

# AEC

**ANALISI E CALCOLO**

ISSN 1128-3874

NUMERO 85, MARZO/APRILE 2018



Poste Italiane Spa - Spedizione in Abbonamento Postale - D.L. 353/2003 (conv. in L. 27/02/2004 - n. 46) art.1, comma 1 - CNS Udine - € 6,00



## OTTIMIZZAZIONE DI COMPONENTI STAMPATI IN 3D PER IL MIGLIORAMENTO DELLE PRESTAZIONI DI AUTOVETTURE SPORTIVE

UBALDO CELLA\*, CORRADO GROTH\*, PIERLUIGI DI GIOVANNI\*\*, ALESSANDRO NIZZOLI\*\*\*, MARCO EVANGELOS BIANCOLINI\*

Le tecniche di Additive Manufacturing (definite anche “stampa 3D” nella loro accezione più ampia) rappresentano oggi la nuova frontiera nella produzione di componenti meccanici e si propongono ormai come opzione economicamente vantaggiosa per la produzione di parti di piccole e medie dimensioni. Questa tecnologia permette inoltre di produrre forme anche molto complesse spesso non realizzabili con processi di produzione standard offrendo quindi grande flessibilità in ambito progettuale. Il rilassamento dei vincoli costruttivi si sposa infatti molto bene con le moderne metodologie di progettazione basate su ambienti di ottimizzazione numerica nelle quali la direzione della ricerca della forma “ottima” spesso non è intuibile a priori.

\* Università di Roma “Tor Vergata” - \*\* HSL Italia s.r.l. - \*\*\* Automobili Lamborghini S.p.A.



Crediti: Automobili Lamborghini S.p.A.

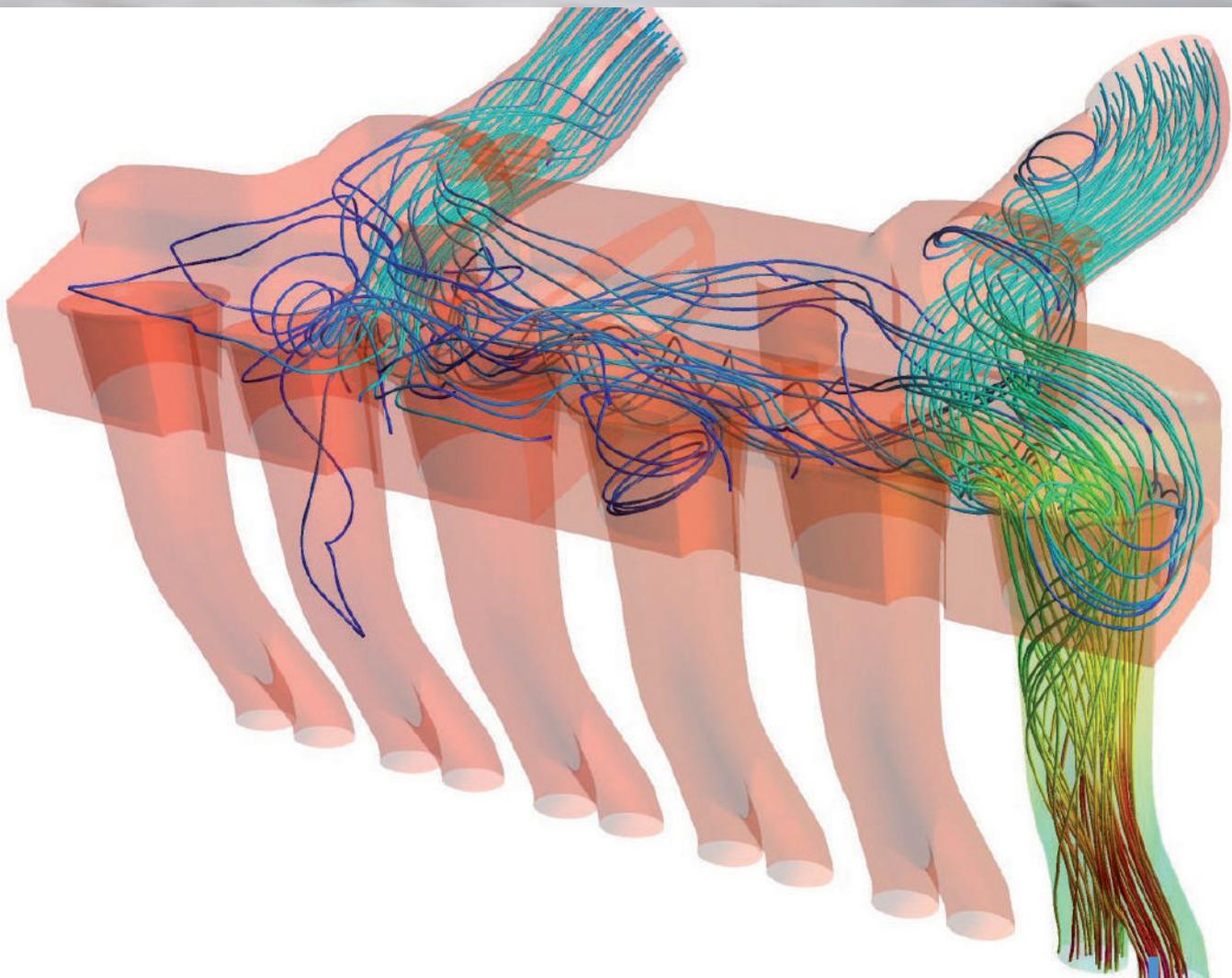
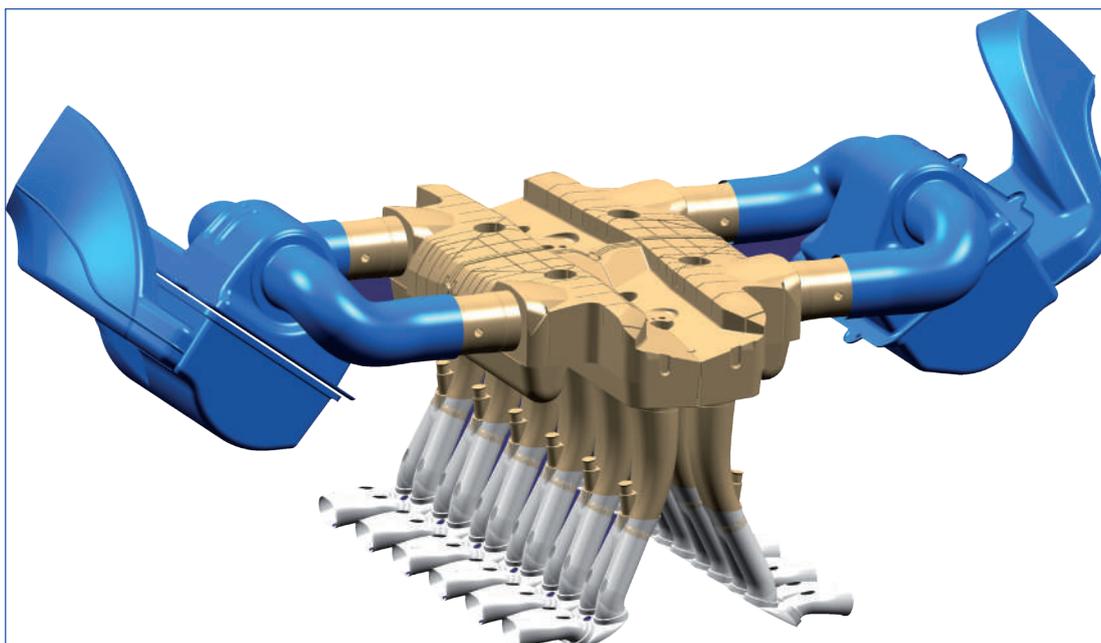


