

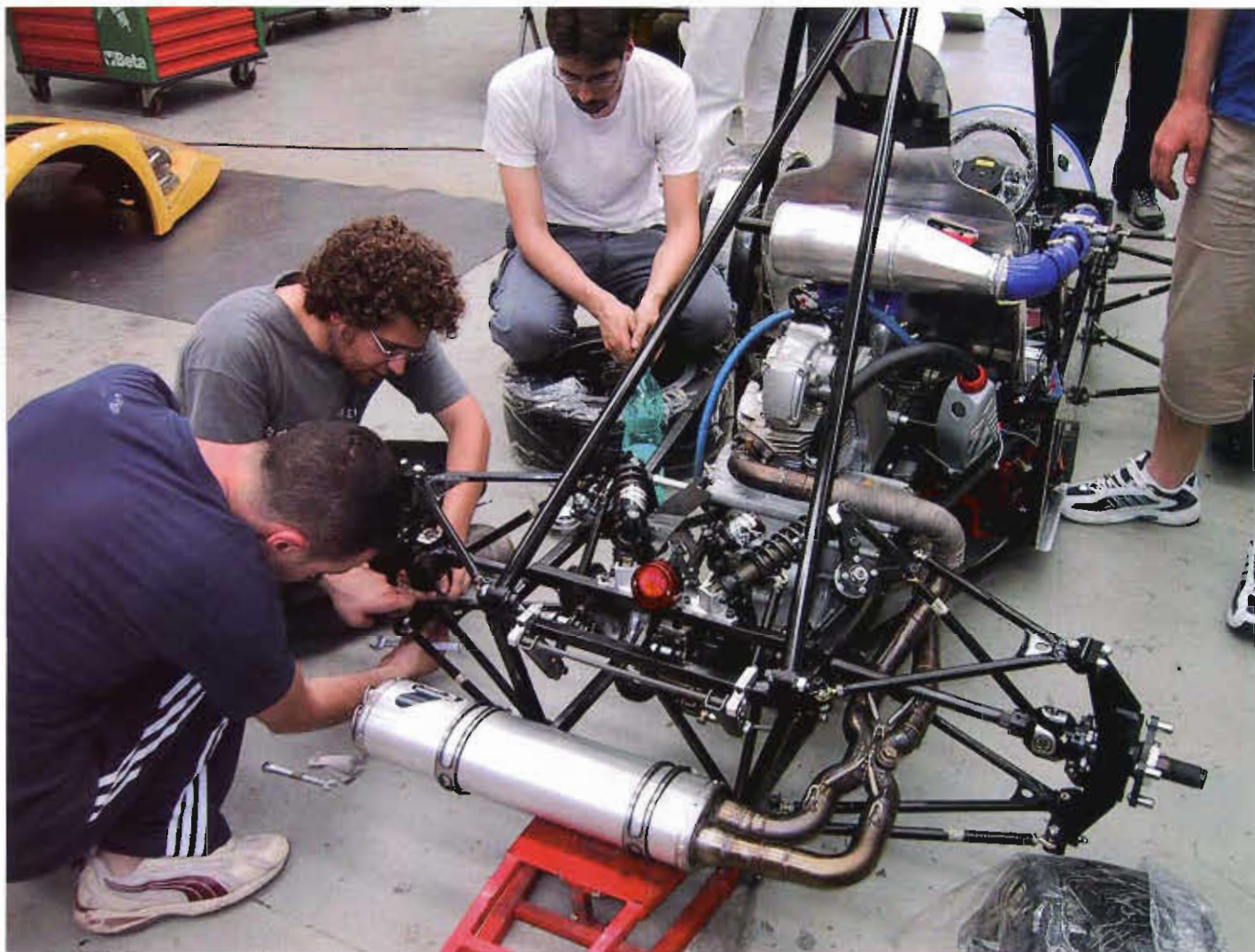
DUCATI IN FORMULA SAE

PROGETTO VINCENTE

Analisi fluidodinamica per la progettazione dei condotti di aspirazione e scarico di un motore Ducati per competizioni Formula SAE

Progettare e realizzare una monoposto a ruote scoperte: questo è il principio base della Formula SAE, competizione nata per coinvolgere studenti universitari che hanno la passione e la voglia di cimentarsi in gare automobilistiche a livello intercontinentale.

