

CAPITOLO 1

Iniezione diretta nei motori ad accensione comandata

1.1 La storia dell'iniezione

L'iniezione, nell'ambito dei motori ad accensione comandata, ha avuto la sua prima importante applicazione in campo aeronautico. Con questo tipo di alimentazione si poteva infatti garantire il corretto funzionamento in volo, eliminando i problemi tipici del carburatore elementare; l'iniezione scongiurava il pericolo di formazione di ghiaccio nella zona della valvola a farfalla, permetteva di regolare correttamente il titolo della miscela al variare della quota, era compatibile con le frequenti e repentine variazioni di assetto dei velivoli militari. Per risolvere questi problemi erano state sviluppate due soluzioni: quella americana e quella tedesca. Gli aerei americani erano dotati di carburatore ad iniezione, che in pratica costituiva un sistema di iniezione indiretta con portata regolata mediante membrane, con il quale veniva iniettato il combustibile nel collettore di aspirazione; la soluzione tedesca prevedeva invece un sistema di iniezione diretta.

Dopo la seconda guerra mondiale l'iniezione è stata introdotta anche in ambito automobilistico con il motore da competizione Mercedes-Benz W196. Questa applicazione come illustrato nelle figure 1.1 e 1.2, utilizzava un sistema di iniezione diretta.

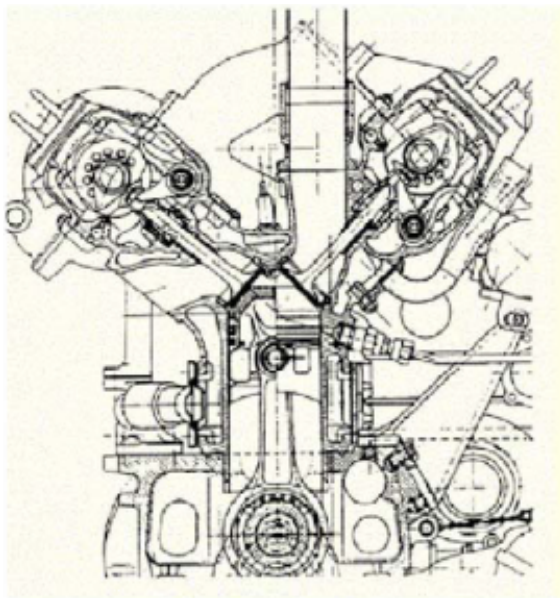


Fig. 1.1: Motore Mercedes W196

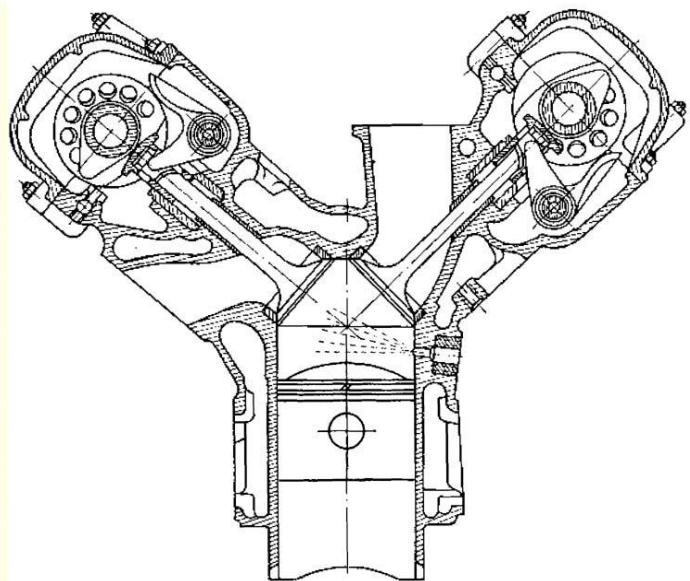


Fig. 1.2: Particolare della testata: si noti l'iniettore

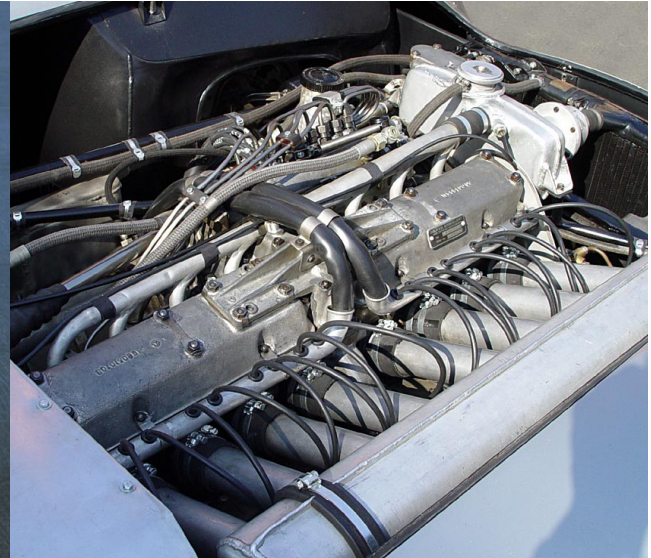
usato in Formula Uno.

posizionato direttamente in camera di combustione.

Tale sistema di alimentazione, derivato dal sistema Bosch, impiegato nei motori ad accensione spontanea, fu successivamente ripreso nel 1956 con la produzione del modello stradale 300SL (figure 1.3 e 1.4).



Fig. 1.3: Mercedes 300 SL (1956).



*Fig. 1.4: Motore montato sulla Mercedes 300 SL:
si noti la pompa di iniezione in linea.*

La Mercedes continuò a sviluppare sistemi di iniezione, orientandosi però verso la soluzione indiretta a causa degli inconvenienti che presentava l'iniezione diretta; in primo luogo infatti le alte pressioni, a cui doveva essere iniettato il fluido per poter vaporizzare in un minore tempo, necessitavano la costruzione di pompe con giochi molto stretti per evitare trafileamenti; ma questo comportava dei problemi perché la benzina ha scarse proprietà lubrificanti, a differenza del gasolio, per cui spesso si poteva giungere al grippaggio della pompa. Il problema del grippaggio si presentava poi anche nel cilindro a causa del fatto che la pressione di iniezione che si riusciva ad ottenere, anche in relazione a quanto detto prima, non permetteva comunque una buona vaporizzazione; si aveva così un elevato "impingement" che andava a lavare via il lubrificante dalle pareti, oltre che produrre idrocarburi incombusti. E' necessario ricordare poi che questi fenomeni non potevano essere previsti ed analizzati all'epoca mediante simulazioni CFD, per cui non era chiaro il motivo dei malfunzionamenti indotti dall'iniezione diretta.

Iniettando indirettamente, la pressione di iniezione necessaria è molto più bassa per cui si potevano avere giochi più grandi tra pistoncino e cilindro dell' elemento pompante, scongiurando il pericolo del grippaggio.

Negli stessi anni l'iniezione diretta trovò applicazione anche nei motori a due tempi, con l'obiettivo di ridurre i consumi, in quanto si poteva iniettare alla chiusura delle luci di scarico, evitando così il cortocircuito di miscela carburata allo scarico. La soluzione fu presto abbandonata a causa del notevole costo del sistema di alimentazione rapportato alla semplicità del motore a due tempi dell'epoca.

Solo negli ultimi due decenni è tornato vivo l'interesse per i motori ad iniezione diretta di benzina, grazie fondamentalmente ai progressi compiuti nel campo dell'elettronica e meccatronica, per cui attualmente esistono molte grandi case costruttrici europee e giapponesi che hanno messo in produzione di serie motori con questo tipo di alimentazione.

1.2 Confronto tra iniezione diretta ed indiretta.

Per rendersi conto dei benefici che si possono ottenere con i sistemi di iniezione GDI (Gasoline Direct Injection, fig.1.6), è necessario fare un confronto con i tradizionali sistemi di iniezione indiretta *multipoint* denominati PFI (Port Fuel Injection, fig.1.5). Non vengono presi in considerazione i sistemi *single point*, essendo ormai tecnicamente obsoleti e quindi in disuso. I vantaggi che si ottengono con il motore GDI si possono dividere in due categorie, ovvero:

1. vantaggi intrinseci dell'iniezione diretta
2. vantaggi derivanti dalla possibilità di effettuare la stratificazione della carica.

Questi due aspetti verranno discussi separatamente nei due paragrafi seguenti.

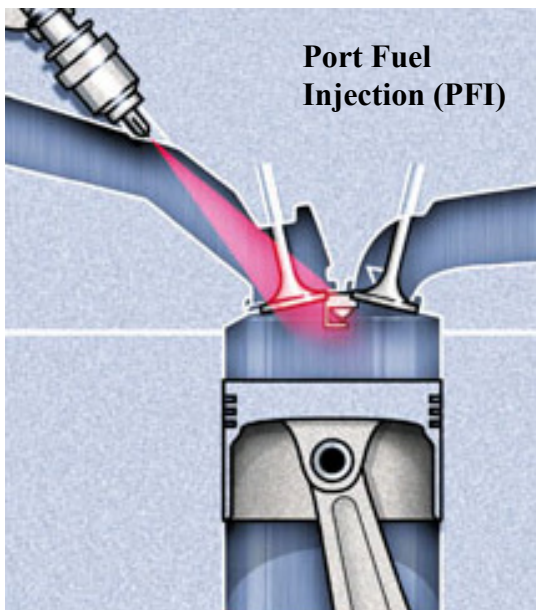


Fig. 1.5: Sistema di iniezione indiretta.

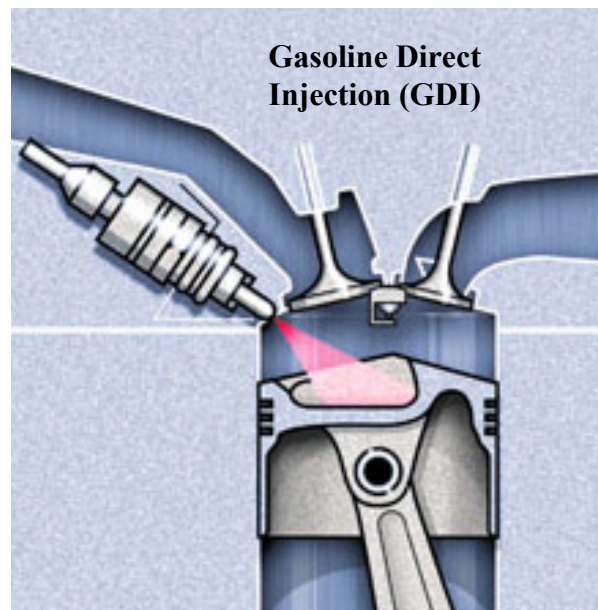


Fig. 1.6: Sistema di iniezione diretta.

1.2.1 Vantaggi intrinseci dell' iniezione diretta.

La sostanziale differenza fra le due soluzioni è il meccanismo di formazione della miscela: nei PFI (fig.1.5) l'iniettore viene posto sul condotto di aspirazione e spruzza la benzina sopra le valvole di aspirazione, nei sistemi GDI (fig.1.6) invece il combustibile viene iniettato direttamente in camera di combustione. Le valvole di aspirazione sono molto più calde rispetto all'aria e alla benzina presenti nel condotto, perché si scaldano durante la combustione e per conduzione con la testata, quindi, nei sistemi PFI il combustibile sottrae calore ad esse invece che all'aria circostante. Nei GDI, al contrario, la benzina mette a disposizione tutto il suo calore latente di evaporazione per sottrarre calore all'aria che sta entrando nel cilindro, con notevoli vantaggi nel funzionamento del motore.

Il primo vantaggio è che il riempimento aumenta perché, a parità di volume si potrà introdurre nel cilindro una maggiore quantità di aria e di conseguenza, rimanendo in condizioni di titolo stechiometrico, una maggiore quantità di benzina in ogni ciclo; il motore GDI erogherà per questo motivo una maggiore potenza rispetto ad un PFI.

La riduzione della temperatura della miscela comporta anche un aumento del rendimento nonché della potenza del motore perché, si riduce la dissociazione, ed aumenta il rapporto tra i calori specifici a pressione e volume costante.

La dissociazione è causata dal fatto che ad alta temperatura i prodotti della combustione, come l'anidride carbonica e l'acqua, non sono stabili ma tendono a dissociarsi mediante reazioni endotermiche, che vanno a diminuire l'entità del calore trasformabile in lavoro; diminuendo la temperatura media a cui si svolge il ciclo, gli equilibri di queste reazioni chimiche sono sempre più spostate verso i reagenti, e di conseguenza la perdita di rendimento associata alla dissociazione si riduce.

Per quanto riguarda i calori specifici C_p e C_v si osserva sperimentalmente questo andamento in funzione della temperatura (fig.1.7):

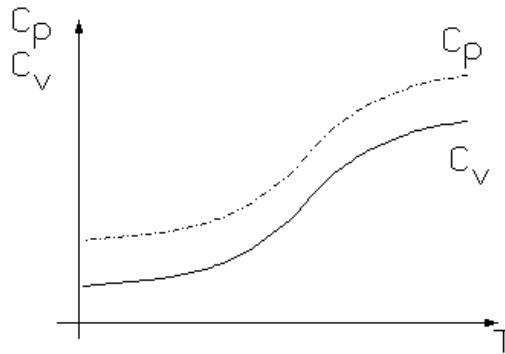


Fig. 1.7: andamento dei calori specifici in funzione della temperatura.

La costante generale dei gas $R=C_p-C_v$ può considerarsi costante con l'aumento della temperatura; pertanto il rapporto k tra i due calori specifici che compare nella 1.1 tende a diminuire con l'aumento della temperatura, con conseguente riduzione del rendimento ideale.

Ulteriori vantaggi si hanno perché vi è una maggiore resistenza alla detonazione.

La detonazione è causata dal fatto che gli end-gas, ovvero la parte della carica destinata ad essere raggiunta per ultima dal fronte di fiamma, si trovano a temperature maggiori di quella di autoaccensione per un tempo superiore al tempo di latenza; diminuendo la temperatura di inizio combustione gli end-gas si troveranno ad una temperatura più bassa e quindi la probabilità che si superi la temperatura di autoaccensione diminuisce.

$$\eta_t = \frac{L}{Q_i} = 1 - \frac{1}{\rho^{k-1}} \quad (1.1)$$

dove:

η_t : rendimento termico ideale;

Q_i : calore introdotto;

ρ : rapporto di compressione

k : rapporto tra i calori specifici a pressione e a volume costante

Diminuendo la tendenza alla detonazione si potrà aumentare il rapporto di compressione e quindi per la 1.1 si avrà un aumento del rendimento termico e perciò anche della potenza del motore.

L'iniezione diretta risulta poi vantaggiosa nel funzionamento del motore a freddo e nelle fasi di transitorio. Con il motore freddo nei PFI parte della benzina, a causa delle basse temperature delle pareti, condensa. Perciò, per mantenere il titolo del vapore costante e per far avviare bene il

motore, è necessario iniettarne una quantità maggiore. Iniettando direttamente in camera di combustione, questo fenomeno non si verifica quindi l'accensione della carica risulta più rapida e sicura. In fase di accelerazione nei motori PFI la pressione nel condotto aumenta repentinamente perché si apre la valvola a farfalla, che ai bassi carichi introduce una significativa perdita di carico. L'aumento della pressione fa depositare sulle pareti in fase liquida parte della benzina che prima era in fase di vapore, così anche in questa circostanza è necessario arricchire. Il controllo del titolo risulta così meno preciso rispetto ad un GDI.

I problemi maggiori nella fase di transitorio, per i motori PFI, si hanno in fase di decelerazione. A causa della brusca chiusura della farfalla si ha una diminuzione di pressione che fa aumentare l'evaporazione del film liquido presente nel condotto; in camera di combustione entrerà così una miscela ricca che dà luogo a idrocarburi incombusti. Con un motore ad iniezione diretta questo problema non si verifica per cui si avrà, in queste condizioni di funzionamento, una riduzione degli inquinanti rispetto ai PFI.

1.2.2 Vantaggi derivanti dalla stratificazione della carica.

L' iniezione diretta, oltre ai vantaggi presentati nel paragrafo precedente, rende possibile la stratificazione della carica, ovvero di distribuire in maniera non uniforme il titolo in camera di combustione. Il rapporto aria/combustibile dovrà essere più basso nelle immediate vicinanze della candela e più elevato allontanandosi da essa, fino ad avere eventualmente zone con sola aria. E' possibile realizzare la stratificazione della carica sia con miscele complessivamente stechiometriche (carica semistratificata) sia con miscele povere.

La stratificazione con miscele stechiometriche si effettua con due iniezioni nello stesso ciclo. Una prima iniezione durante la fase di aspirazione dove si inietta il quantitativo maggiore della benzina; la seconda frazione del combustibile (15-20%) si inietta invece in fase di compressione in modo da avere vicino alla candela una zona più ricca. Si ottengono con questa strategia i seguenti vantaggi:

- diminuisce la dispersione ciclica del motore perché la combustione ha un inizio più sicuro e stabile;
- La combustione è più rapida perché la sottofase iniziale di innesco è più breve grazie ad una più favorevole cinetica chimica, quindi l'introduzione di calore si avvicina di più ad un isovolumica, per cui si avrà un rendimento più elevato.

- Diminuisce la tendenza alla detonazione per due motivi: in primo luogo perché, durando meno la combustione, gli “end gas” sono sottoposti ad una temperatura elevata per un tempo minore, quindi diminuisce la probabilità che si superi il tempo di latenza; il secondo motivo è legato al fatto che il titolo non è uniforme in camera di combustione, per cui gli end gas si troveranno in una zona dove la miscela è più povera e perciò saranno meno reattivi. Si potrà avere, adottando questa strategia, un rapporto di compressione maggiore che si traduce in un incremento del rendimento termico.

I vantaggi più significativi in termini di rendimento si ottengono con un motore GDI qualora si realizzi la stratificazione della carica con miscele povere; così facendo si può eliminare la valvola a farfalla e fare una regolazione per qualità e non per quantità, consentendo ai motori ad accensione comandata di ottenere parte dei vantaggi dei motori ad accensione spontanea, senza però soffrire della limitazione sulla velocità di rotazione massima propria di questi ultimi. Si ottengono così tutti i vantaggi dell’iniezione diretta, sommati a quelli della regolazione senza farfalla, che sono:

- minore lavoro perso nel ciclo di pompaggio grazie alla minore perdita di carico all’aspirazione ai bassi carichi. Le perdite che si hanno sono per questo motivo di entità simile a quelle del diesel e non cambiano al variare del carico.
- Temperature di combustione più basse grazie all’elevato eccesso d’aria, quindi, per i motivi spiegati in precedenza, minore tendenza alla detonazione, minore dissociazione, esponente dell’adiabatica k più elevato, rendimento più elevato.
- Ulteriore aumento dell’esponente k dell’adiabatica; oltre al fatto che le temperature sono più basse, questo aumenta anche grazie al più basso rapporto combustibile aria ed al fatto che in camera di combustione rimane intrappolata una quantità minore di gas residui, grazie all’assenza della valvola a farfalla. I calori specifici del grafico di figura 1.7 variano infatti molto di più, con l’aumento della temperatura, per i prodotti della combustione piuttosto che per l’aria, in particolare variano molto quelli dell’acqua.
- Minori scambi termici con le pareti grazie all’elevato eccesso d’aria che riduce la temperatura media della miscela e si interpone durante la combustione tra i gas caldi che stanno bruciando e le pareti.
- E’ possibile mandare in ricircolo una maggiore quantità di gas combusti (Exhaust Gas Recirculation: EGR), con conseguente riduzione delle emissioni di NO_x , grazie al fatto

che, in regime di carica stratificata, la combustione si sviluppa più rapidamente e con maggiore stabilità.

- Regime di rotazione minimo più basso; infatti al minimo in un motore PFI iniettando poca benzina, regolando per quantità, dovrà essere immessa nella camera di combustione anche poca aria, mentre vi sarà una notevole quantità di gas combusti perché vengono richiamati dalla forte depressione che si genera dal restringimento della sezione di passaggio nel condotto. I gas combusti provocano irregolarità di funzionamento e per avere stabilità è necessario parzializzare meno la valvola a farfalla e far girare così il motore più forte. Nei GDI la farfalla è invece completamente aperta al minimo; di conseguenza vi sarà un elevato rapporto gas freschi/gas residui per cui si avrà una minore dispersione ciclica e di conseguenza un minimo più basso e un minore consumo di carburante.

1.2.3 Svantaggi dell'iniezione diretta

Sono stati fin qui elencati solo i vantaggi dei motori GDI ma vi sono, rispetto ai PFI, anche degli svantaggi e delle difficoltà:

- costo dell'impianto molto più elevato a causa delle pressioni di iniezione necessarie decisamente più elevate (uno-due ordini di grandezza in più).
- Si può avere "impingement" sulle pareti in particolare con motore freddo, ovvero delle frazioni di combustibile vanno a depositarsi sulle pareti condensando, rimanendo così allo stato liquido e quindi non bruciando. Si crea così inquinamento dovuto ad idrocarburi incombusti (HC).
- Quando si inietta molto in ritardo, ovvero in avanzata fase di compressione, parte del combustibile può non riuscire ad evaporare in tempo utile per diffondersi, per cui, quando il fronte di fiamma lo incontra, data l'elevata temperatura, si hanno fenomeni di "cracking" con la generazione di particolato sottile.
- Nelle condizioni di funzionamento in cui si effettua la stratificazione della carica l'elevato eccesso d'aria non permette al catalizzatore trivalente convenzionale la riduzione

degli ossidi di azoto; le emissioni di questi saranno così più elevate (se non si adotta un catalizzatore De-Nox).

- Non è possibile con le tecnologie attuali elevare il regime di rotazione di un GDI fino a raggiungere ad esempio i 19000g/min tipici dei motori di Formula Uno, perché non si avrebbe il tempo per vaporizzare e formare la miscela; con i sistemi ad iniezione indiretta si può invece posizionare l'iniettore molto lontano dalle valvole di aspirazione (in genere nei motori da competizioni è collocato all'imbocco della trombetta, dove la velocità dell'aria è massima, ed ad essa coassiale) e iniziare l'iniezione appena si chiudono le valvole nel ciclo precedente, in modo da avere a disposizione un tempo sufficientemente grande anche agli elevatissimi regimi, perché si completi il processo di formazione della miscela.
- Difficoltà di natura tecnologica nella realizzazione della pompa di iniezione, dato che la benzina, avendo una viscosità molto bassa, non lubrifica le parti in movimento.
- Risulta complessa la gestione ed il controllo elettronico delle varie modalità di funzionamento (vedi paragrafo seguente).
- L'ottenimento ed il controllo della stratificazione della carica sono tutt'altro che semplici da realizzare.
- Possibili malfunzionamenti del sistema a causa delle incrostazioni che si formano sugli iniettori.

1.3 Modalità di funzionamento per i motori GDI

I motori ad iniezione diretta sono in grado di funzionare sia in regime di carica omogenea, come quelli ad iniezione indiretta, sia in regime di carica stratificata. Si distinguono così tre principali modalità di funzionamento in relazione al carico che si realizza:

- pieno carico;
- carichi medi o medio-bassi;
- bassi carichi.

Queste condizioni di funzionamento verranno analizzate nei prossimi tre paragrafi.

1.3.1 Pieno carico.

A pieno carico si effettua *l'iniezione anticipata*. Il combustibile viene iniettato già durante la fase di aspirazione, in modo da avere in camera una miscela omogenea stechiometrica o leggermente ricca per ottenere la massima potenza, come avviene nei motori PFI (questa strategia viene mantenuta in ogni condizione di carico nel caso di motori ad iniezione indiretta). Come già detto in precedenza anche a pieno carico si può realizzare la carica semistratificata.

1.3.2 Carichi medi o medio-bassi.

In condizione di carico medio-basso si realizza la carica semistratificata: in camera è presente ovunque miscela aria/combustibile, la quale è tanto più ricca quanto più è vicina agli elettrodi della candela; in questo modo è possibile accendere una miscela con rapporto A/F anche piuttosto alto.

1.3.3 Bassi carichi.

Ai bassi carichi si effettua *l'iniezione ritardata*. Il combustibile è immesso in camera nella fase di compressione e, grazie alle condizioni fluidodinamiche nel cilindro, si realizza la stratificazione della carica: miscela stechiometrica o leggermente ricca in prossimità degli elettrodi della candela e titolo decrescente allontanandosi da essa, fino ad avere zone con sola aria.

È opportuno precisare che il tempo a disposizione per il completamento di tale processo di stratificazione della carica è critico. Infatti, dall'istante in cui termina l'iniezione a quello dell'accensione, il combustibile deve essere introdotto in camera, evaporare e miscelarsi con l'aria dando luogo a carica stratificata. La fluidodinamica interna, la geometria della camera di combustione e la tipologia di iniettore utilizzato risultano determinanti; occorrono studi accurati per raggiungere risultati soddisfacenti.

1.4 Iniettori per GDI

La scelta del tipo di iniettore da utilizzare è strettamente legata al disegno della camera di combustione, alla forma dei condotti di aspirazione e alla necessità o meno di realizzare la stratificazione della carica.

Gli iniettori adatti ai motori con iniezione diretta si possono suddividere, sotto il punto di vista funzionale, in tre categorie (fig.1.8):

- iniettori *Swirl*.
- Iniettori *Pintle*.
- Iniettori *Multiforo*.

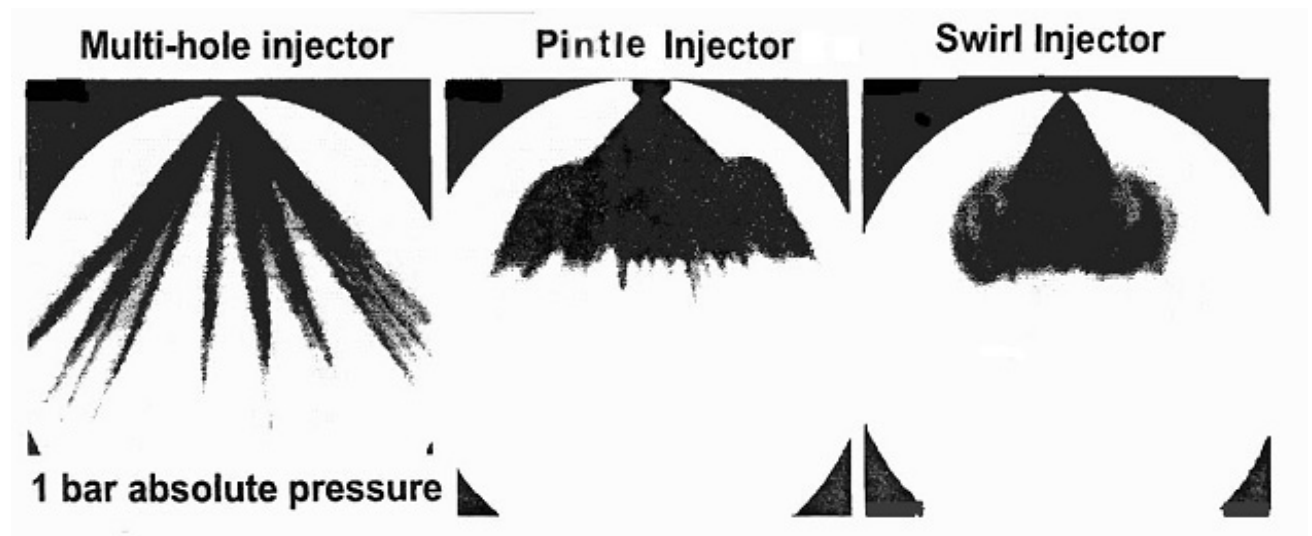


Fig. 1.8: Immagini dello spray prodotte da i vari tipi di iniettori ottenute mediante fotocamera ad alta velocità (pressione ambiente di iniezione:1 bar)

1.4.1 Iniettore Swirl

Gli iniettori di tipo *swirl* sono costituiti da una piastrina circolare dotata di camere tangenziali di adduzione del liquido (figura 1.9-1.10) , per imprimere al combustibile un moto rotatorio attorno all'asse dell'iniettore. Il liquido viene messo in comunicazione con la camera di combustione grazie ad un attuatore elettromagnetico che tira verso l'alto rispetto al cilindro lo spillo centrale. All'uscita dell'iniettore il liquido assume una forma conica, con il cono vuoto al suo interno (*hollow cone*); il moto rotatorio dello spray permette una buona polverizzazione della benzina

anche con pressioni di iniezione relativamente basse; l'apertura di questo cono risente sensibilmente della pressione dell'ambiente di iniezione (l'angolo di apertura esterno varia tra 45° e 115° , quello interno tra 20° e 65°).

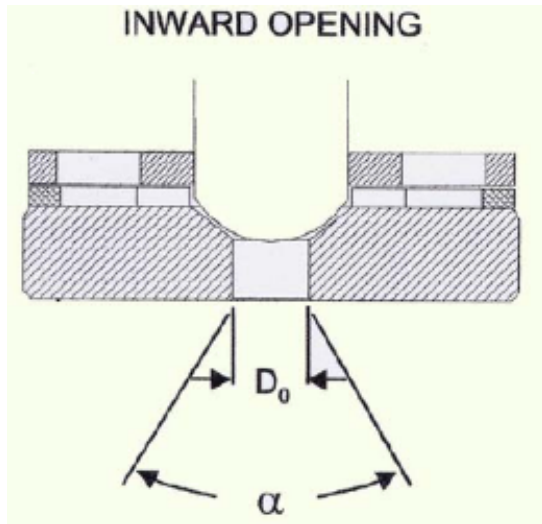


Fig. 1.9: Iniettore swirl.

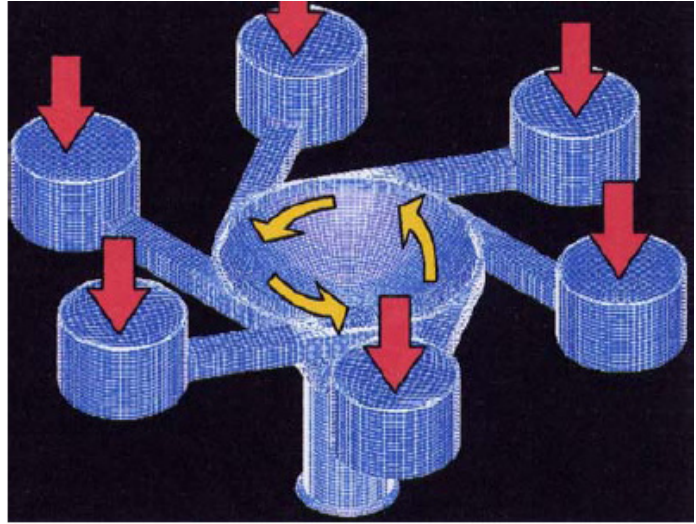


Fig. 1.10: Evoluzione del fluido all'interno della camera di swirl.

L'apertura dipende inoltre dalla quantità di benzina da iniettare, ovvero ai bassi carichi, con poca benzina, lo spray tende ad essere molto più chiuso. Infatti la camera di "swirl" occupa un certo volume, per cui, iniettando poca benzina, buona parte è quella che era rimasta intrappolata nella camera nel ciclo precedente. Questo fluido rimasto dentro ha ormai perso il moto rotatorio, quindi, lo spray tenderà ad uscire dall'ugello come una lamina senza aprirsi; le particelle di liquido difatti, non ruotando, non saranno soggette alla forza centrifuga che è responsabile dell'apertura del cono.

Al fine di produrre la stratificazione, questo tipo di iniettori viene generalmente posto in posizione laterale alla camera di combustione, ed è abbinato a particolari geometrie del cielo dello stantuffo e talvolta a condotti di aspirazione di forma non convenzionale.

1.4.2 Iniettore Pintle

Gli iniettori di tipo *Pintle*, a differenza degli *swirl*, si aprono verso l'esterno come una valvola a fungo e questo li rende particolarmente adatti ad un'attuazione di tipo piezoelettrica, perché

richiedono un'alzata molto piccola, dell'ordine di qualche decina di micron, e forze di attuazione più elevate.

La sezione di passaggio del fluido è troncoconica e l'efflusso nelle immediate vicinanze della zona di uscita è costituito da una sottilissima lamina liquida che genera un cono vuoto all'interno, molto più stabile degli iniettori di tipo *swirl* perché la forma dello spray che si produce è legata alla geometria della punta dell'iniettore (fig.1.11),

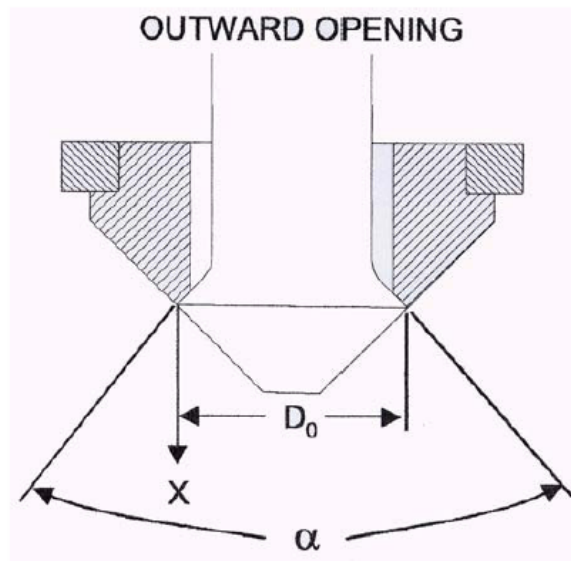


Fig. 1.11: Geometria della punta di un iniettore Pintle.

L'angolo di apertura (variabile tra 70 e 90 gradi), al contrario degli iniettori *swirl*, è costante lungo tutto lo sviluppo dello spray ed al variare delle condizioni operative, mentre la penetrazione è fortemente dipendente dalla pressione dell'ambiente in cui si inietta.

L'attuazione viene effettuata tramite strati di materiale piezoelettrico, disposti a formare una colonna che, se sottoposta a tensione, si allunga di pochi micron generando una spinta dell'ordine dei 2000N. L'utilizzo di attuatori piezoelettrici comporta dei grossi problemi causati dall'isteresi ed alla dilatazione termica del materiale che impone l'utilizzo di un complicato sistema idraulico di compenso (vedi fig. 1.12).

Il costo è assai più elevato rispetto all'iniettore *swirl* ma si ottengono dei vantaggi sensibili, in particolare si riesce ad avere dei tempi di risposta incredibilmente bassi (dell'ordine di 50 microsecondi), inferiori di un ordine di grandezza agli iniettori *swirl*.

Questo consente, elevando la pressione di iniezione oltre i 10 MPa, di ottenere una fine polverizzazione anche iniettando in avanzata fase di compressione, con una nuvola di benzina

stabile; l'iniettore *pintle* con azionamento piezoelettrico è pertanto il più idoneo alla realizzazione della stratificazione della carica.

Questo tipo di iniettore è in fase avanzata di studio e non è stato applicato al momento alla produzione di serie di motori GDI, mentre l'attuazione piezoelettrica è stata impiegata con successo negli iniettori per i motori ad accensione spontanea.

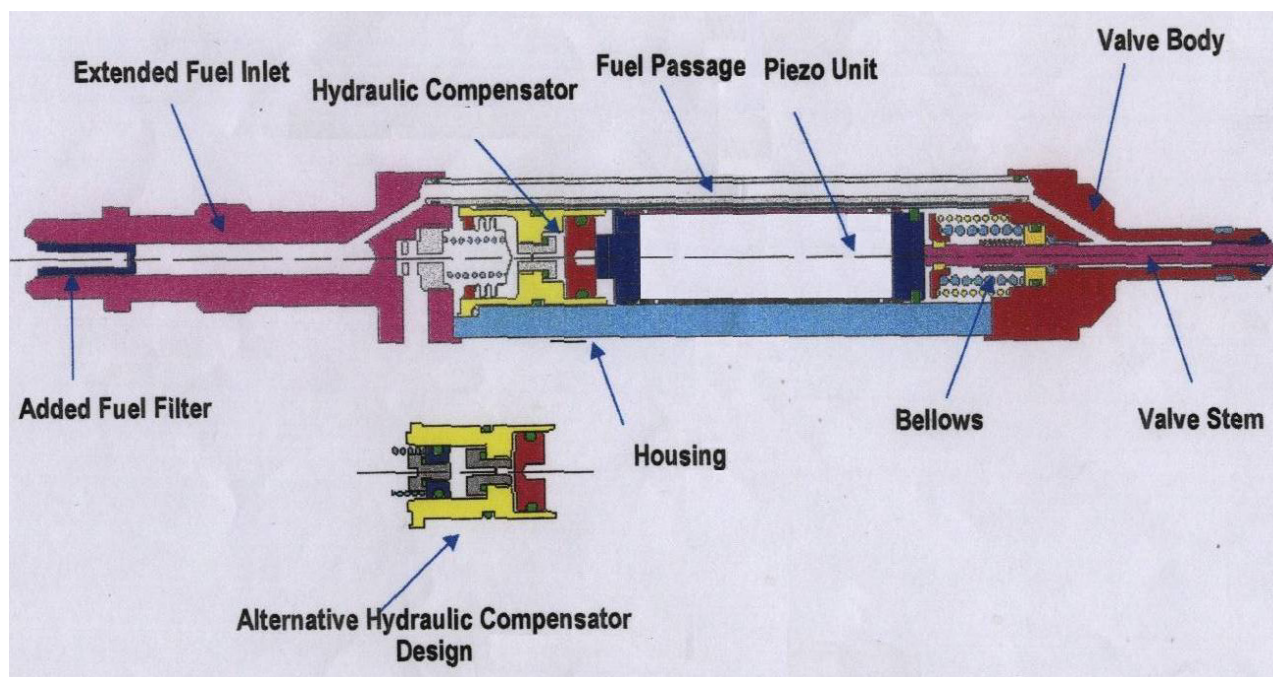


Fig. 1.12: Iniettore Pintle.

Come verrà mostrato in questo studio, anche per l'iniettore *pintle* è opportuno adottare una camera di combustione appositamente studiata.

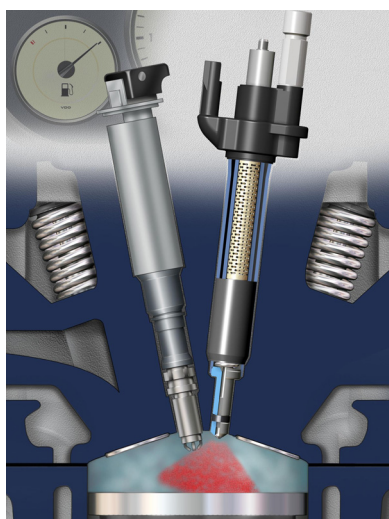


Fig. 1.13: Iniettore Pintle con azionamento piezoelettrico (Siemens VDO).

1.4.3 Iniettore Multiforo

È dotato di un unico foro chiuso da un ago che fa capo ad un sac dotato di fenditure in numero variabile tra 3 e 5, ognuna delle quali produce uno spray conico molto chiuso in una certa direzione.

La qualità della polverizzazione dipende dal numero e dal diametro dei fori, ma è comunque inferiore a quella degli iniettori precedentemente menzionati, anche se permette di ottenere una grande varietà nella forma dello spray in relazione al posizionamento e all'orientamento dei fori, permettendo di adattare l'iniettore alla camera di combustione. La nota dolente di questa tipologia è l'elevata sensibilità alla formazione di depositi carboniosi, che altera il funzionamento tanto di più quanto il diametro dei fori è piccolo.

1.5 Metodi per realizzare la stratificazione della carica

I metodi per realizzare la stratificazione della carica si dividono in tre grandi categorie (fig.1.14):

- *wall guided spray;*
- *air guided spray;*
- *spray guided.*

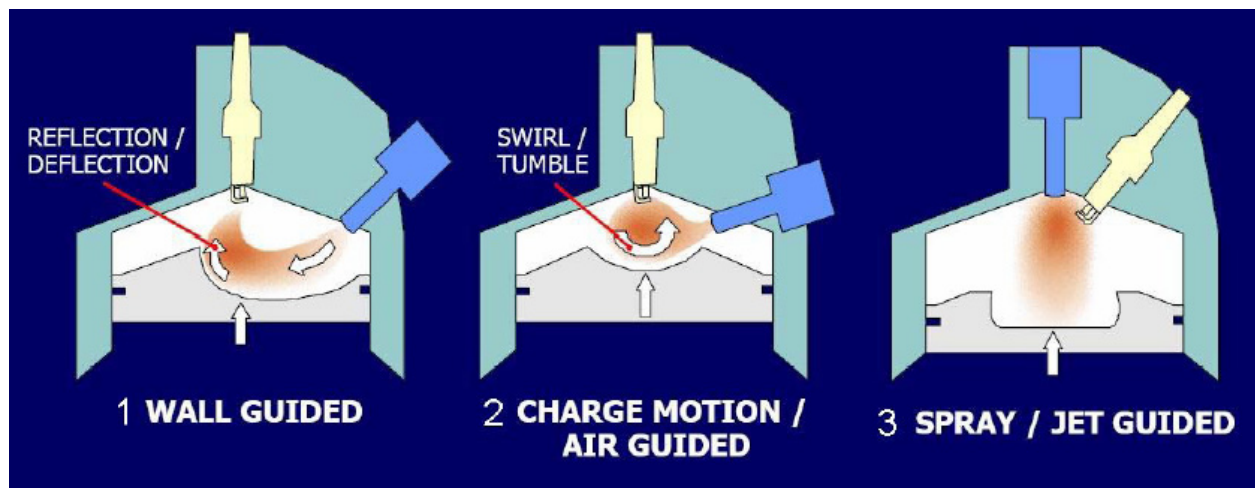


Fig. 1.14: Metodi per realizzare la stratificazione della carica

La distinzione tra queste soluzioni è puramente teorica e spesso non è possibile classificare un caso reale in una singola categoria, ma in un ibrido fra i tre metodi.

Nella soluzione *wall guided*, lo spray viene guidato dalle superfici della camera di combustione, in particolare da quelle del pistone. Iniettando in fase di compressione, la benzina viene indirizzata verso le pareti dello stantuffo e convogliata da esso verso gli elettrodi della candela. Questo metodo ammette quindi *impingement* sulle pareti con tutti gli svantaggi che ne derivano; in particolare si avrà un'elevata concentrazione allo scarico di idrocarburi incombusti perché la benzina toccando le pareti si raffredda e difficilmente si riesce ad avere un'evaporazione completa, specie a motore freddo.

La soluzione *air-guided* nasce per risolvere i problemi del metodo precedente, infatti si cerca di interporre uno strato d'aria tra le pareti e lo spray in modo da evitare il contatto diretto.

Lo spray quindi verrà guidato dai moti dell'aria in camera di combustione, per cui è necessario prevedere e controllare correttamente l'entità degli stessi in modo da garantire una stratificazione stabile. La soluzione *air-guided* è molto difficile da mettere in pratica ed in generale si avrà sempre un ibrido con il sistema *wall guided*, ovvero in parte lo spray sarà guidato dai moti dell'aria ed in parte dalle pareti.

Con il metodo *spray guided* in teoria si dovrebbe ottenere un autoconfinamento da parte dello spray. L'iniettore per realizzare questo tipo di stratificazione dovrà necessariamente essere di tipo *pintle* o *multiforo* per generare uno spray stabile e insensibile ai moti dell'aria. In realtà, come verrà mostrato in questa tesi per l'iniettore *pintle*, anche questi tipi di iniettore risentono dei campi di moto presenti in camera di combustione per cui è preferibile adottare una soluzione mista *spray-air-guided*.

Tutti i metodi illustrati si riferiscono al meccanismo di formazione della carica stratificata, ma è importante sottolineare che questa deve poi mantenersi e non essere influenzata troppo dai violenti moti provocati dalla combustione. Le soluzioni *wall-air-guided* per poter essere realizzate richiedono necessariamente una camera di combustione opportuna che garantisca anche una buona stabilità della carica stratificata; la soluzione *spray-guided* invece può essere messa in atto anche con geometrie convenzionali: posizionando correttamente l'iniettore e la candela in camera di combustione, si riesce ad ottenere una buona stratificazione attorno alla candela e quindi una buona accensione anche ai bassi carichi, ma i moti provocati dalla combustione in una camera aperta vanno ad influenzare in maniera sensibile la stratificazione, provocando uno sparpagliamento della benzina che porta inevitabilmente ad una combustione più lenta o incompleta. Quindi, anche in relazione al fatto che gli iniettori *pintle* sono più costosi rispetto a quelli *swirl*, è giustificato abbinare alla soluzione *spray-guided* una geometria opportuna della camera di combustione che permetta di mantenere la stratificazione anche in fase

di combustione, per poter ottenere delle prestazioni superiori, in termini di rendimento, potenza specifica ed emissioni inquinanti.

1.6 Impianto GDI

Oltre al diverso tipo di iniettore e al posizionamento di esso direttamente in camera di combustione, l'impianto di un motore GDI è dotato anche di altri importanti dispositivi che lo distinguono rispetto ad un PFI. Questi sono: l'elettrovalvola necessaria alla realizzazione dell'EGR (presente anche nei moderni motori PFI, ma indispensabile nei GDI), il catalizzatore de-NOx, la valvola a farfalla servo assistita, la pompa ad alta pressione, la sonda lambda proporzionale (LSU) (vedi figura 1.15). Questi componenti verranno presi in esame nei prossimi paragrafi.

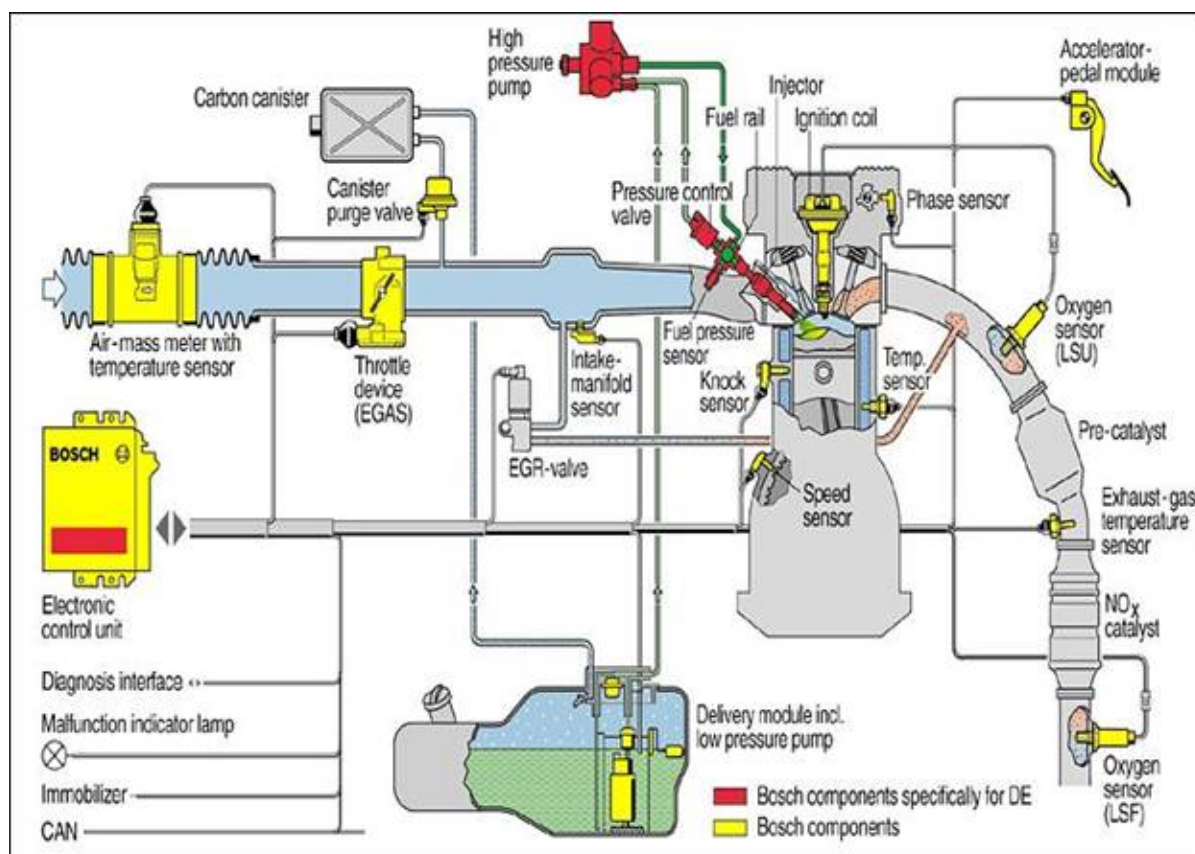


Fig. 1.15: Tipico impianto GDI, Bosch Motronic FSI (fuel stratified injection).

1.6.1 Valvola EGR

Uno dei problemi fondamentali del motore ad iniezione diretta, come precedentemente detto, è l'elevata produzione di ossidi di azoto, perché l'eccesso d'aria che si ha operando con miscele povere non consente al normale catalizzatore trivalente di ridurli. E' necessario sottolineare che un motore GDI emette meno NO_x rispetto ad un motore PFI non catalizzato, grazie al fatto che le temperature in camera di combustione sono più basse, ma molto di più rispetto ad un motore PFI con catalizzatore trivalente.

Gli ossidi di azoto si formano in quanto, alle elevate temperature, l'azoto cessa di essere un gas inerte e partecipa alle reazioni di ossidazione. Questo effetto è amplificato dalle reazioni di dissociazione dei prodotti della combustione, che, sempre ad alta temperatura, mettono a disposizione un'elevata quantità di ossigeno libero. Finché il carico rimane basso e quindi anche le temperature sono basse, la produzione di ossidi di azoto è modesta; ma, superata una certa soglia, è necessario, per poter rispettare le normative, passare repentinamente alla modalità di funzionamento con titolo stechiometrico, in modo da permettere al catalizzatore trivalente di ridurre gli NO_x .

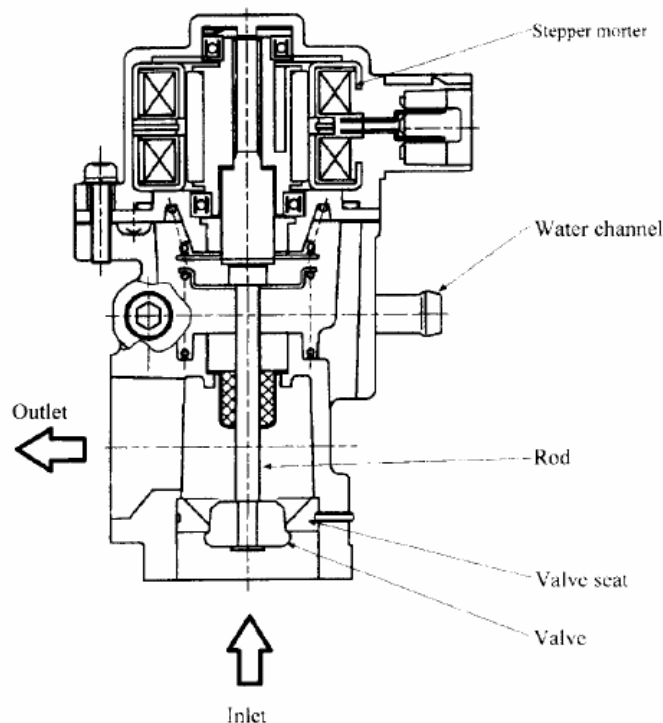


Fig. 1.16: Valvola per il ricircolo dei gas di scarico.

Per poter estendere la regione di funzionamento in carica stratificata si ricorre al ricircolo dei gas di scarico (EGR), che consente di ottenere due effetti positivi sinergici tra loro: in primo luogo i gas combusti sono inerti, per cui queste molecole, interponendosi tra quelle di combustibile e di comburente, rallentano la reazione di combustione localmente diminuendo i picchi di temperatura; il secondo effetto positivo è legato alla riduzione della disponibilità di ossigeno libero proprio perché con l'EGR si sostituiscono parte dei gas freschi con i gas combusti.

Per immettere nel condotto di aspirazione la giusta quantità di gas di scarico da ricircolare, in relazione al carico, al regime di rotazione del motore e al titolo presente in camera di combustione, si rende necessario l'utilizzo della valvola EGR (vedi figura 1.16), che viene attuata da un motore elettrico passo-passo (stepper motor) sotto comando dell'unità di controllo elettronica (ECU).

1.6.2 Il catalizzatore de-NO_x

L'utilizzo del solo EGR non consente di ottenere un regione di funzionamento con miscela povera tale da rendere sensibili i vantaggi derivanti dalla stratificazione della carica, per cui è necessario trattare i gas combusti in modo da ridurre le emissioni di ossidi di azoto. Sono stati quindi sviluppati dei nuovi catalizzatori de-NO_x che permettono la riduzione di questi anche in ambiente ossidante, ovvero in presenza di ossigeno libero allo scarico.

Il de-NO_x contiene platino, palladio, rame e un composto a base di bario (fig.1.17). Quando il motore è alimentato con miscela magra e quindi in eccesso di ossigeno, il monossido di azoto che si forma viene ossidato in biossido di azoto (NO₂) sul platino e, successivamente, è trattenuto sotto forma di nitrato di bario. In conseguenza di ciò il catalizzatore si satura. Quindi, per tre secondi ogni minuto, la centralina elettronica arricchisce la miscela facendo aumentare le emissioni di CO ed HC che fungono da riduttori; questi si ossidano prelevando ossigeno dall'NO₂, lasciando come sottoprodotto azoto (N₂). L'efficienza di questo catalizzatore è molto più bassa di quelli tradizionali e si attesta nell'ordine del 50%.

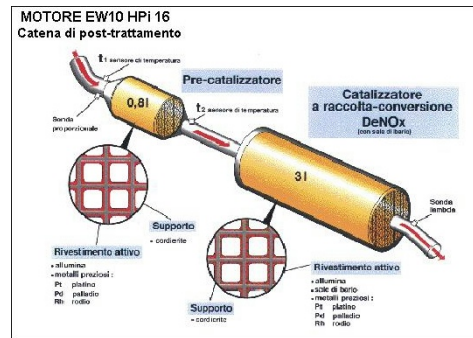


Fig. 1.17: Catalizzatore de-NO_x (gruppo PSA).

Tuttavia la presenza di zolfo all'interno delle normali benzine non permette l'utilizzo di tale dispositivo, poiché lo zolfo reagisce con il rame producendo solfato di rame alle elevate temperature, a cui questo catalizzatore opera, danneggiando in maniera irreversibile il catalizzatore stesso.

La concentrazione di zolfo massima ammissibile è di circa 30 ppm per il corretto funzionamento; questo limite viene rispettato dalle benzine commercializzate in Giappone, Svezia ed alcune in Germania, mentre viene abbondantemente superato da quelle italiane (salvo alcune speciali).

Non disponendo di tali benzine, i motori GDI funzionanti in paesi diversi da quelli sopra indicati non possono avvalersi del de-NO_x e pertanto devono ridurre il campo di funzionamento nella modalità stratificata; si potranno adoperare miscele povere solo con rapporti aria/benzina superiori a 22 e bassi regimi di rotazione, dopodiché si deve necessariamente passare al funzionamento stechiometrico per permettere, come detto in precedenza, al catalizzatore trivalente di ridurre gli ossidi di azoto e quindi rispettare le normative.

1.6.3 Valvola a farfalla servo assistita

L'utilizzo del catalizzatore de-NO_x rende necessario l'utilizzo del controllo servo assistito della valvola a farfalla. Infatti gestire in maniera ciclica e del tutto inavvertibile per l'utilizzatore la "pulizia" del de-NO_x è piuttosto complicato.

Per arricchire la miscela non si può iniettare una quantità maggiore di benzina, altrimenti si avrebbe una brusca accelerazione al veicolo, ma si deve ridurre la quantità di aria immessa parzializzandola mediante la valvola a farfalla.

Inoltre nel funzionamento in cui si effettua una regolazione per qualità, la valvola a farfalla sarà totalmente aperta, per cui non vi è una corrispondenza tra la posizione del pedale

dell'acceleratore e la posizione del corpo farfallato, che dovranno quindi essere fisicamente scollegati.

Il movimento dell'acceleratore dovrà quindi essere rilevato tramite un trasduttore potenziometrico a doppia traccia (drive by wire), mentre la valvola a farfalla dovrà essere attuata da un motore elettrico controllato dall'unità di controllo elettronica (ECU).

1.6.4 Pompa ad alta pressione

A causa dei ristretti tempi disponibili alla formazione della carica, il getto di combustibile all'uscita dell'iniettore deve essere finemente polverizzato; questo, unito alla necessità di permettere allo spray un'elevata penetrazione, porta inevitabilmente a ricorrere ad elevate pressioni di iniezione.

Abbiamo già fatto notare in precedenza come la viscosità della benzina sia nettamente inferiore a quella del gasolio. Ciò non consente l'utilizzo delle pompe progettate per i sistemi di iniezione diretta diesel e comporta maggiori problemi costruttivi e realizzativi. Pertanto la pompa, che realizza pressioni dell'ordine dei 50-200 Bar (diversamente dai 3-5 Bar dei sistemi PFI), diventa un elemento critico e costoso per l'impianto. Solitamente la pompa ad alta pressione viene calettata direttamente sull'albero a camme, come in figura 1.18.

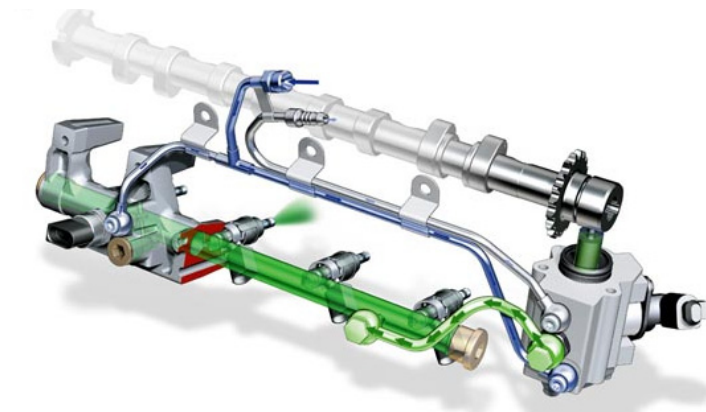


Fig. 1.18: Fuel rail, iniettori e pompa di iniezione, del motore Audi FSI.

1.6.5 Sonda lambda proporzionale

Nei motori ad iniezione diretta non è sufficiente l'informazione on-off data dalla sonda lambda normale potenziometrica (nella figura 1.15 Bosch LSF), ma è necessario conoscere con precisione il titolo tramite una sonda lambda proporzionale (nella figura 1.15 Bosch LSU). Infatti conoscere questo parametro è indispensabile per capire quando si deve passare dal funzionamento con miscele povere a quello con miscele stechiometriche e per decidere in relazione alle condizioni di funzionamento se fare una o due iniezioni nello stesso ciclo. Inoltre, sempre in relazione al titolo, dovrà essere decisa dalla ECU la quantità di benzina da iniettare e l'anticipo di iniezione e di accensione.

1.7 Motori GDI

Vengono adesso analizzate le soluzioni costruttive più importanti dei motori ad iniezione diretta più diffusi sul mercato mondiale; in particolare saranno illustrate e discusse le metodologie per la realizzazione della stratificazione della carica.

1.7.1 Mitsubishi GDI

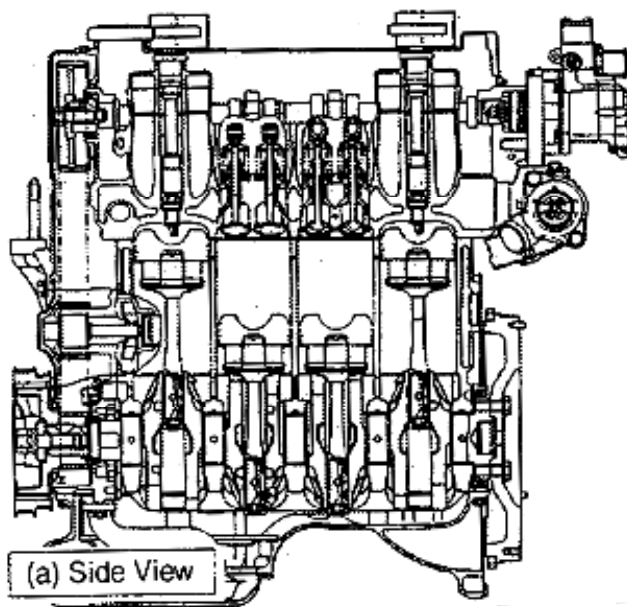


Fig. 1.19: Vista laterale del motore GDI
Mitsubishi.

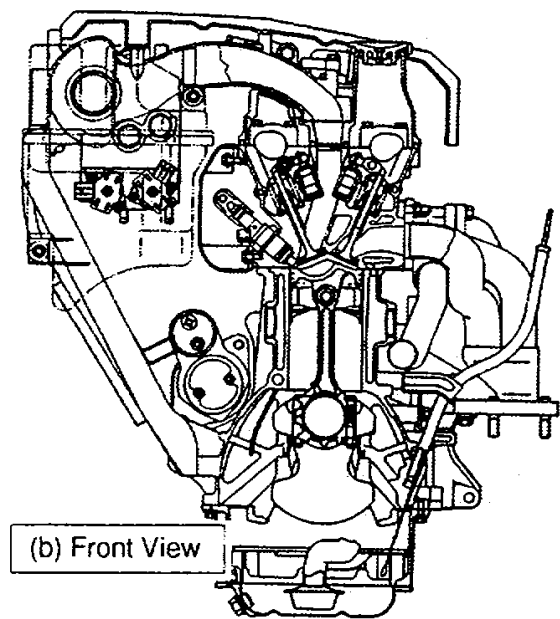


Fig. 1.20: Vista frontale del motore GDI
Mitsubishi.

Escludendo i tentativi compiuti negli anni cinquanta il motore GDI Mitsubishi è stato il primo motore ad iniezione diretta prodotto in serie (fig. 1.19-1.20).

In questo motore il metodo di stratificazione è di tipo *wall-air-guided*, ovvero in fase di compressione la carica viene guidata sia dalle superfici dello stantuffo sia dal campo di moto presente in camera di combustione. Il pistone ha infatti una particolare geometria per realizzare questo scopo con una protrusione e una *bowl* di forma sferica, che interferisce con il getto di benzina, generato da un iniettore *swirl* ad alta pressione (fig. 1.21).



Fig. 1.21: Pistone del motore Mitsubishi GDI

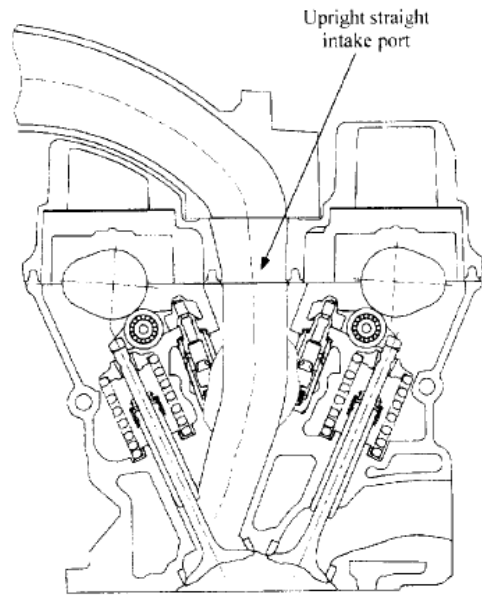


Fig. 1.22: Testata e condotti del motore GDI Mitsubishi, si noti la particolare geometria del condotto di aspirazione.

La particolare geometria dei condotti di aspirazione permette di creare un moto di tumble che ruota in senso inverso rispetto a quello generato avvalendosi di condotti tradizionali (fig.1.22). Questo campo di moto tende a portare la benzina verso la candela permettendo di realizzare la stratificazione della carica.

Come si evince dalla fig. 1.23, la regione in cui si effettua la stratificazione con miscele povere è molto ampia grazie all'utilizzo di EGR e de-NO_x, ma questa viene molto limitata per i modelli venduti in Europa, a causa della presenza dello zolfo nella benzina che impedisce l'adozione del de-NO_x.

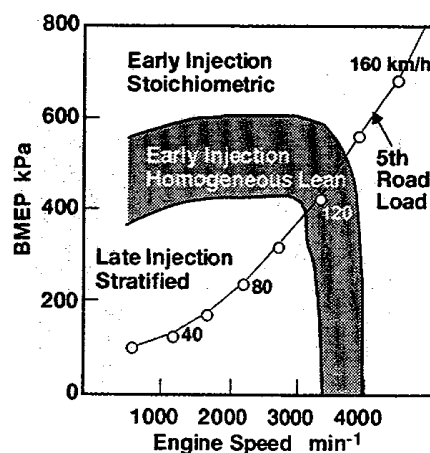


Fig. 1.23: Condizioni di funzionamento del motore GDI Mitsubishi.

1.7.2 GDI Gruppo PSA

Il motore GDI del gruppo PSA utilizza, come si nota dalla fig. 1.24, le stesse soluzioni tecniche già discusse nel paragrafo precedente del motore Mitsubishi.

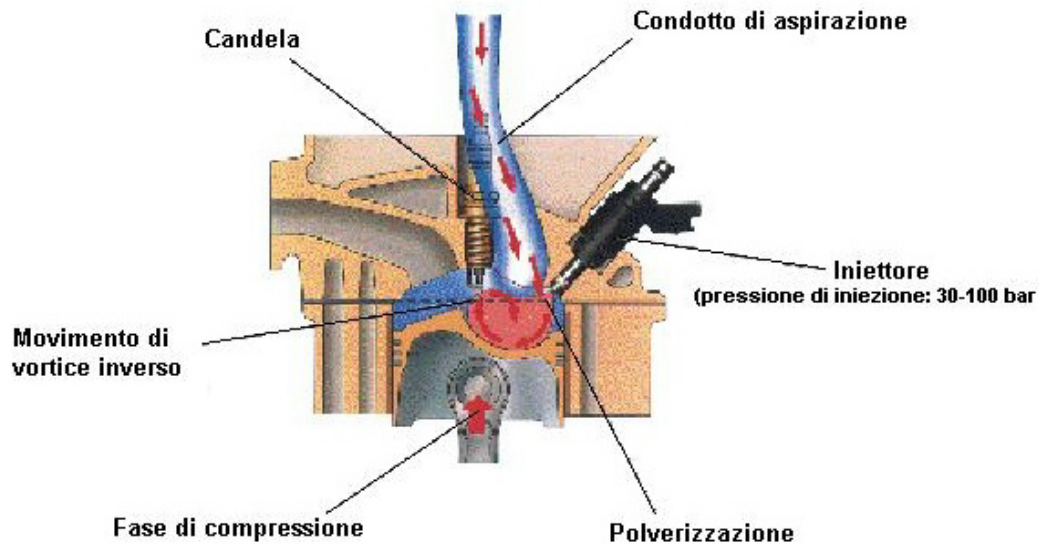


Fig. 1.24: Motore GDI del gruppo PSA

1.7.3 GDI Renault

Il motore GDI Renault è stato il primo motore ad iniezione diretta ad essere prodotto da una casa europea. A causa della presenza dello zolfo nelle benzine europee, la casa francese ha preferito rinunciare alla combustione con miscele povere, potendo così utilizzare il solo normale catalizzatore trivalente per risolvere il problema delle emissioni di ossido di azoto.

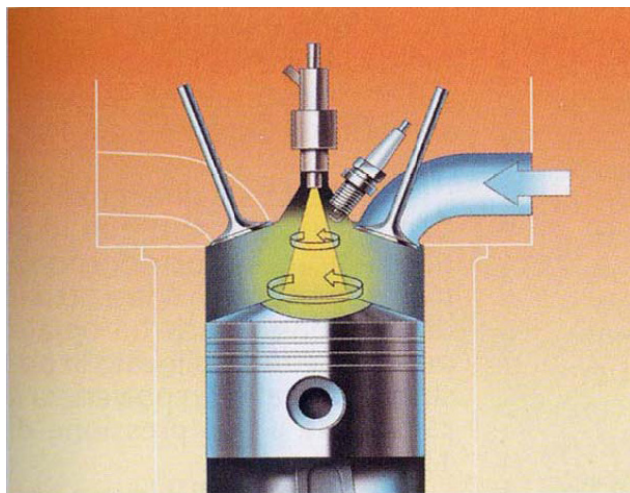


Fig. 1.25: Motore GDI Renault

In questo motore si realizza una carica semistratificata, con miscela complessivamente stechiometrica. Per far ciò l'iniettore è stato montato centralmente, a differenza di tutti i motori GDI presenti attualmente in commercio, e si trova con la candela in una nicchia ricavata nella testata (fig.1.25-1.26).

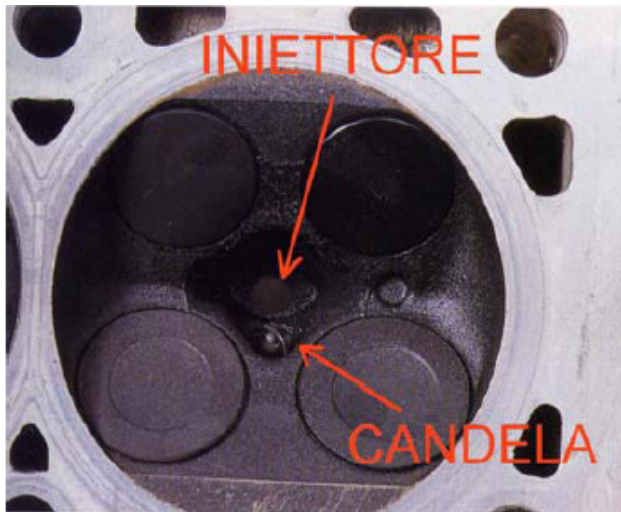


Fig. 1.26: testata del motore Renault

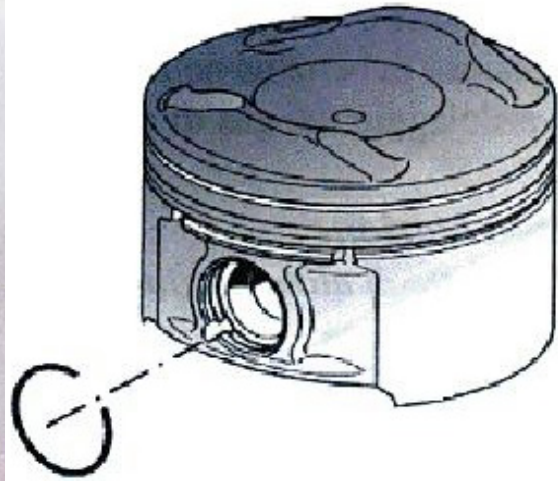


Fig. 1.27: pistone del motore Renault.

Il pistone (fig.1.27) è stato conformato in modo da confinare la carica vicino alla candela, infatti è dotato di una *bowl* centrale, verso cui si dirige lo spray di benzina, e di due protrusioni laterali che impediscono alla carica di sparpagliarsi nel resto della camera. I condotti hanno geometrie tradizionali e non ci sono dei moti organizzati che tendono a favorire la stratificazione, per cui questo sistema può essere classificato come *wall-guided*.

1.7.4 Alfa Romeo JTS

Il motore Alfa Romeo è un esempio di come si possa interpretare la soluzione GDI nell'ottica di un incremento delle prestazioni. Al momento risulta infatti essere il motore aspirato ad iniezione diretta con una più alta potenza specifica volumetrica presente sul mercato, con i suoi due litri di cilindrata e una potenza di ben 166 cavalli (fig.1.28).



Fig. 1.28: Motore Alfa Romeo JTS

Questo motore prevede il funzionamento anche con miscele povere, ma in un ristretto campo di funzionamento, come si evince dalla figura 1.29; in particolare si nota che si utilizza una miscela povera solo al di sotto dei 1500 giri/min e quindi non si ottengono vantaggi sensibili per quanto riguarda i consumi di carburante, salvo che nel funzionamento al minimo.

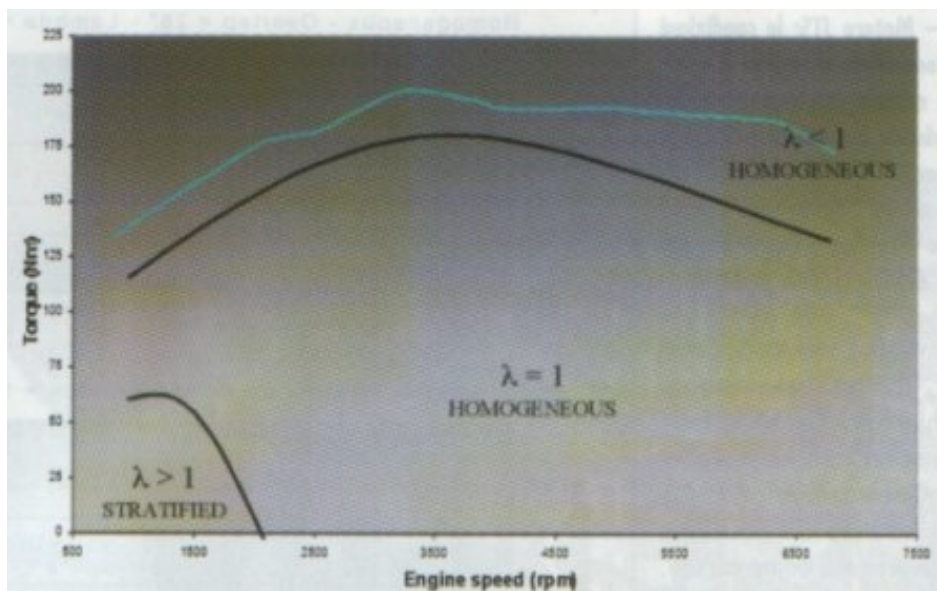


Fig. 1.29: Condizioni di funzionamento nel campo delle miscele povere e in condizioni stechiometriche in relazione alla coppia trasmessa.

La geometria dei condotti e della camera di combustione rimane simile alla soluzione ad iniezione indiretta a parte le modifiche necessarie per accogliere l'iniettore (fig. 1.30). Gli unici

accorgimenti per realizzare un po' di stratificazione sono stati introdotti nella superficie superiore del pistone, che presenta una piccola bowl ed un piccolo deflettore dalla parte opposta alla posizione dell'iniettore (fig.1.31).



Fig. 1.30: Stantuffo e testata del JTS.



Fig. 1.31: Vista dall'alto del pistone del JTS.

1.7.5 Toyota GDI

Il motore Toyota si avvale di una soluzione essenzialmente di tipo air-guided (fig. 1.32). Per realizzare la stratificazione, invece del moto di tumble, si ricorre al moto di swirl, che viene realizzato sfruttando due accorgimenti tecnici che agiscono sinergicamente (fig. 1.33); la valvola SCV e un condotto di aspirazione elicoidale. SCV è un acronimo che sta per Swirl Control Valve, ovvero una valvola di controllo del moto di swirl che chiude uno dei condotti di aspirazione, nel campo di funzionamento in stratificato. Dovendo passare solo in un condotto, l'aria entra con una componente tangenziale, che crea un moto rotatorio con direzione parallela all'asse del cilindro. Questo effetto è amplificato poi dal fatto che, dimezzando la sezione di passaggio del fluido le velocità nel condotto aperto raddoppieranno; inoltre la particolare geometria elicoidale di questo incrementa notevolmente le componenti di velocità che hanno direzione circonferenziale rispetto al cilindro (fig.1.34).

Il pistone ha una bowl molto voluminosa in cui viene indirizzato lo spray, permettendo di concentrare attorno alla candela la benzina senza che venga dispersa nel resto della camera.

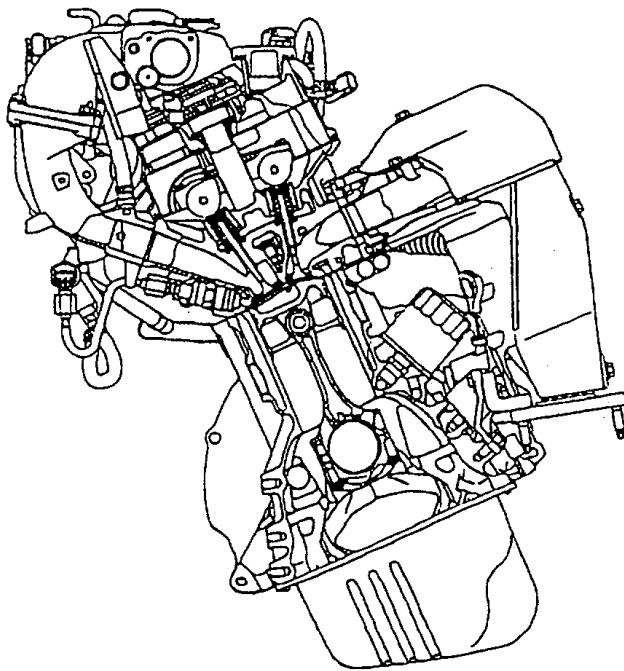


Fig. 1.32: Motore GDI Toyota

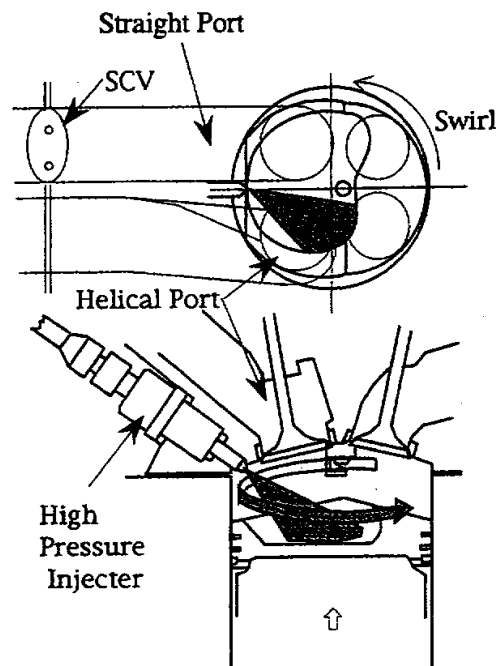


Fig. 1.33: Stratificazione mediante il moto di swirl (1)

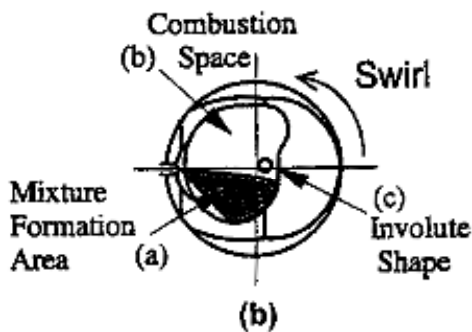


Fig. 1.34: Stratificazione mediante il moto di swirl (2)



Fig. 1.35: Stantuffo del motore Toyota GDI.

Il moto di swirl tende a degradarsi meno in camera di combustione rispetto a quello di tumble essendo coerente con la geometria del cilindro e quindi consente di conservare fino alla combustione un adeguato livello di turbolenza, ma tende a portare per effetto centrifugo il combustibile verso la periferia piuttosto che verso la candela. Un altro svantaggio è legato poi all'utilizzo della valvola SCV, che fa aumentare le perdite di carico nel condotto e quindi il lavoro di pompaggio.

1.7.6 Volkswagen-Audi FSI

Viene infine preso in analisi l'ultimo motore ad iniezione diretta immesso con successo nel mercato: il motore del gruppo Volkswagen FSI (fig. 1.36).

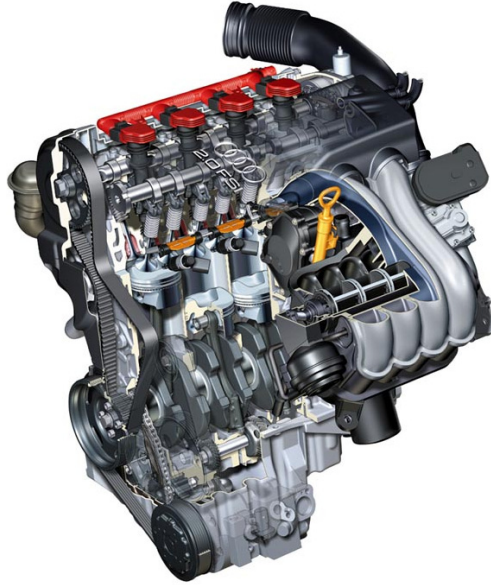


Fig. 1.36: Motore Audi FSI

La stratificazione viene realizzata per la prima volta con un puro sistema *air guided*. L'iniettore, per poter realizzare questo scopo, è posizionato con una forte inclinazione rispetto all'asse verticale ($77,5^\circ$), in modo da far interferire lo spray con la corrente di aria che sta entrando nel cilindro attraverso le valvole. Il moto prevalente che viene sfruttato per produrre la stratificazione della carica è il *tumble*, ma ruota dalla parte opposta a differenza di quanto avviene nel motore della Mitsubishi, perché i condotti hanno una geometria tradizionale.

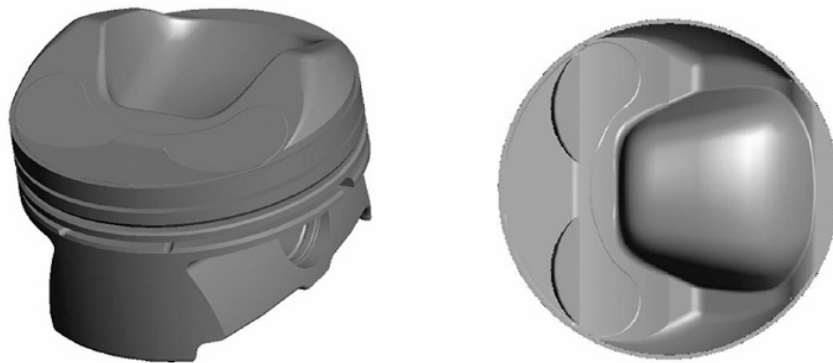


Fig. 1.37: Viste dello stantuffo del motore FSI

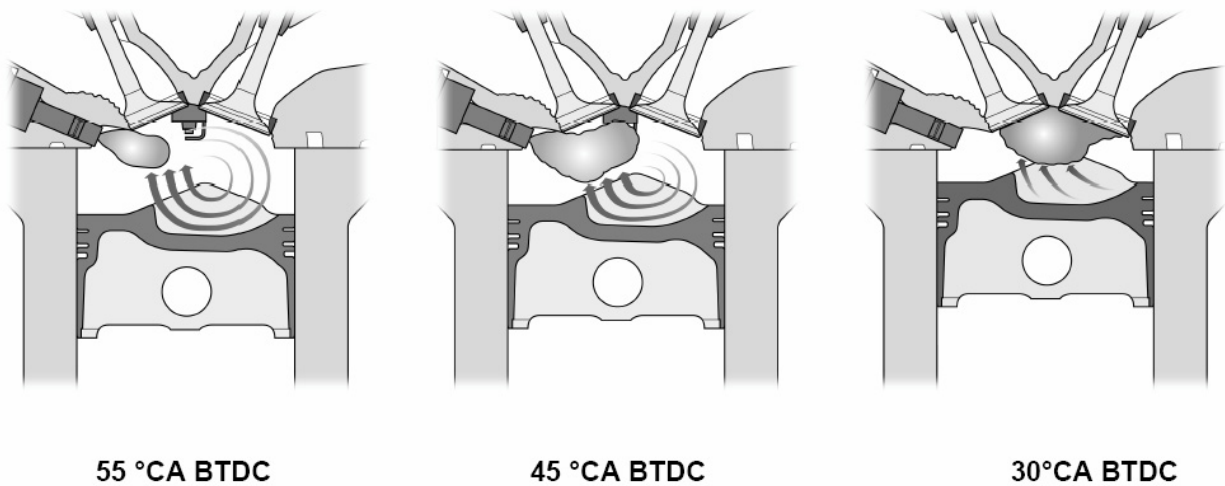


Fig. 1.38: Stratificazione della carica con il sistema Air-Guided

Per realizzare la stratificazione è stata scavata sul pistone una *bowl* (figura 1.37) dalla parte opposta rispetto all'iniettore e conformata in modo da sostenere il moto di tumble indirizzando l'aria verso l'alto, dove si trova la candela. In questo modo il getto di benzina che viene immesso in camera dall'iniettore non va a toccare lo stantuffo, ma viene mantenuto in alto vicino alla testata e alla candela, come mostrato nella figura 1.38.

Per la corretta realizzazione del concetto di stratificazione air-guided, l'interazione dello spray di combustibile con il moto di tumble guidato dalla geometria del pistone è di fondamentale importanza. Le condizioni operative risultano però ottimali solo in un ristretto campo di funzionamento, perché la velocità dell'aria varia proporzionalmente alla velocità angolare del motore. Per rimediare a questo problema viene variata la pressione di iniezione e l'intensità del moto di tumble in modo da creare stabilmente le condizioni ottimali in un ampio range di velocità di rotazione e condizioni di carico.

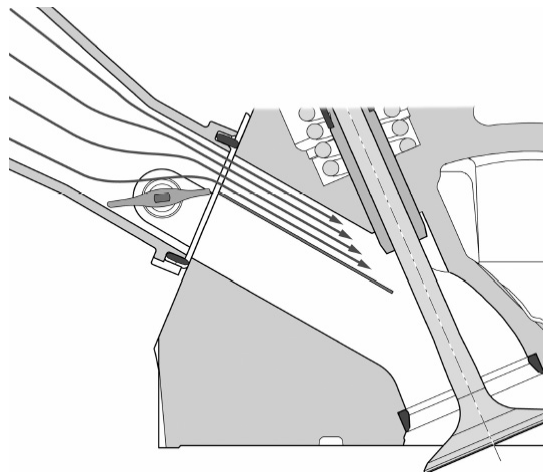
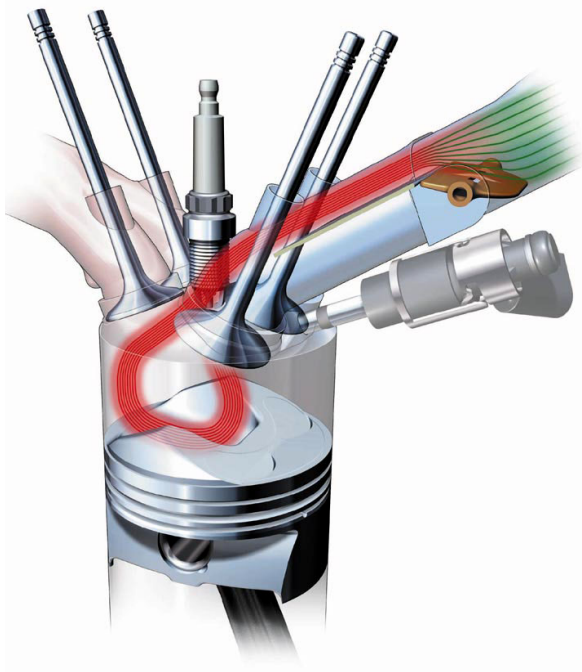
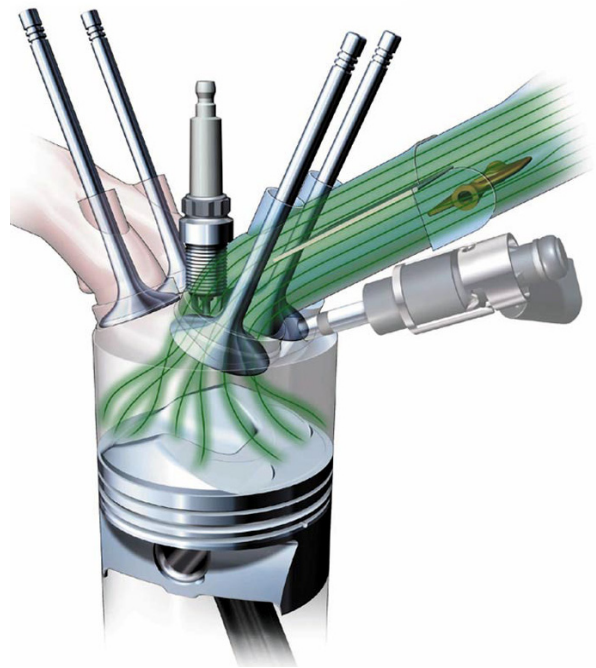


Fig. 1.39: Deflettore per il controllo dell'intensità del moto di tumble

La variazione di intensità del moto di tumble viene generata con l'aiuto di un *flap* (fig. 1.39), posizionato di fronte alla testata all'interno del condotto di aspirazione, la cui posizione viene controllata e gestita continuamente dalla centralina elettronica, in relazione alle condizioni operative di cui sopra. Variando l'angolo di inclinazione del *flap*, varia la distribuzione di flusso che passa sopra e sotto questo deflettore; ad esempio chiudendolo come in figura 1.39, il fluido passerà soltanto sopra. Operando in questo senso, si tende a privilegiare il passaggio dell'aria nella metà dell'area di *cortina* più vicina alla candela e diminuire l'efflusso nell'altra metà, incrementando così il moto di tumble. Infatti le componenti di velocità, che alimentano il moto rotatorio voluto, saranno amplificate, mentre verranno ridotte quelle che tendono a generare un moto in direzione opposta alla precedente e quindi ad estinguerlo. Aumentando l'intensità del tumble aumenta anche la forza con cui il getto di aria spinge la benzina verso l'alto e la velocità relativa tra la benzina e l'aria favorendo il mescolamento (fig. 1.40).



*Fig. 1.40: Funzionamento
in stratificazione.*



*Fig. 1.41: Funzionamento
con carica omogenea.*

Nel funzionamento con carica omogenea (fig.1.41), invece, il deflettore viene mantenuto in posizione parallela all'asse del condotto, in modo ridurre al minimo le perdite di carico e massimizzare il riempimento del motore.