Figura 1 - Circuito d'aspirazione completo del motore Lamborghini V12.



Per approfondire le potenzialità offerte dal coniugare la flessibilità della stampa 3D e l'utilizzo delle metodologie CAE più avanzate è stata avviata una collaborazione fra l'università di Roma Tor Vergata, HSL Italia, il consorzio CINECA e Lamborghini allo scopo di implementare in ambiente HPC (High Performance Computing) un processo progettuale da applicare ad un caso industriale ad elevato potenziale tecnologico: l'incremento delle prestazioni di una vettura sportiva (la Lamborghini Aventador) tramite ottimizzazione del circuito d'aspirazione del motore. Partner del progetto sono inoltre la società di software RBF Morph1, sulla cui tecnologia è basata la metodologia di progettazione, e lo studio d'ingegneria Design Methods2, che ha supportato l'implementazione della configurazione numerica

#### DESCRIZIONE DEL PROBLEMA

Il motore della Aventador è composto da due bancate da sei cilindri inclinate fra di loro di 60 gradi. Ogni bancata attinge ad un *airbox* che fa parte di un circuito d'aspirazione indipendente (Figura 1). Ogni *airbox* è a sua volta composto da due camere, ognuna delle quali alimenta tre cilindri, che possono essere isolate fra di loro tramite un flap che si attiva a seconda del numero di giri del motore. Le due camere sono inoltre collegate esternamente tramite un cir-

1 - [www.rbf-morph.com](http://www.rbf-morph.com).

2 - [www.designmethods.aero](http://www.designmethods.aero).

cuito (bypass) munito di una valvola che raddoppia le possibili configurazioni di comunicazione dei due ambienti (Figura 2).

L'aspirazione si attiva ciclicamente in ogni cilindro seguendo l'ordine di combustione. In generale in ogni bancata può essere attiva l'aspirazione di uno o due cilindri durante un ciclo

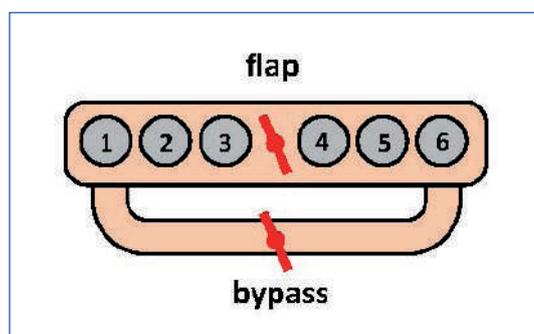


Figura 2 - Schema di comunicazione degli ambienti dell'airbox.

completo del motore. Considerando le quattro possibili configurazioni del circuito d'aspirazione definite dalla posizione del flap e del bypass, che variano in funzione del numero di giri, abbiamo un gran numero di possibili condizioni fluidodinamiche di funzionamento del motore. Le prestazioni in ogni condizione sono influenzate dalla caduta di pressione lungo il circuito che deve quindi essere minima in un range di funzionamento molto variabile. Alcuni degli elementi che influiscono maggiormente sulle prestazioni dei condotti d'aspirazione sono i runner (condotti che collegano i cilindri all'airbox)

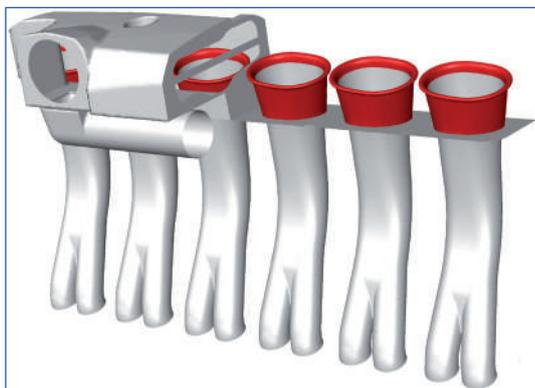


Figura 3 - Particolare dei runner.

ed in particolare la forma nella loro zona d'ingresso (Figura 3). L'obiettivo di questo lavoro è stato sviluppare una procedura di ottimizzazione numerica in grado di selezionare la forma che minimizza la caduta di pressione a monte e a valle del condotto d'aspirazione, per una condizione di funzionamento, concentrandosi sulla geometria della zona d'ingresso dei runner.