Per chi ancora non sapesse che cos'è la Formula SAE o non avesse mai sentito parlare della Formula Student o della Formula ATA (che sono rispettivamente l'evento inglese e l'evento italiano della Formula SAE), la definizione sopra citata è sicuramente la più esplicativa e concisi-



La F2004-V2ss durante la fase di assemblaggio. Il sistema di scarico è stato fatto passare fra il triangolo delle sospensioni inferiore e il semiassale, mentre il silenziatore, lo stesso modello montato sulla Ducati Supermono, è stato fissato al telaio con due fasce in alluminio.



La F2004-V2ss durante la prova di design. Il sistema di aspirazione era stato realizzato con tubi di gomma rinforzati con anelli di acciaio per resistere alle depressioni prodotte dal motore, il plenum era stato realizzato con lamiera di alluminio piegata e saldata.



Il particolare sistema di compensazione della F2004-V2ss "2-1-2".

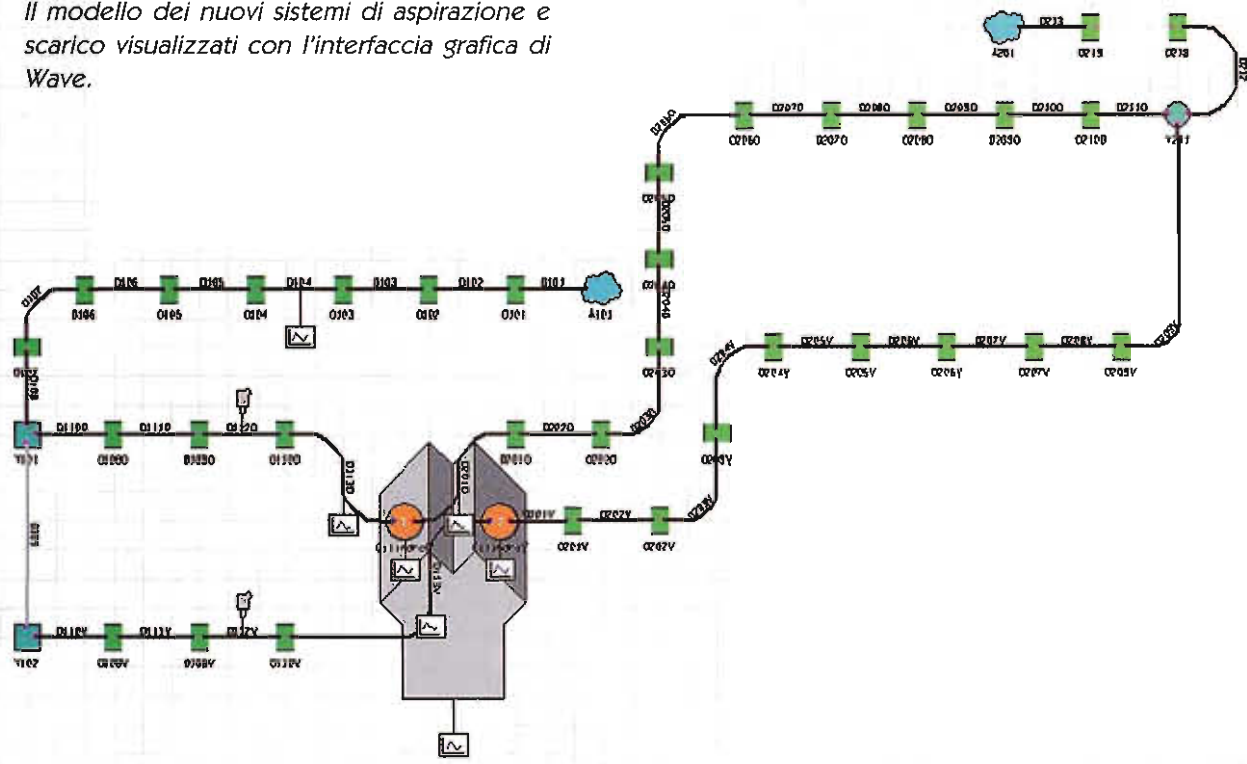
sa. Come tutte le competizioni che si rispettino, per parteciparvi è necessario seguire un regolamento che si evolve di anno in anno e spinge gli studenti a ingegnarsi sempre più per raggiungere il miglior risultato in funzione delle possibilità economiche e delle tempistiche da rispettare.

