    If InStr(NomeFile, "US")>0 Then Mid$(NomeFile, InStr(NomeFile, "US")) = "us"

    ret = IpWsSaveAs(NomeFile, ".jpg")                ' salva file compresso
    ret = IpDocClose()                                ' chiude file ruotato
*****
    ret = IpDocClose()                                ' chiude file originale
    Debug.Print NomeFile
    FileN = FileN + 1                                  ' incrementa contatore files
    FileOK = IpStSearchDir ("d:\comprimende\", "*.tif", FileN, NomeFile)
Loop
Debug.Print FileOK
End Sub

Sub converti_TIF_to_JPG_MultiDir()

' test to process a complete directory, convert from .tif to .jpg
Dim FileN As Integer
Dim FileOK As Integer
Dim Posizione As Integer
Dim Tempo As Integer
Dim NomeFile As String * 250
Dim DirNome As String * 256

Open "D:\Comprimende\_lista_DirComprimende.txt" For Input As #2
Debug.Print "File Aperto"
While Not EOF(2)                                     ' il file con i nomi delle directories sin cui lavorare
    ret = IpAppCloseAll( )
    Input #2, DirNome                                 ' LEGGE NOME DIRECTORY
    DirNome= "D:\Comprimende\"+Trim(DirNome)+"\"
    Debug.Print DirNome

    FileN = 0
    'inizializza contatore files
    FileOK = IpStSearchDir (Trim(DirNome), "*.tif", FileN, NomeFile)
    Debug.Print FileOK

    Do While FileOK=1                                 'se c'è un
file.tif alla posizione del contatore va avanti
        ret = IpWsLoad(NomeFile,"tif")                'carica file
        ' ret = IpWsChangeInfo(INF_DPIX, 200)          'cambia risoluzione a 200 dpi
        ' ret = IpWsChangeInfo(INF_DPIY, 200)

```

```

        Debug.Print NomeFile

        If InStr(NomeFile, ".TIF") > 0 Then Mid$(NomeFile, InStr(NomeFile, ".TIF")) = ".jpg"
        If InStr(NomeFile, ".Tif") > 0 Then Mid$(NomeFile, InStr(NomeFile, ".Tif")) = ".jpg"
        If InStr(NomeFile, ".tif") > 0 Then Mid$(NomeFile, InStr(NomeFile, ".tif")) = ".jpg"

        If InStr(NomeFile, "US") > 0 Then Mid$(NomeFile, InStr(NomeFile, "US")) = "us"

        ret = IpWsSaveAs(NomeFile, ".jpg") ' salva file compresso
        ret = IpDocClose() ' chiude file
        Debug.Print NomeFile
        FileN = FileN + 1 ' incrementa contatore files
        FileOK = IpStSearchDir (Trim(DirNome), "*.tif", FileN, NomeFile)
    Loop
    Debug.Print FileOK

Wend
Close #2 ' chiude file da cui ha letto lista directory
End Sub

Option Explicit
Sub imposta_DPI_resize_all_Directory()
' test to process a complete directory, convert from .tif to .tif compressed
Dim FileN As Integer
Dim FileOK As Integer
Dim NomeFile As String * 255

FileN = 0 'inizializza
contatore files
FileOK = IpStSearchDir ("D:\Comprimende\", "*.jpg", FileN, NomeFile)
Do While FileOK=1 'se c'è un file.tif
    alla posizione del contatore va avanti
        ret = IpWsLoad(NomeFile, ".jpg") 'carica file
        ret = IpWsChangeInfo(INF_DPIX, 200) 'cambia risoluzione a 200 dpi
        ret = IpWsChangeInfo(INF_DPIY, 200)
        ret = IpWsScale(640, 512, 0)
        ret = IpWsSaveAs(NomeFile, ".jpg") ' salva file compresso
        ret = IpDocClose() ' chiude file
        Debug.Print NomeFile
        FileN = FileN + 1 ' incrementa contatore files
        FileOK = IpStSearchDir ("D:\Comprimende\", "*.jpg", FileN, NomeFile)
    Loop
    Debug.Print FileOK
End Sub

Sub Insert_5_stripes
' test to process a complete directory, convert from .tif/jpg to .jpg compressed
' OVERWRITES original images
Dim FormatoImmagine As String * 3 ' per definire il tipo di immagini da leggere, tif o jpg, TRE
CARATTERI
Dim FileN As Integer
Dim FileOK As Integer
Dim NomeFile As String * 255

```

```

FormatoImmagine = "jpg"          ' sezione dati di default
'      FormatoImmagine = "tif"      ' sezione dati di default

FileN = 0                        'inizializza
contatore files
If FormatoImmagine = "jpg" Then FileOK = IpStSearchDir ("D:\Comprimende\", "*.jpg", FileN,
NomeFile)
If FormatoImmagine = "tif" Then FileOK = IpStSearchDir ("D:\Comprimende\", "*.tif", FileN, NomeFile)