#### ANALISI NUMERICA

Il primo passo nel setup della configurazione di calcolo è stato la preparazione della geometria CAD per il dominio fluidodinamico. Questa operazione è stata svolta manualmente. Lo sforzo maggiore si è concentrato sull'airbox che presenta una superficie estremamente irregolare e complessa, con numerosi rinforzi (Figura 4) la modellazione dei quali avrebbe richiesto un incremento notevole della dimensione della



Figura 4 - Dettaglio dell'interno dell'airbox.

griglia CFD. La semplificazione di questa zona dovrebbe essere accettabile considerando che ci si aspetta un flusso nel volume dell'airbox significativamente più lento rispetto al resto del circuito d'aspirazione (e quindi un minor impatto sulla caduta di pressione). Il presupposto di negare l'influenza dei rinforzi sulla fluidodinamica è comunque in generale arbitrario e andrebbe verificato ma i vantaggi che deri-

vano dalla drastica riduzione delle dimensioni del problema giustificano questa scelta quanto meno in questa fase. Nella geometria utilizzata per il modello fluidodinamico sono quindi stati eliminati tutti i rinforzi presenti nella parte superiore dell'airbox (Figura 5).

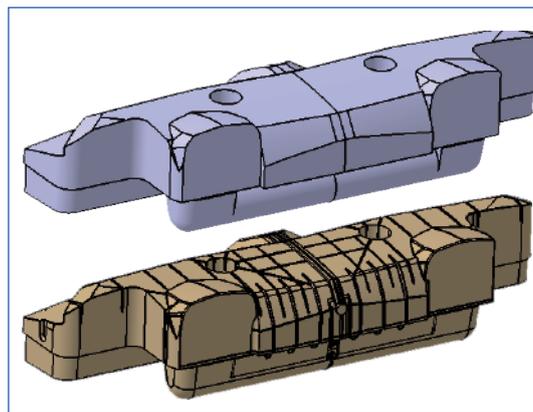


Figura 5 - Confronto fra la geometria dell'airbox completa e semplificata.

#### GENERAZIONE DELLA GRIGLIA CFD

Le griglie dei vari componenti del circuito sono state generate separatamente ed assemblate tramite interfacce. Per i runner è stata utilizzata una topologia strutturata multiblocco a esaedri (Figura 6) mentre per le altre parti è stata generata una griglia ibrida a prismi (negli strati adiacenti le pareti) e tetraedri (nel volume più interno). Questa strategia ha permesso di discretizzare in modo più mirato le zone ritenute più importanti prestando particolare cura

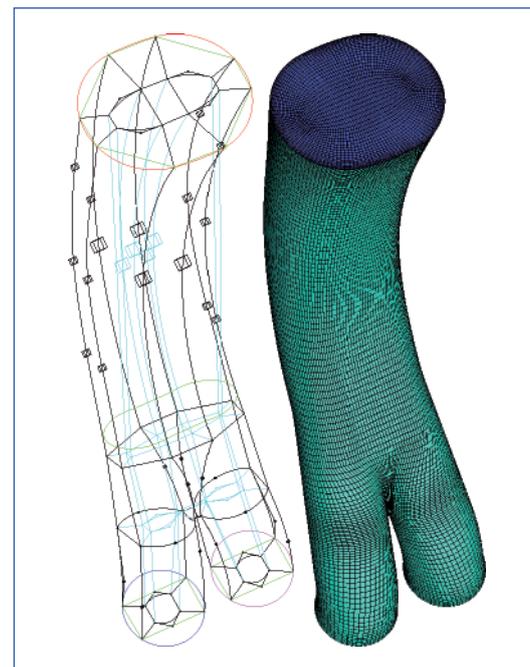
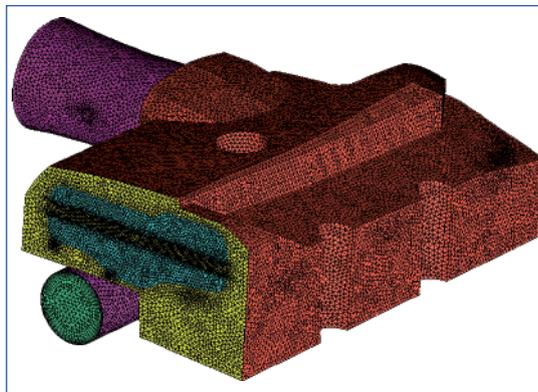


Figura 6 - Dettaglio della topologia della griglia strutturata usata per i runner.

nella stratificazione delle celle sulle pareti dei condotti. Essendo i runner tutti uguali è stata generata un'unica griglia e duplicata collocando le copie nella posizione di ognuno dei sei condotti. La griglia di un singolo runner è composta da circa 360.000 esaedri.

La Figura 7 mostra la griglia ibrida generata per l'airbox assieme al bypass ed una parte del condotto d'ingresso. La zona in verde corrisponde alla valvola del bypass. Le due zone azzurre sono le tracce delle facce del flap che separa i due ambienti dell'airbox. Nel modello numerico le aperture vengono attivate e disattivate

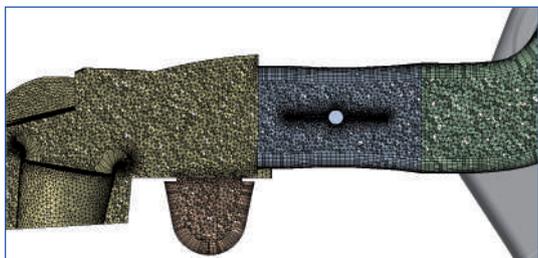
Figura 7 - Griglia ibrida generata per l'airbox.



vate imponendo opportunamente le condizioni al contorno di parete o di interfaccia (cosiddetta *flow-through*).

Entrambi i corpi farfallati afferenti ad ogni airbox (uno per ogni zip) vengono mantenuti aperti in tutte le condizioni di analisi (condizione di WOT). La Figura 8 mostra una sezione della griglia dalla quale si apprezza il raffinamento delle celle sulla valvola e la stratificazione dei prismi sulle pareti più importanti. Per non appesantire eccessivamente il calcolo, il primo strato di celle a parete ha dimensioni tali da rendere compatibile l'utilizzo di leggi di parete

Figura 8 - Sezione della griglia ibrida.



te ( $30 < Y^+ < 100$ ) evitando così di risolvere lo strato limite [1].

La griglia di ogni elemento del circuito e connessa alle altre tramite interfacce conformi. Per assemblare tipologie di griglia diverse (strutturata e ibrida) si rende invece necessaria

la connessione tramite interfacce non conformi. Questa configurazione in generale introduce degli errori d'interpolazione dovuti alla non corrispondenza delle facce delle celle adiacenti all'interfaccia nei due domini. Per ridurre questi errori le griglie sono state generate cercando di

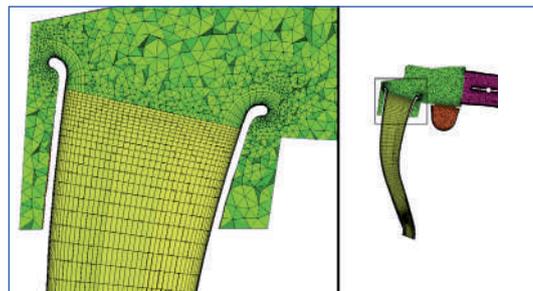


Figura 9 - Dettaglio della giunzione fra la griglia ibrida e la griglia strutturata.

mantenere simile la dimensione delle celle su tutta la superficie. L'errore introdotto da questa tecnica dovrebbe comunque essere di un ordine di grandezza significativamente inferiore all'ordine delle incertezze globali del calcolo completo. La Figura 9 mostra il dettaglio della zona di giunzione fra i runner e l'airbox.



Figura 10 - Griglia completa assemblata.

La Figura 10 riporta la griglia completa dopo l'assemblaggio di tutte le parti inclusi zip e scatola filtro a loro volta collegati con la presa dinamica all'esterno della vettura (tramite la superficie blu). La dimensione del dominio completo è di poco inferiore ai 10 milioni di celle. Nei regimi di funzionamento nei quali flap e bypass sono chiusi i due ambienti sono separati e il circuito d'aspirazione si può semplificare notevolmente attivando solo le parti di griglia necessarie.

#### ANALISI PRELIMINARE

Per selezionare la strategia di parametrizzazione geometrica più opportuna da adottare, è stata svolta un'analisi preliminare in una condizione in cui flap e bypass sono chiusi ed è

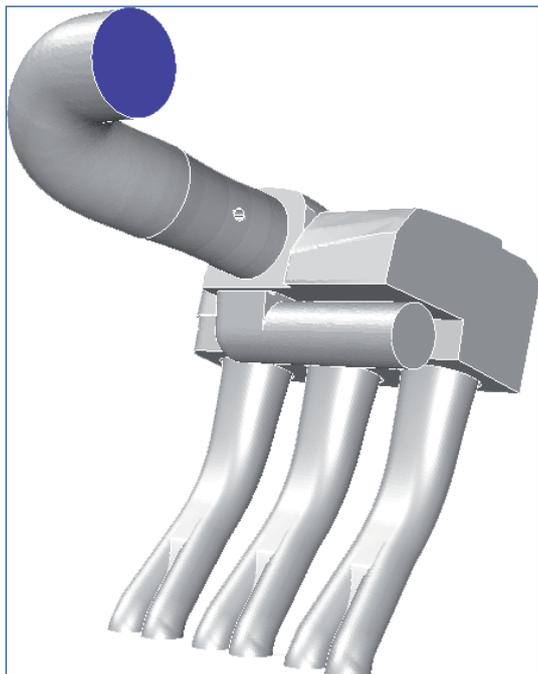


Figura 11 - Modello per le analisi preliminari.

attivo un solo runner al regime di giri del motore corrispondente alla potenza massima (8500 rpm). Essendo in queste condizioni le due camere dell'airbox isolate, è lecito modellare le due parti del circuito separatamente come riportato in Figura 11 (in questa fase preliminare è stata analizzata solo una delle due parti del circuito). La dimensione della griglia in questa configurazione si riduce a 4.5 milioni di celle. Sono state svolte tre analisi, attivando per ognuna un runner e disattivando gli altri. Per tutti i casi la portata è fissata all'ingresso ad un valore fornito da Lamborghini. Sulle pareti d'uscita del runner attivo è stata impostata una condizione di "outflow" con pressione fissata mentre alle altre uscite è stata imposta la condizione di parete. Il calcolo CFD è comprimibile ed è stato utilizzato il modello di turbolenza  $k-\epsilon$ . Le soluzioni delle analisi sono qualitativamente riportate in Figura 12 e Figura 13 tramite sezioni sulle quali è visualizzato il modulo delle velocità del flusso (il blu corrisponde al valore

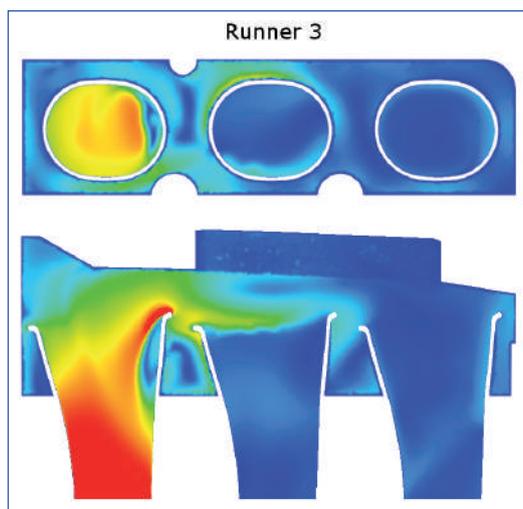
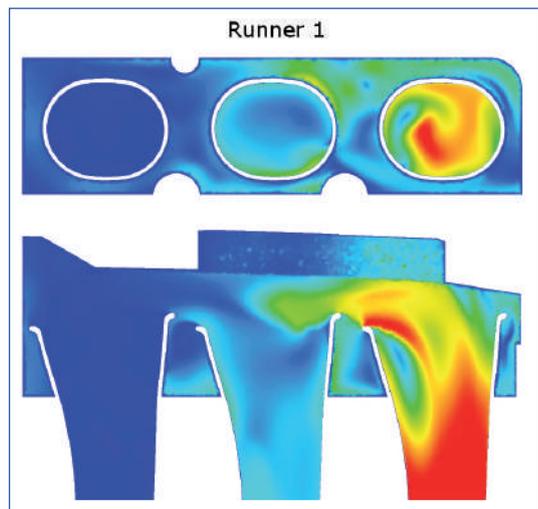


Figura 12 - Soluzioni con i runner 1 e 3 attivi.

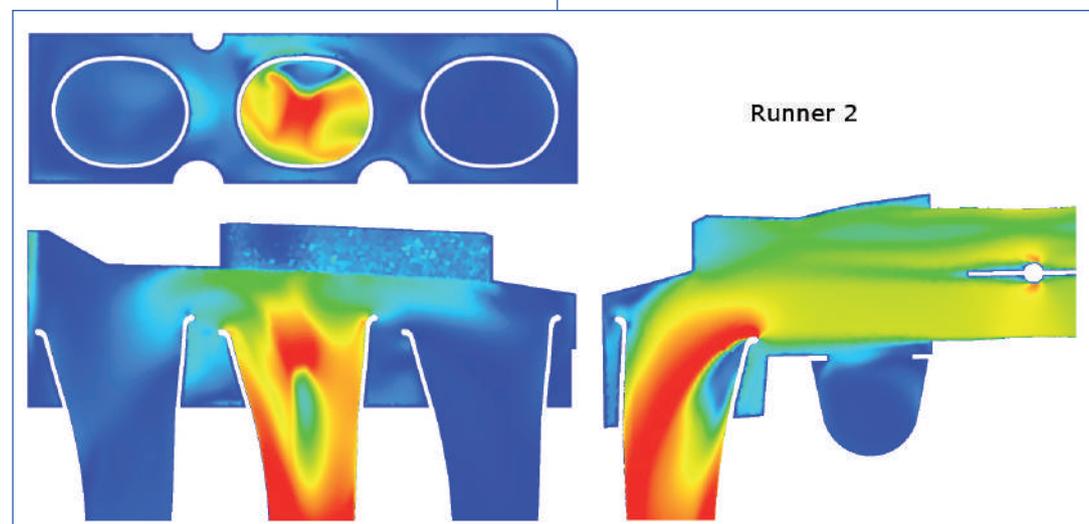


Figura 13 - Soluzioni con il runner 2 attivo.

Figura 14 - Confronto fra la soluzione preliminare e la soluzione con la griglia usata per l'ottimizzazione.

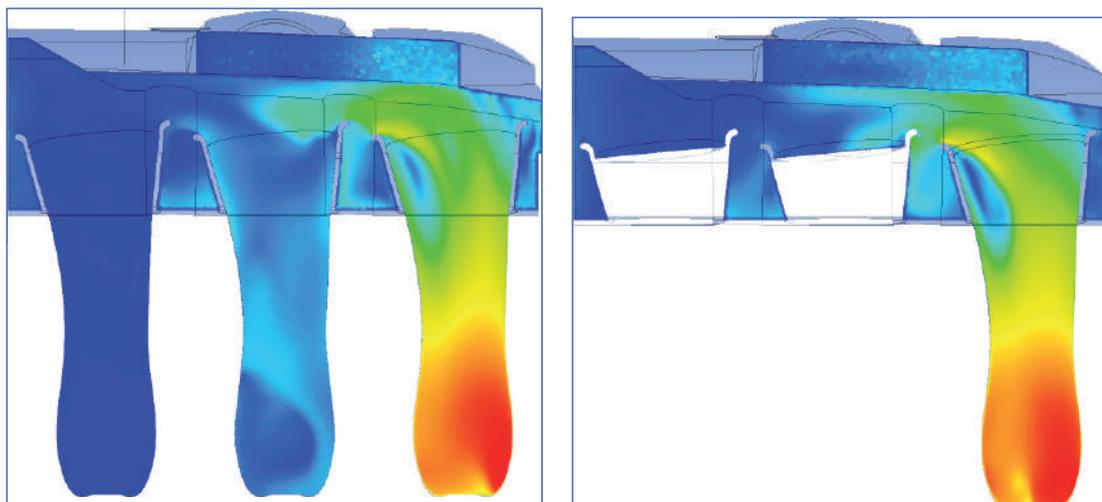


Figura 15 - Parametrizzazione della forma dei runner.

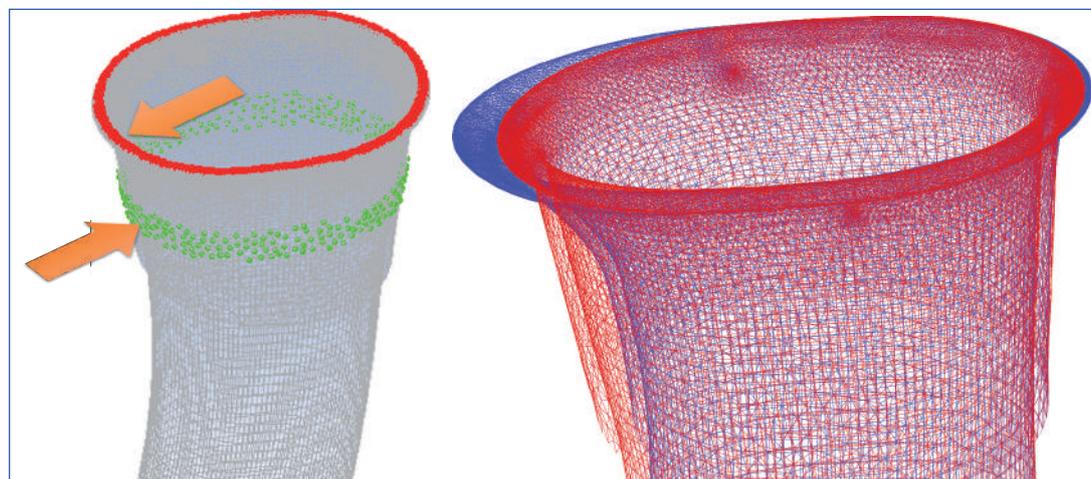
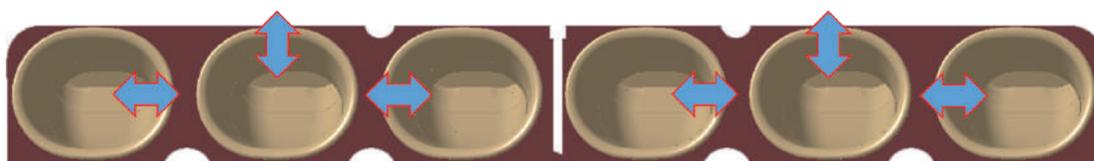


Figura 16 - Zona e direzione d'azione delle soluzioni RBF per i sei runner.



minimo ed il rosso al massimo). In tutti i runner si osserva una vistosa separazione all'ingresso dalla parte rivolta verso la direzione d'arrivo del flusso. Questa sarà la zona dove si concentrerà l'attenzione per le attività di ottimizzazione.

### OTTIMIZZAZIONE DEI RUNNER

Per ridurre ulteriormente le dimensioni del problema nella configurazione di ottimizzazione, si è evitato di includere nell'analisi numerica i runner inattivi, il condotto curvilineo a monte del corpo farfallato ed il bypass. Le dimensioni della griglia sono state così ulteriormente ridotte fino a 2.7 milioni di celle. La nuova configurazione è stata verificata confrontandone le soluzioni con quelle della griglia più completa nelle stesse condizioni delle analisi preliminari (Figura 14). Le nuove soluzioni mostrano qual-

che differenza ma la struttura della separazione è abbastanza simile sebbene leggermente sovrastimata. Dovendo investigare l'eventuale miglioramento e non le prestazioni assolute, nell'ottica di un'ottimizzazione numerica, possiamo quindi essere confidenti che la nuova configurazione mantenga la capacità di indicare il corretto percorso di ricerca.

### PARAMETRIZZAZIONE GEOMETRICA

La parametrizzazione della forma dei runner è affrontata utilizzando una tecnica di mesh morphing basata sulle funzioni RBF (Radial Basis Function) [2]. Per ogni runner sono stati implementati due modificatori di forma nella zona d'ingresso: uno che controlla la forma del bordo ed uno che modifica la zona subito sottostante (per maggiori dettagli riguardo il setup di un problema RBF si rimanda alla

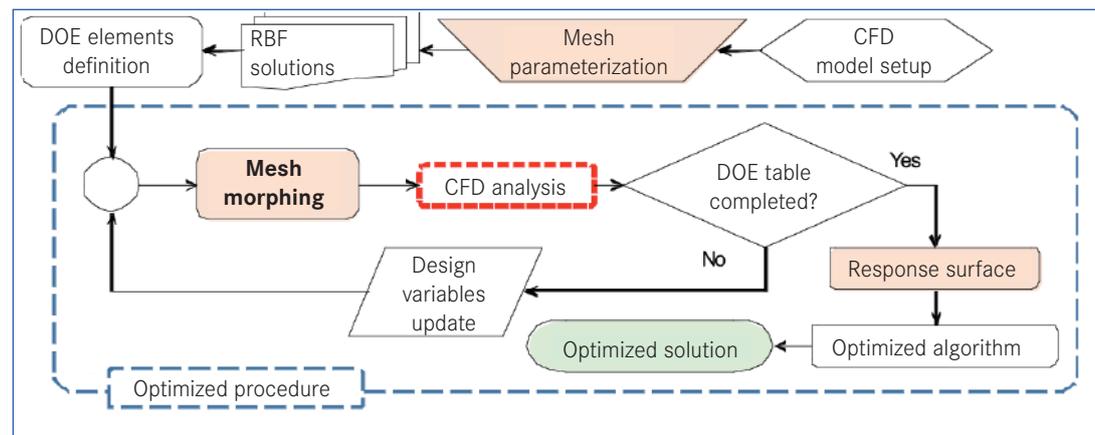


Figura 17 – Schema della procedura di ottimizzazione.

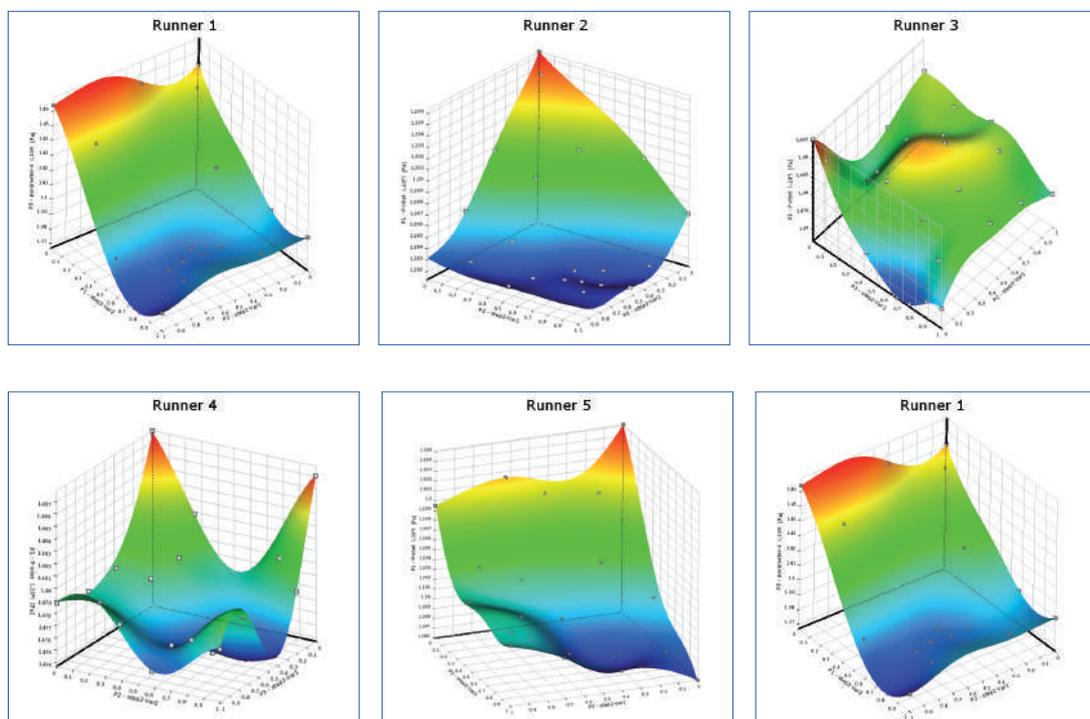


Figura 18 – Soluzioni delle ottimizzazioni.

bibliografia [3]). La Figura 15 mostra il principio di funzionamento dei due fattori di modifica e il loro effetto sulla griglia. La figura di sinistra evidenzia i punti sorgente utilizzati nel problema RBF e la direzione dell'azione di modifica. La figura a destra mostra l'effetto combinato delle due soluzioni sulla griglia (la griglia rossa è quella originale, quella blu è quella modificata). Le soluzioni RBF sono applicate ad ogni runner in accordo con il risultato delle analisi preliminari posizionando la zona e la direzione di modifica in prossimità della regione separata. La Figura 16 mostra la mappa delle azioni dei fattori di modifica per i sei condotti.

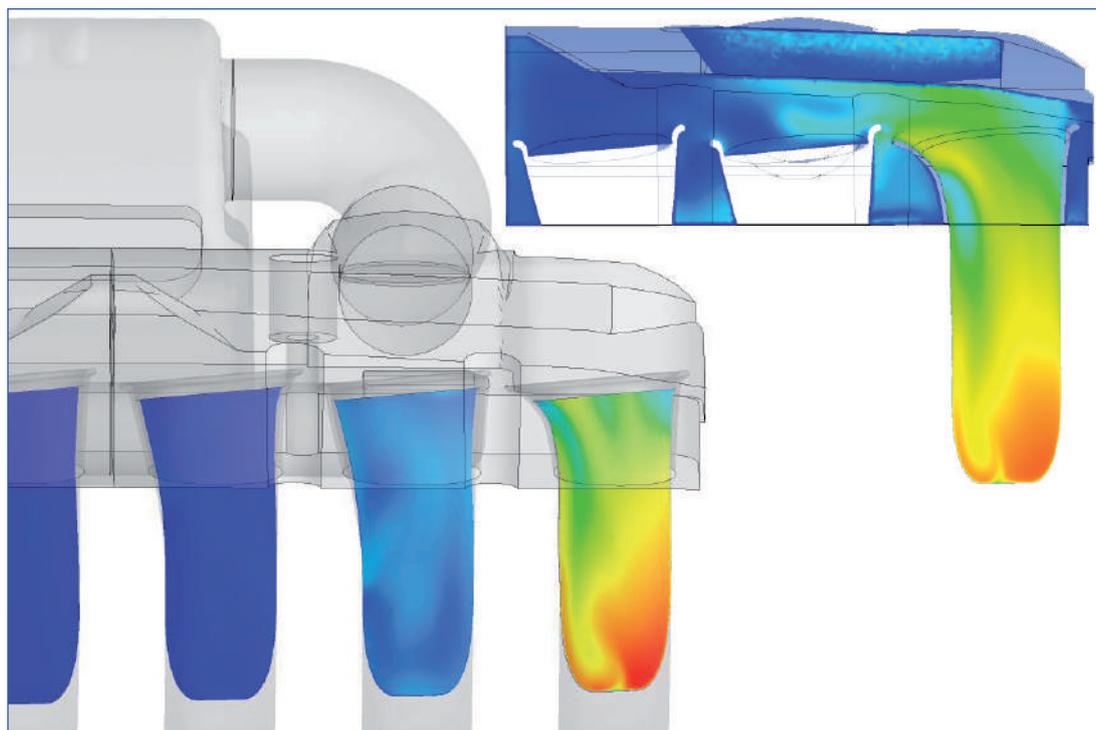
### STRATEGIA DI OTTIMIZZAZIONE

I fattori d'amplificazione delle modifiche di forma costituiscono le variabili del problema di ottimizzazione. Le nuove configurazioni geometriche

sono ottenute combinando le due soluzioni RBF e amplificandole in accordo con i valori selezionati dal criterio di ottimizzazione. Ogni runner è ottimizzato in modo indipendente tramite sei problemi di ottimizzazione simili basati sull'ipotesi che l'eventuale modifica degli altri condotti non influisca sulle prestazioni del runner attivo. La procedura d'ottimizzazione è basata sulla creazione di una tabella DOE (Design of Experiments), popolata con 20 candidati, selezionati con la tecnica di campionamento LHS (Latin hypercube sampling) [4], e sulla generazione di una superficie di risposta, utilizzando il metamodello Kriging [5], secondo lo schema riportato in Figura 17.

La funzione obiettivo delle sei ottimizzazioni è la caduta di pressione fra l'ingresso e l'uscita del dominio.

Figura 19 - Verifica della soluzione ottimizzata.



Le superfici di risposta ottenute dall'ottimizzazione dei singoli runner sono riportate nella Figura 18. La ricerca degli ottimi è immediatamente localizzabile nelle regioni blu delle superfici. Il miglioramento medio che è stato possibile ottenere con i sei condotti ottimizzati è stato nell'ordine del 2% con un massimo del 5% per il runner numero uno. La separazione è significativamente ridotta in tutti i condotti ma probabilmente esistono ancora margini di miglioramento esplorabili con un'implementazione della parametrizzazione geometrica più mirata e articolata.

#### VERIFICA DELLA SOLUZIONE

Lamborghini stima che una riduzione della caduta di pressione dell'ordine di grandezza ottenuta per le soluzioni ottimizzate comporti un aumento della potenza disponibile di circa 14 HP. La configurazione numerica utilizzata nella procedura di ottimizzazione utilizza tuttavia una versione ridotta della griglia di calcolo sulla base di una serie di ipotesi semplificative che influiscono sulla stima delle prestazioni assolute. Per verificare l'incremento delle prestazioni, l'analisi della soluzione ottimizzata è stata ripetuta utilizzando la griglia completa. Il campo di moto ottenuto nelle stesse condizioni della configurazione di ottimizzazione, con il runner 1 attivo, è riportato in Figura 19 e confrontato, utilizzando la stessa scala delle velocità, con la soluzione della configurazione di ottimizzazio-

ne. Qualitativamente le due soluzioni sono molto simili, confermando così la scelta di adottare la griglia semplificata per alleggerire il peso dei calcoli, ma la stima della riduzione della caduta di pressione è stata ridimensionata al 3.5%.

#### STAMPA 3D DEL COMPONENTE OTTIMIZZATO

Il passo finale di questo lavoro consiste nel verificare sperimentalmente il miglioramento ottenuto tramite prova al banco del motore utilizzando le forme dei condotti ottimizzati. A questo scopo HSL ha prodotto in stampa 3D i vari elementi derivati dall'ottimizzazione per essere montati sul motore al posto dei condotti originali (Figura 20). Le parti sono state fornite a Lamborghini per le prove su banco ma al momento della pubblicazione di questo articolo i risultati non sono ancora disponibili. Non è quindi ancora possibile chiudere questo lavoro con delle conclusioni sul confronto numerico/sperimentale. La tecnologia di Additive Manufacturing (AM) utilizzata è la Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS) in materiale Nylon Poliammide (PA).

#### CONCLUSIONI

La procedura di progettazione che abbiamo presentato ha permesso di individuare una soluzione in grado di migliorare le prestazioni della vettura tramite una riduzione del salto di pressione nel circuito di aspirazione del motore utilizzando un problema di ottimizzazione tutto sommato relati-

vamente modesto (monobiettivo con due variabili di design). Questo risultato, ottenuto con un'azione locale abbastanza limitata, suggerisce l'esistenza di ulteriori margini di miglioramento investigabili estendendo l'attenzione ad altre zone del circuito, utilizzando condizioni al contorno più rispondenti alle condizioni operative del motore ed utilizzando una parametrizzazione geometrica più flessibile ed estesa ad uno spazio di variabili più ampio.

Il miglioramento ottenuto nei vari condotti è risultato essere inoltre piuttosto eterogeneo con il massimo delle prestazioni nel condotto sul quale erano state preparate le soluzioni RBF per la parametrizzazione delle geometrie (che sono state poi adattate, con i dovuti accorgimenti, agli altri condotti). I margini di miglioramento sono quindi esplorabili anche sfruttando ulteriormente la flessibilità costruttiva offerta dalla tecnologia di stampa 3D ampliando le combinazioni di parametrizzazioni anche complesse adattandole in modo più mirato alle esigenze locali. In ogni caso alla luce dei risultati ottenuti la conclusione più importante risulta essere che l'obiettivo prefissato di dimostrare le potenzialità del metodo in associazione con la versatilità della stampa 3D è stato pienamente raggiunto fornendo anche indicazioni incoraggianti nell'ottica delle grandi opportunità che offre l'implementazione del metodo su architetture HPC. Dal punto di vista numerico il flusso di lavoro ha mostrato infatti di essere robusto ed efficiente.

#### ATTIVITÀ FUTURE

La parametrizzazione delle geometrie, come detto, è stata realizzata manualmente in una regione che è stata selezionata con una valutazione esperienziale del campo di moto. Un approccio dalle grandi potenzialità, sul quale l'Università di Roma è molto attiva, è legato all'utilizzo dell'informazione dei gradienti fornita con il metodo adjoint e alla loro associazione ai modificatori di forma locali. La tecnologia RBF Morph offre questa possibilità tramite un collegamento diretto con la soluzione adjoint fornita dal solutore ANSYS Fluent ed ha dimostrato di essere estremamente promettente [6].



Figura 20 – Condotti ottimizzati stampati in 3D.

#### RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato finanziato dalla comunità europea nell'ambito del progetto FORTISSIMO ([www.fortissimo-project.eu](http://www.fortissimo-project.eu)). Il titolo dell'esperimento presentato nel progetto è "HPC-Cloud-based Additive Manufacturing".

#### BIBLIOGRAFIA

1. S.-E. Kim and D. Choudhury, "A Near-Wall Treatment Using Wall Functions Sensitized to Pressure Gradient", in ASME FED Vol. 217, Separated and Complex Flows, ASME 1995.
2. S. Jakobsson and O. Amoignon, "Mesh deformation using radial basis functions for gradient-based aerodynamic shape optimization", *Computers & Fluids*, 36(6), pp 1119-1136, July 2007.
3. Marco E. Biancolini, "Mesh morphing and smoothing by means of Radial Basis Functions (RBF): a practical example using fluent and RBF morph", *Handbook of Research on Computational Science and Engineering: Theory and Practice*, IGI Global, Hershey, PA, 2012.
4. M.D. McKay, W. J. Conover and R. J. Beckman, "Latin Hypercube Sampling: A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code", *Technometrics* 21(2), pp. 239-245, 1979.
5. N. A. Cressie, "Statistics for Spatial Data", revised edition, John Wiley & Sons, New York, 1993.
6. E.M. Papoutsis-Kiachagias, S. Porziani, C. Groth, M.E. Biancolini, E. Costa and K.C. Giannakoglou, "Aerodynamic Optimization of Car Shapes using the Continuous Adjoint Method and an RBF Morpher", EUROGEN 2015, Glasgow (UK), 14 - 16 September 2015.