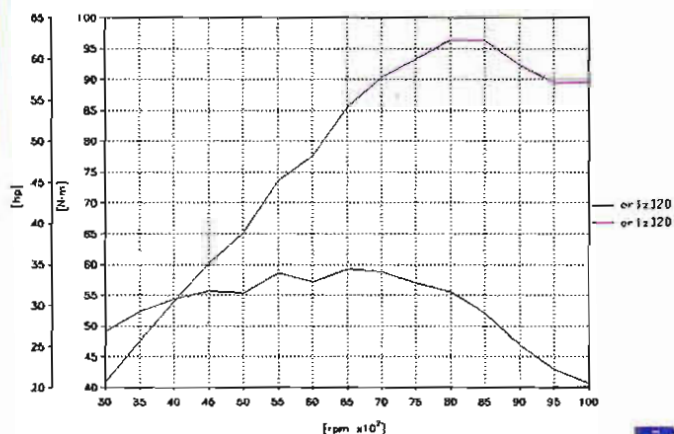
Di seguito sarà esposta l'analisi fluidodinamica realizzata per la progettazione dei condotti di aspirazione e scari-

co della vettura del Firenze Race Team V2: la F2005-V2. Le specifiche del regolamento relative al gruppo termico impongono l'utilizzo di un motore quattro tempi con una cilindrata massima di 610 cm³, un'aspirazione composta da un solo corpo farfallato, seguito da un restrittore (con diametro massimo di 20 mm), un limite di emissione sonora pari a 110 dB(A) (misurato con un microfono posizionato a 0,5 m dallo scarico e inclinato di 45° ri-

3000

Il modello dei nuovi sistemi di aspirazione e scarico visualizzati con l'interfaccia grafica di Wave.





Le curve caratteristiche del motore derivanti dalla simulazione effettuata con Wave.

spetto al piano orizzontale) e l'utilizzo di benzina a 98 ottani fornita direttamente dagli organizzatori della competizione.

In base alle limitazioni appena citate, il Firenze Race Team V2 ha scelto di utilizzare un motore bicilindrico Ducati che, grazie all'elevata coppia ai bassi regimi, consente alla F2005-V2 di avere un ottimo comportamento dinamico negli stretti circuiti realizzati per queste competizioni. In particolare, è stato scelto il Ducati 620 montato sulla Monster. L'esubero di cilindrata è stato eliminato con un riporto in Nikasil di 0,6 mm sull'alesaggio che porta la cilindrata a 609 cm³ contro i 618 cm³ iniziali. Salvo la sostituzione della frizione originale con una Adler completamente in alluminio, non sono state realizzate sostanziali modifiche agli organi interni del motore, mentre è stato cambiato il corpo farfallato originale di 45 mm di diametro con uno da 36 mm per migliorare la sensibilità del motore ai carichi parziali, dato che la presenza del restrittore ha un'importante influenza fluidodinamica sul funzionamento del corpo farfallato alle aperture ridotte.

Prima di illustrare l'analisi fatta è opportuno ricordare brevemente quali siano i parametri fondamentali che determinano la potenza di un motore. Come molti sapranno, la potenza di un propulsore può essere espressa dalla seguente relazione:

$$P = \eta_{\text{tot}} \cdot \lambda_v \cdot (\rho_0 \cdot Z \cdot S_s / \alpha) \cdot H_i \cdot n_s \cdot (u_p / T)$$

dove T è il numero dei tempi, n_s è il numero di giri, H_i è il potere calorifico del combustibile, S_s è la superficie dello stantuffo, Z è il numero dei cilindri, ρ_0 è la densità dell'aria, α è il rapporto aria combustibile, λ_v è il coefficiente di riempimento, η_{tot} è il rendimento totale ed è pari al prodotto dei singoli rendimenti (rispettivamente di intrappolamento, di combustione, di adiabaticità, ideale, limite, indicato positivo, indicato o di pompaggio, organico):

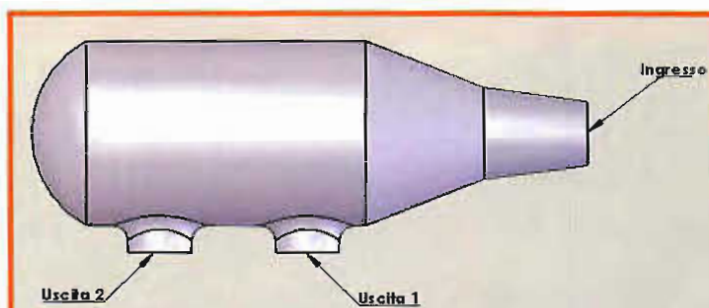
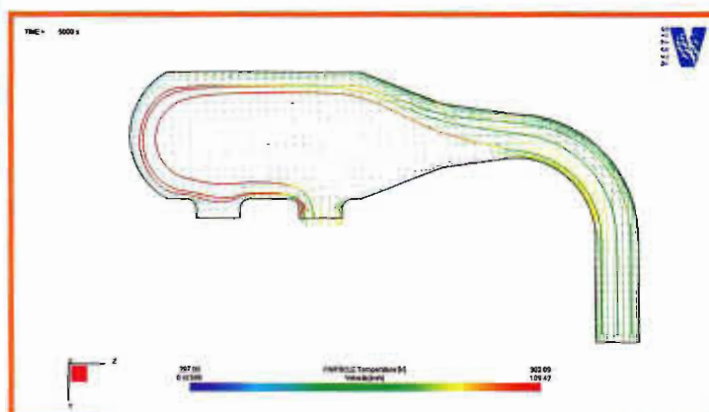


Figura A, il plenum montato sulla F2005-V2 con la nomenclatura utilizzata per l'ingresso dell'aria e le due uscite.



Il campo di moto e le streamline derivanti dalle simulazioni effettuate con Vectis.

$$\eta_{\text{tot}} = \eta_{\text{int}} \cdot \eta_c \cdot \eta_{\text{ad}} \cdot \eta_{\text{id}} \cdot \eta_l \cdot \eta_{\text{ip}} \cdot \eta_i \cdot \eta_0$$

u_p rappresenta la velocità media del pistone che è pari a:

$$u_p = 2 \cdot C \cdot n_s$$

dove C è la corsa del pistone.

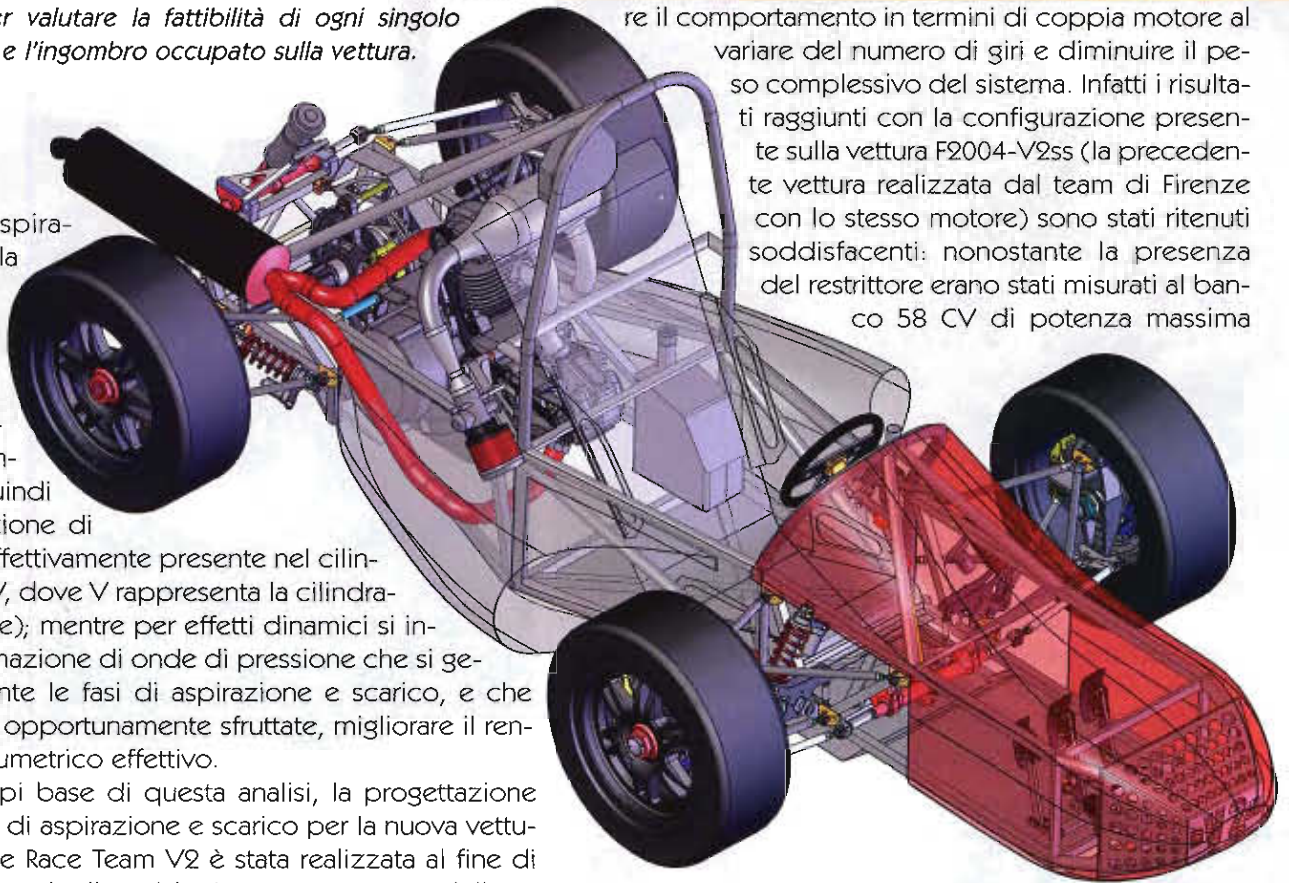
A questo punto è possibile focalizzare l'attenzione su quei parametri che possono incrementare la potenza: tolte le variabili geometriche, fissate dal motore scelto, e il potere calorifico della benzina utilizzata, l'unico valore che può essere realmente migliorato a basso costo e con un piccolo dispendio di tempo è il coefficiente di riempimento, ovvero il rendimento volumetrico del motore pari al rapporto fra l'aria che teoricamente potrebbe entrare nel motore e quella che in pratica entra. Per incrementare il valore di tale parametro senza modificare la fasatura del motore è stata effettuata un'analisi fluidodinamica dedicata allo studio degli effetti quasi-stazionari e degli effetti dinamici mediante un codice di calcolo monodimensionale, Ricardo Wave, e un codice di calcolo tridimensionale, Ricardo Vectis. Si considerano effetti quasi-stazionari tutti quelli relativi alle perdite fluidodinamiche che la miscela incontra durante il percorso nel condotto di aspirazione, e al riscaldamento che la stessa miscela fresca subisce a causa della differenza di temperatura fra le pareti e la carica, della durata del pro-

Il progetto della nuova F2005-V2. I modelli CAD sono fondamentali per valutare la fattibilità di ogni singolo componente e l'ingombro occupato sulla vettura.

cesso di aspirazione e della sua velocità. Questi fenomeni portano ad una diminuzione di densità (ρ) e quindi una diminuzione di massa (m) effettivamente presente nel cilindro ($m = \rho \cdot V$, dove V rappresenta la cilindrata del motore); mentre per effetti dinamici si intende la formazione di onde di pressione che si generano durante le fasi di aspirazione e scarico, e che possono, se opportunamente sfruttate, migliorare il rendimento volumetrico effettivo.

Noti i principi base di questa analisi, la progettazione dei condotti di aspirazione e scarico per la nuova vettura del Firenze Race Team V2 è stata realizzata al fine di raggiungere un duplice obiettivo: mantenere o migliora-

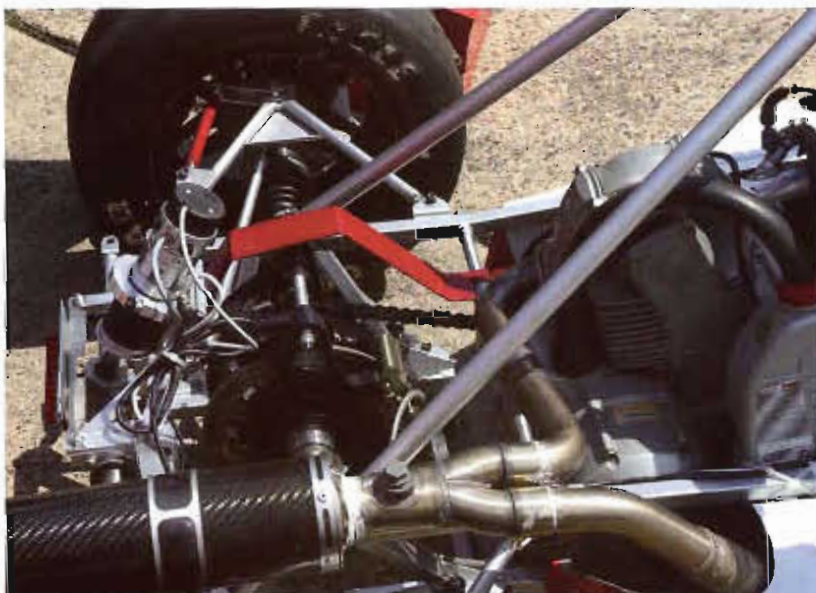
re il comportamento in termini di coppia motore al variare del numero di giri e diminuire il peso complessivo del sistema. Infatti i risultati raggiunti con la configurazione presente sulla vettura F2004-V2ss (la precedente vettura realizzata dal team di Firenze con lo stesso motore) sono stati ritenuti soddisfacenti: nonostante la presenza del restrittore erano stati misurati al banco 58 CV di potenza massima



Firenze Race Team V2



Il sistema di aspirazione della F2005-V2. Il plenum è stato realizzato in e-glass per diminuire la massa e limitare la rugosità interna e le discontinuità della saldatura, mentre il restrittore, in alluminio, è stato appositamente lavorato per diminuire al massimo la rugosità.



Il sistema di scarico della F2005-V2. I condotti si uniscono semplicemente (2 in 1) per poi entrare entrambi nel silenziatore.

contro i 60 CV dichiarati da Ducati sulla versione Monster 620i. Mediante l'utilizzo di Wave è stato possibile realizzare un modello del gruppo termico e dei sistemi di aspirazione e scarico della vettura F2005-V2.

Per la schematizzazione del plenum è stato utilizzato il software WaveMesher che, una volta inserito un modello STL (Solid To Layer, particolare file che prevede la tassellizzazione delle superfici interna ed esterna del pezzo attraverso elementi triangolari), restituisce i valori dei dati da inserire nella giunzione complessa. Una volta tarato



La F2005-V2 durante il tilt-test. Questa prova rientra nei test pre-gara ed è necessaria per valutare che le vetture non perdano liquidi in particolari condizioni. Come si può vedere il silenziatore utilizzato risulta molto meno ingombrante e leggero rispetto a quello montato sulla F2004-V2ss, infatti è stato utilizzato carbonio e non più alluminio.

tale modello con i dati acquisiti a banco prova è stato possibile modificare i dati geometrici dei sistemi di aspirazione e scarico e valutare quale fosse la configurazione che meglio rispondesse alle esigenze richieste.

L'idea iniziale consisteva nel realizzare un plenum con geometria tale da permettere un montaggio della farfalla non più laterale, come nella versione F2004-V2ss, ma sopra la testa del pilota. Era stata quindi ipotizzata una forma particolare che presentava però un problema rilevante: la realizzazione.

Tale problema non era di secondaria importanza dato il costo elevato di un'ipotetica realizzazione mediante stampo. Pertanto sono state considerate per le simulazioni entrambe le forme (sia quella a sviluppo verticale, più complicata, sia quella a forma di cilindro simile a quella utilizzata sulla F2004-V2ss) in modo da stabilire se l'incremento di spesa per la realizzazione del volume verticale fosse bilanciato da un incremento delle prestazioni del motore. Inoltre è stato valutato anche l'inserimento nel plenum delle cosiddette trombette, per limitare l'effetto dello strato limite sulla sezione di uscita del flusso.

Dalle prime simulazioni è emerso che le configurazioni con trombette presentano un peggior andamento delle curve caratteristiche causate da una negativa evoluzione

degli effetti dinamici, mentre fra le configurazioni senza trombette il plenum con sviluppo verticale ha un comportamento leggermente migliore rispetto a quello a sviluppo orizzontale (cilindrico).

Tuttavia le difficoltà di realizzazione, alle quali è già stato fatto riferimento, e le difficoltà di valutare anche sperimentalmente le diverse configurazioni hanno indotto a proseguire le simulazioni con la configurazione del plenum cilindrico senza trombette già testato sulla F2004-V2ss e di semplice realizzazione. Sono così stati accordati i condotti di aspirazione e scarico per avere un picco di coppia fra i 5.000 e i 6.000 giri/min ed è stato deciso il volume del plenum per migliorare il comportamento del motore su tutto il range di funzionamento.

I risultati ottenuti dalle simulazioni hanno mostrato un incremento sia in potenza che in termini di coppia motore: il picco di potenza massima è presente intorno ai 8.000-8.500 giri/min con un valore che si aggira intorno ai 62 hp, mentre è stato raggiunto un picco di coppia di circa 59 Nm a 6.500 giri/min e un ottimo andamento, sempre superiore ai 55 Nm, fra i 4.500-8.000 giri/min.

Il sistema di aspirazione è stato però realizzato in modo da poter variare le lunghezze dei condotti fra il plenum e i collettori di aspirazione così da poter valutare direttamente al banco prova la migliore configurazione possibile. Il sistema di scarico progettato si è dimostrato molto semplice e decisamente più leggero rispetto a quello montato sulla vettura F2004-V2ss grazie soprattutto all'utilizzo di un silenziatore in carbonio e con un unico condotto all'interno.

Il coefficiente di riempimento ottenuto con questa configurazione è risultato molto prossimo ad uno in un ampio campo di funzionamento del motore. Data la scarsa possibilità di verificare sperimentalmente questo valore è stato analizzato il valore dell'indice di Mach. Questo infatti è molto importante ai fini della progettazione in quanto dà chiare informazioni sulla bontà del lavoro. In letteratura è possibile trovare varie formulazioni di questo parametro, quella a cui è stato fatto riferimento in questo lavoro è la seguente:

$$IM = (u \cdot S) / (A_r \cdot C_{em} \cdot a)$$

Dove u è la velocità media del pistone, S è la superficie dello stantuffo, A_r è l'area di riferimento, C_{em} è il coefficiente di efflusso medio e a è la velocità del suono. Nel caso in esame il valore di questo indice è risultato al di sotto del valore limite di soglia e pari a 0,5-0,6, valore oltre il quale si ha un netto decremento del coefficiente di riempimento (l'affermazione prima citata deriva da prove sperimentali ed è confermata da vari autori in letteratura).

Questo dato ha così in parte confermato l'elevato valore del rendimento volumetrico trovato.

Per concludere l'analisi è stato realizzato uno studio 3D per valutare il coefficiente di efflusso del nuovo plenum



Il team di Firenze al completo dopo i successi della Formula ATA. Da destra in alto: Fernando De Santis, Claudio Panichi, Ciro Montanari, Claudio Annicchiarico, Marco Berti e Tommaso Iacomelli; da sinistra in basso: Daniele Rosti, Pierluigi Tozzi, Tommaso Innocenti e Simone Paganelli.

relativamente al valore del coefficiente di efflusso del plenum utilizzato sulla F2004-V2ss. Per tale studio è stato utilizzato il software Vectris.

Una volta realizzati i modelli in ambiente CAD è stato importato il file STL nel programma dove è stato possibile meshare il volume. Per quest'analisi è stato scelto di effettuare uno studio stazionario impostando una pressione totale in ingresso e una statica in uscita. Le condizioni al contorno sono state valutate mediante un modello monodimensionale realizzato in Wave, dove è stato valutata quale differenza di pressione fornisse una portata pari a quella passante dal restrittore al regime di coppia massima.

I risultati di questa analisi non sono stati però quelli sperati, infatti nonostante i due divergenti in ingresso, è stato rilevato un miglioramento solo sull'uscita corrispondente al cilindro verticale (uscita 2 in figura A) pari al 5% mentre non c'è stata nessuna variazione sul coefficiente di efflusso dell'altra uscita (uscita 1 in figura A). Questo risultato e l'andamento delle streamline, ovvero i percorsi delle particelle di aria all'interno del plenum, hanno confermato l'idea iniziale di realizzare un airbox con sviluppo verticale per poter avere un notevole miglioramento.

Quest'idea sarà alla base dei sistemi di aspirazione e scarico della nuova vettura del Firenze Race Team.

Si desidera ringraziare Ducati Motor Holding, e in particolare gli ing. Mengoli e Bernardini, grazie al cui supporto è stato possibile partecipare alle gare della Formula SAE con l'unica vettura al mondo, progettata in Università, motorizzata con un propulsore Ducati. ■