Do While FileOK=1                'se c'è un file.tif
alla posizione del contatore va avanti
    If FormatoImmagine = "jpg" Then ret = IpWsLoad(NomeFile,"jpg")
    'carica file JPG
    If FormatoImmagine = "tif" Then ret = IpWsLoad(NomeFile,"jpg")      'carica
file TIF
    'ret = IpWsChangeInfo(INF_DPIX, 100)      'cambia risoluzione a 100 dpi
    'ret = IpWsChangeInfo(INF_DPIY, 100)

    ret = IpWsRotate(90, 0)      ' ruota l'immagine

'qui si crea l'AOI e si cancella la striscia
Pts(0).x = 20                    'cambia QUI
Pts(0).y = 0
Pts(1).x = Pts(0).x + 8
Pts(1).y = 0
Pts(2).x = Pts(0).x + 8
Pts(2).y = 1023                  'cambia QUI
Pts(3).x = Pts(0).x
Pts(3).y = Pts(2).y
ret = IpAoiCreateIrregular(Pts(0), 4)
ret = IpWsFill(0, 2, 0)

Pts(0).x = Pts(0).x + 100
Pts(1).x = Pts(0).x + 8
Pts(2).x = Pts(0).x + 8
Pts(3).x = Pts(0).x
ret = IpAoiCreateIrregular(Pts(0), 4)
ret = IpWsFill(0, 2, 0)

Pts(0).x = Pts(0).x + 100
Pts(1).x = Pts(0).x + 8
Pts(2).x = Pts(0).x + 8
Pts(3).x = Pts(0).x
ret = IpAoiCreateIrregular(Pts(0), 4)
ret = IpWsFill(0, 2, 0)

Pts(0).x = Pts(0).x + 100
Pts(1).x = Pts(0).x + 8
Pts(2).x = Pts(0).x + 8
Pts(3).x = Pts(0).x
ret = IpAoiCreateIrregular(Pts(0), 4)
ret = IpWsFill(0, 2, 0)

Pts(0).x = Pts(0).x + 100

```

```

Pts(1).x = Pts(0).x + 8
Pts(2).x = Pts(0).x + 8
Pts(3).x = Pts(0).x
ret = IpAoiCreateIrregular(Pts(0), 4)
ret = IpWsFill(0, 2, 0)

Pts(0).x = Pts(0).x + 100
Pts(1).x = Pts(0).x + 8
Pts(2).x = Pts(0).x + 8
Pts(3).x = Pts(0).x
ret = IpAoiCreateIrregular(Pts(0), 4)
ret = IpWsFill(0, 2, 0)

ret = IpAoiShow(FRAME_NONE)

ret = IpWsScale(464, 512, 0)           'cambia dimensioni in pixels
' ret = IpWsScale(448, 496, 0)       'cambia dimensioni in pixels
' ret = IpWsScale(448, 464, 0)       'cambia dimensioni in pixels

ret = IpWsChangeInfo(INF_DPIX, 320)   'cambia risoluzione a 100 dpi, 200,
254(=10p/mm), 508(=20p/mm)
ret = IpWsChangeInfo(INF_DPIY, 320)   ' 320 va bene per copiare in excell

ret = IpWsSaveAs(NomeFile,"jpg")     ' salva file compresso
ret = IpDocClose()                   ' chiude file
ret = IpDocClose()                   ' chiude file
ret = IpDocClose()                   ' chiude file
Debug.Print NomeFile
FileN = FileN + 1                     ' incrementa contatore files
If FormatoImmagine = "jpg" Then FileOK = IpStSearchDir ("D:\Comprimende\", "*.jpg", FileN,
NomeFile)
If FormatoImmagine = "tif" Then FileOK = IpStSearchDir ("D:\Comprimende\", "*.tif", FileN,
NomeFile)
Loop
Debug.Print FileOK
End Sub

```

Appendice B

Le relazioni di Maxwell & Bonnell

Le equazioni impiegate da Maxwell & Bonnell ,per portare le curve di distillazione a pressione ambiente a condizioni sub-atmosferiche e viceversa, sono le seguenti [15] :

$$A = \frac{5.143222 - 0.972546 \log_{10} P}{2579.329 - 95.76 \log_{10} P}$$

$$AET = \frac{748.1A}{[1/(T + 273.1)] + 0.3861A - 0.00051606} - 273.1$$

Con AET = temperatura equivalente atmosferica (°C)

P = pressione (kPa)

Nota la temperatura atmosferica dalle curve di distillazione, ricaviamo la T, temperatura alle condizioni sub-atmosferiche.

Le curve di distillazione ottenute sono le seguenti:

