



Il metodo 50:50:50. Ottimizzazione aerodinamica della Volvo XC60

**Un esempio avanzato dell'uso del software RBF Morph
di Marco Evangelos Biancolini**

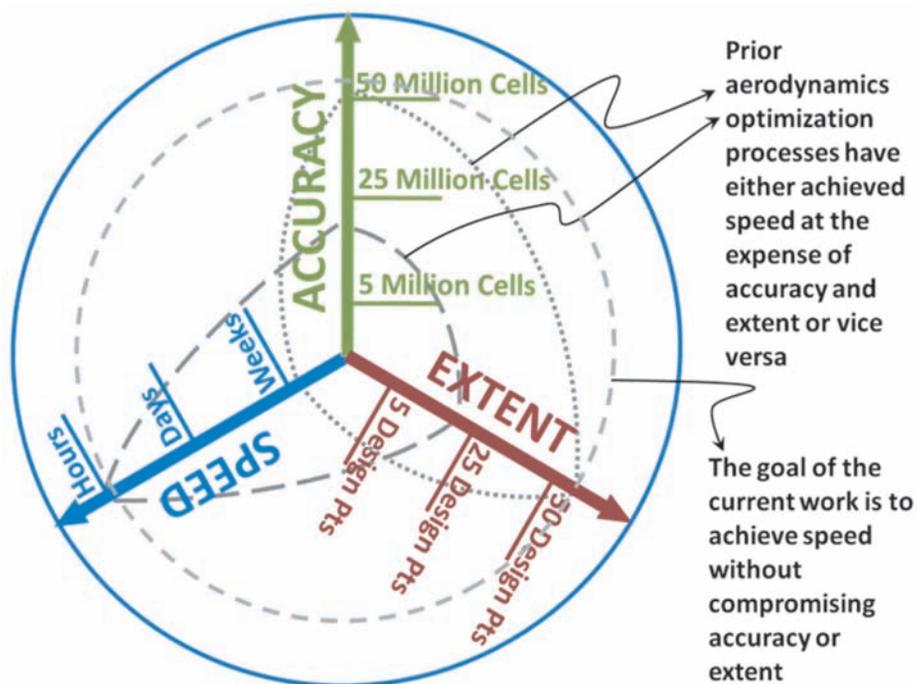
In questo articolo viene illustrato come il software di mesh morphing RBF Morph contribuisce al metodo "50:50:50", una procedura dedicata all'ottimizzazione di forma nel settore automobilistico in grado di vagliare in 50 ore il comportamento aerodinamico di 50 varianti di forma della vettura utilizzando un modello CFD molto accurato da 50 milioni di celle. Tali prestazioni vengono raggiunte grazie alla scalabilità in parallelo del solutore fluidodinamico ANSYS Fluent, ad un cluster HPC (descrivere acronimo) della Intel in grado di offrire il numero necessario di processori e al software di mesh morphing RBF Morph, che consente di aggiornare la forma del modello CFD direttamente in fase di soluzione. Il metodo viene presentato con riferimento ad un esempio industriale, la Volvo XC60.

Introduzione

La simulazione CFD consente di prevedere, con grande accuratezza, il comportamento aerodinamico di una vettura. Oltre a prevedere quantitativamente le forze scambiate con il fluido (nel caso stradale il parametro più importante è la resistenza) è possibile valutare localmente le pressioni aerodinamiche, il campo di moto e la struttura della scia. Tale accuratezza può essere raggiunta utilizzando delle griglie molto fitte del volume fluido con dimensioni complessive dell'ordine dei 50 milioni di celle.

La generazione di *mesh* di volume accurate richiede un grande lavoro manuale da parte dell'analista (tipicamente alcuni giorni): pulizia della geometria proveniente dal CAD, generazione ed ottimizzazione della *mesh* di superficie, generazione della *mesh* di volume ed impostazione dei parametri del solutore. L'esame di varianti della forma mediante la generazione di nuove griglie ha quindi un costo molto elevato e richiede tempi lunghi, limitando i progettisti all'esame di un numero ristretto di configurazioni.

La Fig. 1 illustra come accuratezza, velocità e completezza siano requisiti contrastanti. Per mantenere contenuti i tempi ed alta l'accuratezza è quindi necessario ridurre il numero di configurazioni; in alcuni casi si sacrifica l'accuratezza riducendo molto la dimensione del-



◀ Fig. 1 - **Compromesso fra accuratezza, tempo di calcolo e numero delle varianti esaminate usando i metodi tradizionali e il nuovo metodo proposto**

la *mesh* per poter esplorare un maggior numero di configurazioni.

Un metodo assai più efficace per esaminare in modo continuo diverse variazioni di forma (e loro combinazioni) è dato dal *mesh morphing*, una tecnica che consente di cambiare la forma mantenendo invariata la topologia della griglia. Solo le posizioni nodali vengono cambiate per rappresentare la nuova forma.

Uno degli approcci matematici disponibili per il *mesh morphing* è dato dalle *Radial Basis Functions* (RBF); esse consentono di controllare, in modo molto preciso, le superfici e di mantenere assai elevata la qualità delle celle di volume [1]. Tale tecnologia è disponibile nel software RBF Morph [2], le cui caratteristiche sono già state descritte nel numero di Gennaio-Febbraio 2011 di questa rivista [3].

La soluzione proposta nel metodo 50:50:50 [4] si basa sull'uso di RBF Morph per la parametrizzazione della forma. Nel presente articolo viene illustrato il metodo con riferimento ad un caso industriale, la Volvo XC60, approfondendo il tema della parametrizzazione della forma. Per ulteriori dettagli sull'intera procedura 50:50:50 si rimanda all'articolo [5].



◀ Fig. 2 - **Modello geometrico della Volvo XC60**

Dall'Università



▲ Fig. 3 -
Mesh di superficie
della vettura

Modello CFD di riferimento Mesh

La *mesh* di superficie (Fig. 3) è stata generata utilizzando il software ANSA (descrizione acronimo), controllando la qualità degli elementi. La dimensione degli elementi è stata ottimizzata zona per zona: parte frontale (da 3.0 a 4.0 mm), parabrezza (da 4.0 a 5.0 mm), portiere e finestrini (da 5.0 a 6.0 mm), tetto (da 6.0 a 8.0 mm), parte posteriore (da 4.0 a 5.0 mm) e sottoscocca (da 5.0 a 6.0 mm).

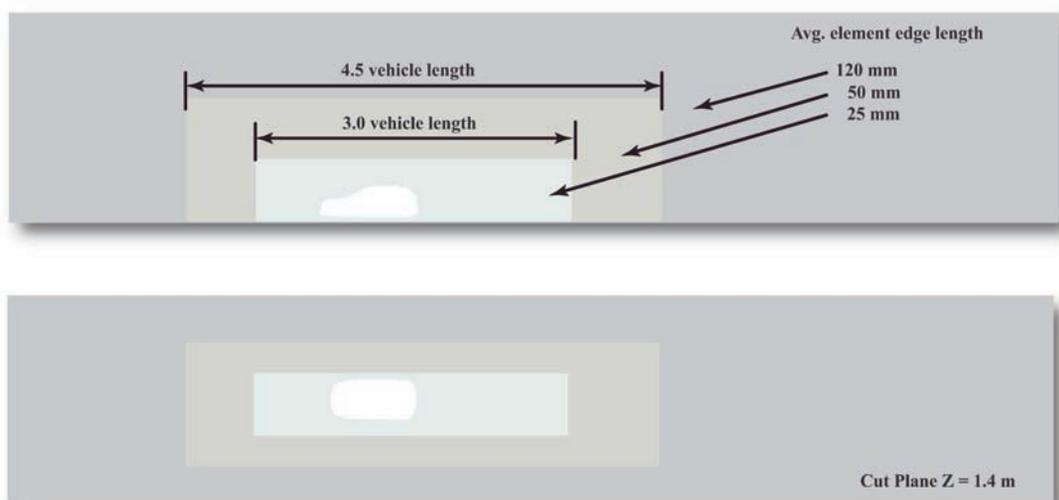
La *mesh* di volume utilizzata per modellare il fluido della galleria del vento è stata generata

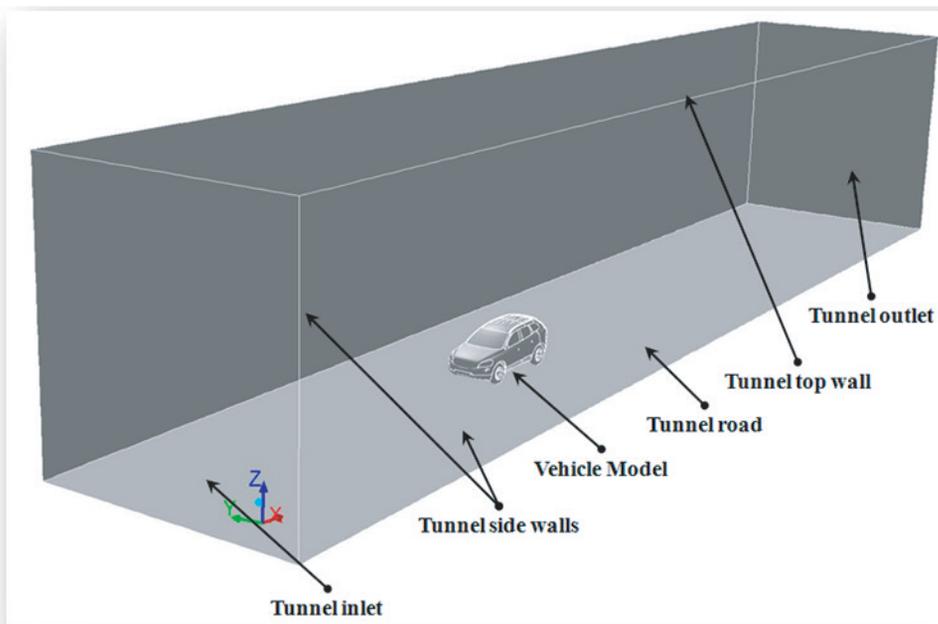
con TGrid; è costituita da 50.2 milioni di celle. Si tratta in questo caso di una *mesh* ibrida con 10 strati di prismi a parete (*First Aspect Ratio* 10, *Growth* 1.1), per un totale di 24.4 milioni di celle a parete; il resto del volume è stato riempito con tetraedri mantenendo la *Skewness* al disotto di 0.9.

Impostazione della simulazione

Le condizioni al contorno di riferimento sono state imposte all'ingresso della galleria (*Velocity Inlet* 100 kmph), all'uscita (*Pressure Outlet*, 0 Pa Gage), alle pareti laterali e alla parete superiore (*Wall, no-slip*).

► Fig. 4 -
mesh di volume
della galleria del
vento





◀ Fig. 5 -
Definizione delle
condizioni al
contorno

Si è utilizzato un approccio accoppiato stazionario del tipo: *Steady*, PBCS (*Pressure Based Coupled Solver*), *Green Gauss Node Based Gradient*. Il fluido è modellato come aria incompressibile ($Density = 1.225 \text{ kg/m}^3$), con un modello di turbolenza *k-eps* (*Realizable K-epsilon, Non-equilibrium wall treatment*). L'algoritmo di accoppiamento è il *Pressure Standard* con risoluzione sulla quantità di moto al secondo ordine su:

- Momentum,
- TKE (Turbulent Kinetic Energy),
- TDR (Turbulent Dissipation Rate).

Sono stati quindi impostati i seguenti parametri di controllo per stabilizzare la soluzione:

- *Courant Number* = 200;
- ERFs (*Explicit Relaxation Factors*) *Momentum e Pressure* = 0.75;
- URFs (*Under Relaxation Factors*):
 - *Density* = 1.0,
 - *Body Forces* = 1.0,
 - TKE e TDR = 0.8,
 - TR (*Turbulent Viscosity*) = 1.0.

Parametrizzazione della forma

La parametrizzazione della forma è stata realizzata utilizzando il software di *mesh morphing* RBF Morph.

Si tratta di un modulo *add-on* integrato nel solutore CFD ANSYS Fluent, che consente di definire un numero arbitrario di parametri di forma durante la fase di *set-up*. Per ogni parame-

tro di forma vengono salvate tutte le informazioni necessarie all'aggiornamento della griglia direttamente durante la fase di calcolo.

Tale approccio presenta il grande vantaggio di non dover salvare tutte le *mesh* e di rendere il modello CFD parametrico, visto che ogni parametro di forma può essere amplificato in modo continuo.

Poiché i parametri di amplificazione di forma (uno scalare per ogni parametro) possono essere controllati direttamente dal *Workbench* (e quindi dall'ottimizzatore integrato *DesignXplorer*), l'utente si deve limitare semplicemente a definire le variazioni di forma desiderate ed il *range* di validità di ogni parametro di amplificazione; il resto del processo di ottimizzazione risulterà completamente automatizzato.

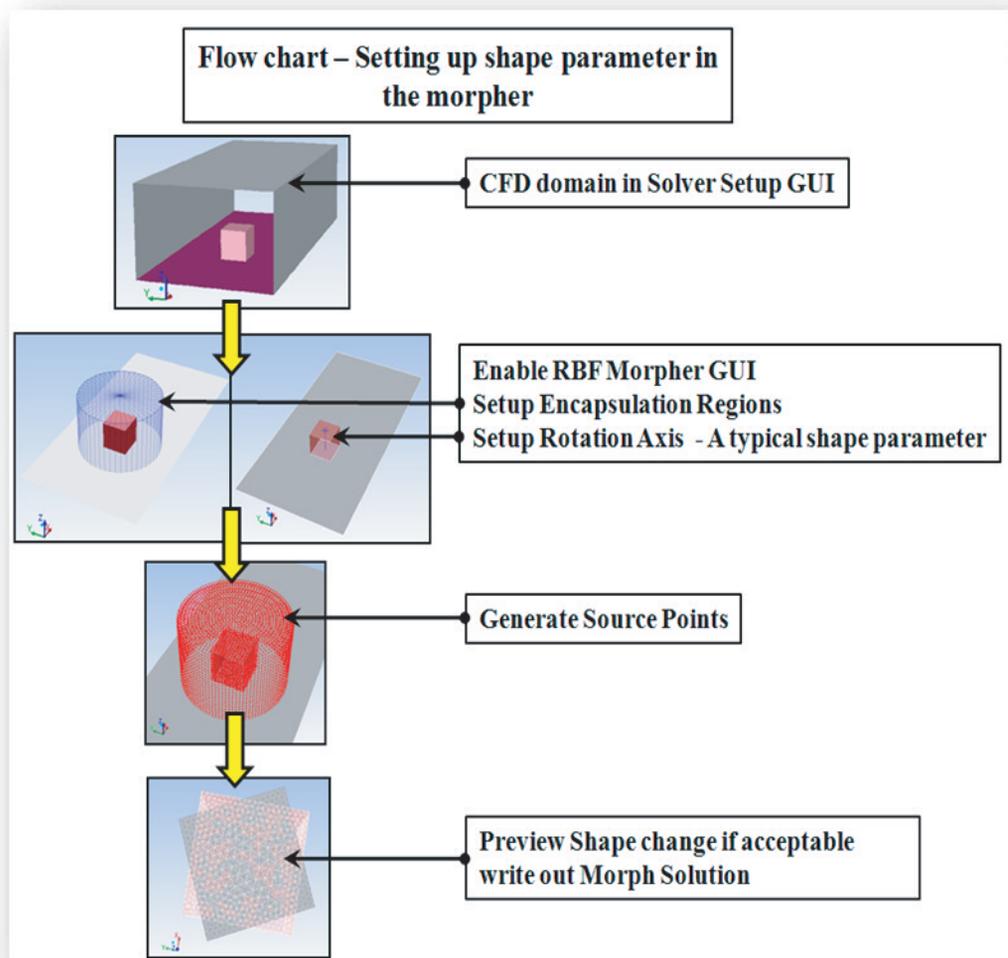
Il *morpher* si avvale della tecnica delle *Radial Basis Functions* (RBF), che consente di definire un certo numero di punti di controllo nello spazio (noti come punti sorgente nella nomenclatura delle RBF), con spostamento noto.

L'interpolazione RBF garantisce un campo di *morphing* esatto nei punti sorgente (nei limiti di una tolleranza assegnata) ed una transizione molto dolce altrove.

Il campo di spostamento è disponibile in forma chiusa con i principali vantaggi di garantire uno spostamento congruente sulle partizioni della *mesh* e di poter gestire qualsiasi tipo di cella, poiché il *morpher* agisce sola-

Dall'Università

► Fig. 6 -
Definizione di un
generico parametro
di morphing
utilizzando RBF
Morph



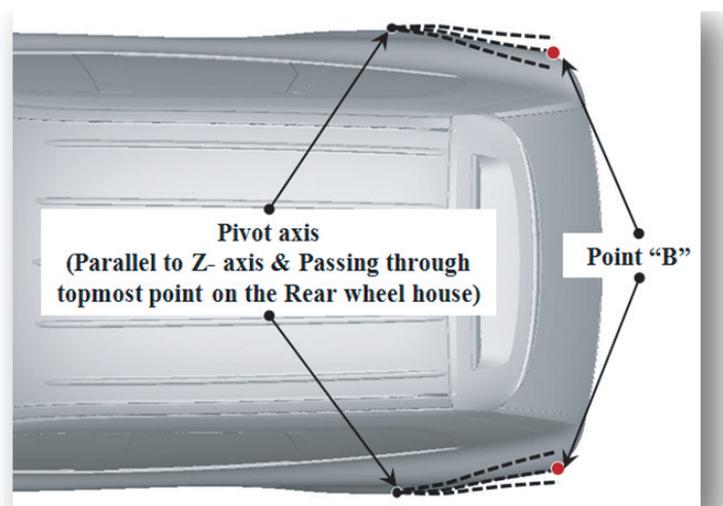
mente sulla posizioni dei nodi. È inoltre importante notare che, poiché la topologia della *mesh* rimane invariata, la variazione della forma non aggiunge i tipici rumori dovuti al *remeshing* che si hanno utilizzando metodi di ottimizzazione di forma basati sulla generazione di una nuova griglia di calcolo per ogni configurazione esaminata.

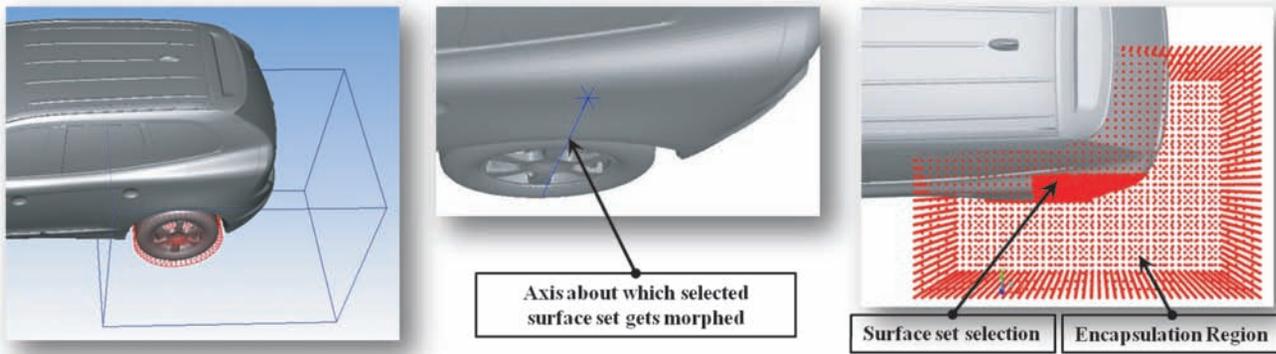
► Fig. 7 -
Descrizione del
parametro di forma
Boat Tail Angle

Le principali criticità del metodo sono la qualità delle celle, tipicamente deteriorata dalle deformazioni di *morphing*, e il tempo necessario al *fit* di RBF di notevoli dimensioni relativi a problemi di tipo industriale. Per quanto riguarda la qualità è importante notare come un posizionamento accorto dei punti sorgente, abbinato ad una RBF dolce (*bi-harmonic*

kernel noto anche come *smoothest interpolant*) possano contribuire alla minimizzazione della distorsione.

Per quanto concerne il numero di centri, RBF *Morph* dispone di un solutore RBF veloce che





consente di risolvere problemi di medie dimensioni (30-40.000 punti sorgente) in pochi minuti ed in grado di gestire anche problemi molto grandi (500.000-1.000.000) in meno di un'ora.

La parte più delicata per la parametrizzazione della forma, è data dalla fase di definizione dei parametri di forma utilizzando l'interfaccia grafica di *RBF Morph*, ovvero la definizione di una serie di regole per generare i punti sorgente, estraendo informazioni dalla *mesh* stessa o avvalendosi di superfici notevoli.

Il *workflow* per la definizione di ogni singolo parametro è rappresentato in Fig. 5. Per la geometria della Volvo XC60 sono stati definiti i seguenti parametri di forma:

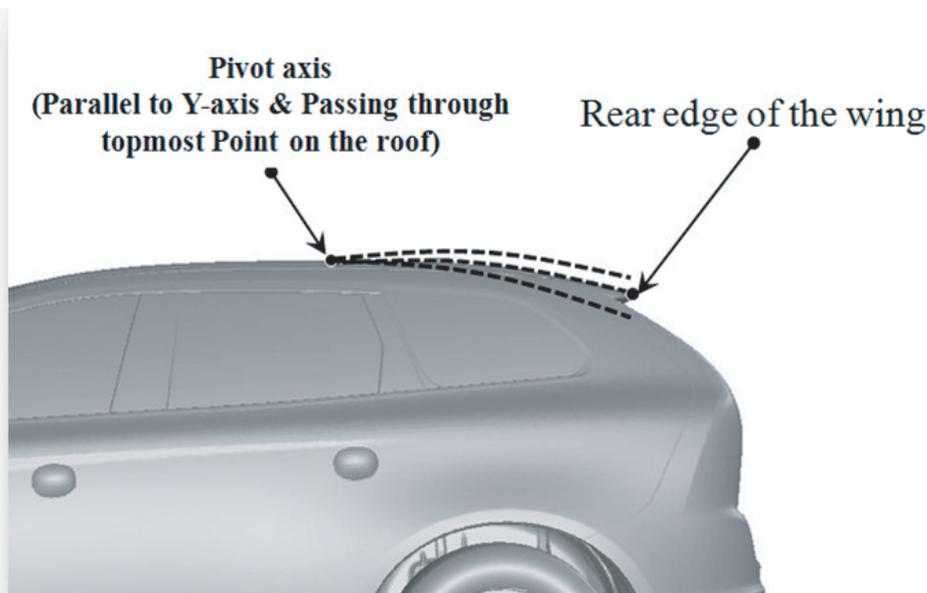
- *Boat Tail Angle*,
- *Long Roof Drop Angle*,
- *Green House*
- *Front Spoiler Angle*.

Boat Tail Angle

Consiste nel cambiamento della parte posteriore della vettura (Fig. 6), viene definito ruotando simmetricamente la parte posteriore attorno a degli assi verticali passanti per il punto più alto del passaruota posteriore. Il *range* di validità viene imposto limitando il movimento del punto B (+/- 20 mm).

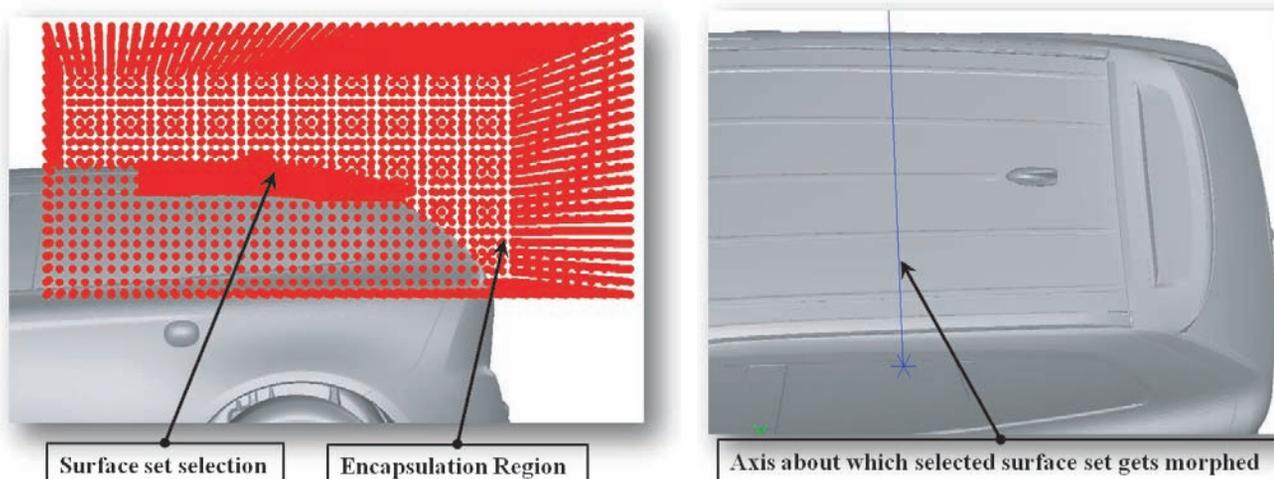
L'impostazione del parametro di forma utilizzando *RBF Morph* consiste nella definizione di un *box* per limitare il volume di azione; su tale *box* viene posta una distribuzione di punti sorgente con spostamento nullo, in modo da portare a zero il campo di *morphing*; la zona all'interno del volume viene quindi controllata con due *set* di punti estratti dalle superfici: il primo *set* impone a tutti i punti della ruota di rimanere nella posizione originale; il secondo *set* impone una rotazione rigida ad una parte dei punti della parte superiore del passaruota.

▲ Fig. 8 - RBF set-up per il parametro di forma Boat Tail Angle



◀ Fig. 9 - Descrizione del parametro di forma Long Roof Drop Angle

Dall'Università



▲ **Fig. 10 -**
RBF set-up per il
parametro di forma
Long Roof Drop
Angle

La Fig. 8 mostra i punti utilizzati per la definizione del problema RBF. È importante notare che tutte le zone incluse nel volume di deformazione (*mesh* di volume e di superficie) verranno deformate dalla RBF. La superficie della vettura verrà quindi deformata con continuità passando dallo spostamento imposto dalla rotazione rigida allo spostamento nullo ai bordi del *box*.

Long Roof Drop Angle

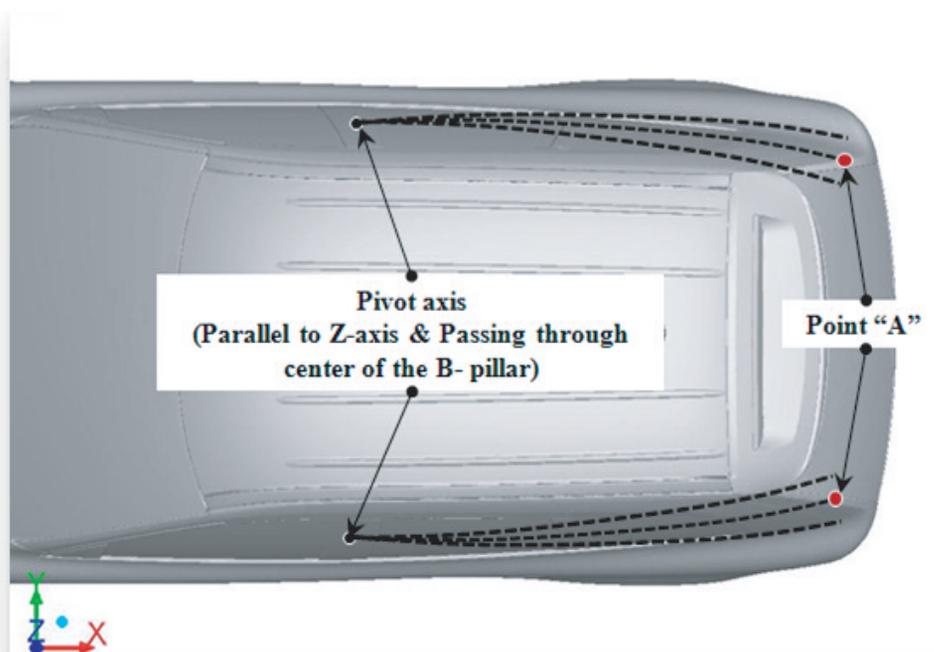
Questo parametro controlla l'inclinazione del tetto nella parte posteriore. Viene definito come rotazione della parte posteriore del tetto rispetto ad un asse trasversale alla vettura passante

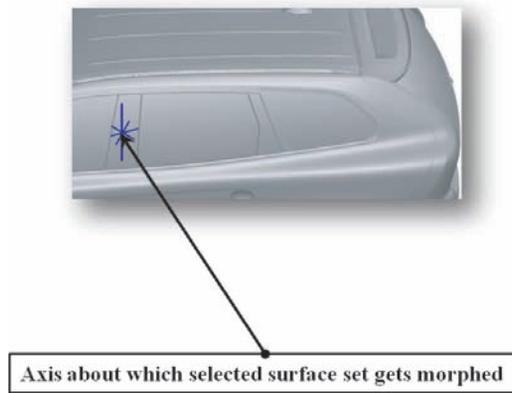
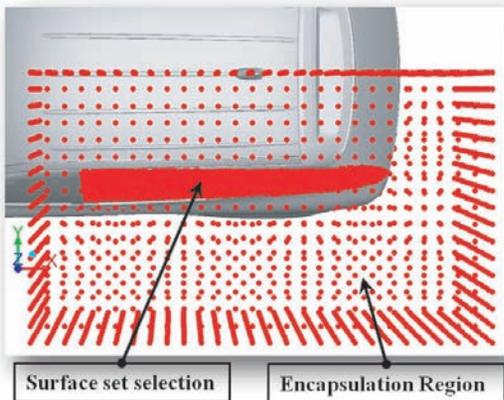
per il punto più alto del tetto stesso (Fig. 9).

Il *range* di validità di questo parametro viene controllato in base al movimento verticale del bordo dell'alettone posteriore: 30 mm verso l'alto e fino a 45 mm verso il basso, quest'ultimo calcolato rispetto alla tangente iniziale del cerchio di rotazione.

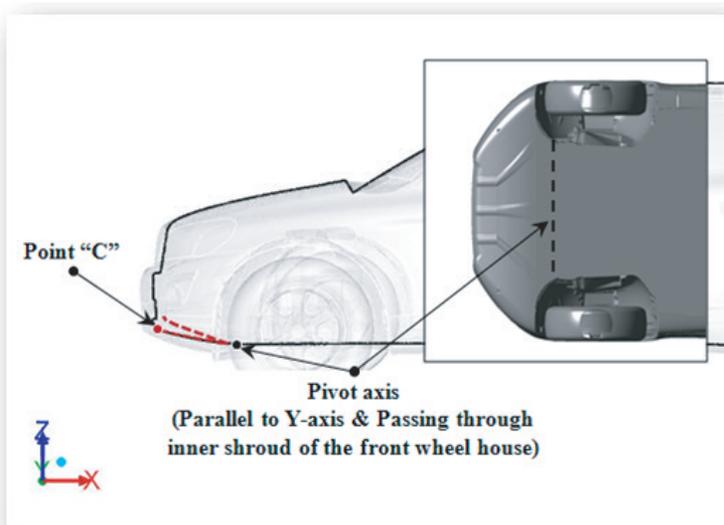
Il *set up* dei punti RBF risulta, in questo caso, più semplice, poiché è sufficiente definire un *box* per rappresentare la porzione di volume (e superficie) da deformare, ed una zona della parte posteriore del tetto dove imporre una rotazione rigida (Fig. 9).

► **Fig. 11 -**
Descrizione del
parametro di forma
Green House





▲ Fig. 12 - RBF set-up per il parametro di forma Green House

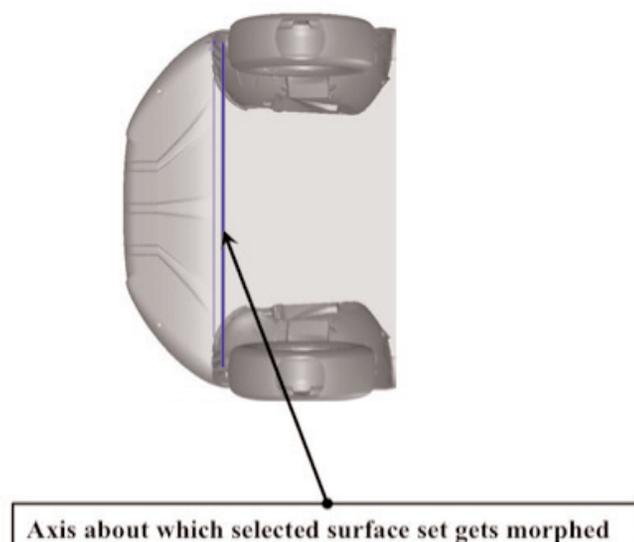
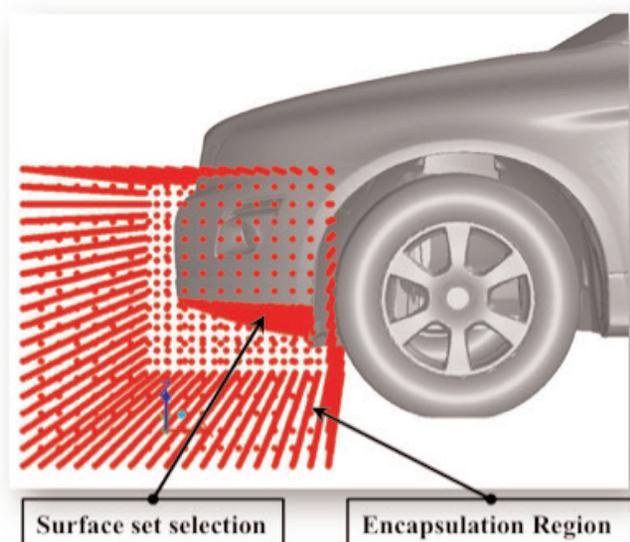


Green House

Questo parametro è definito in modo simile al *Boat Tail Angle*; riguarda, in questo caso, la parte più alta del posteriore della vettura e l'asse di rotazione verticale è passante per la mezzeria del montante fra le portiere anteriori e posteriori (Fig. 11). Il *range* viene limitato da un movimento di +/- 20mm del punto A, calcolato in direzione tan-

◀ Fig. 13 - Descrizione del parametro di forma Front Spoiler Angle

▼ Fig. 14 - RBF set-up per il parametro di forma Front Spoiler Angle

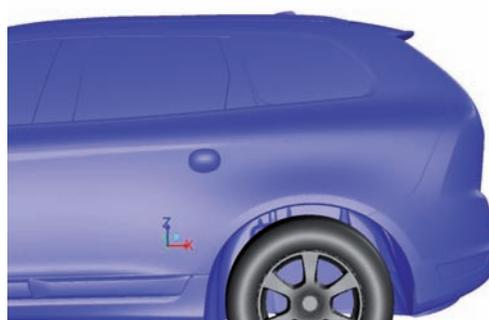
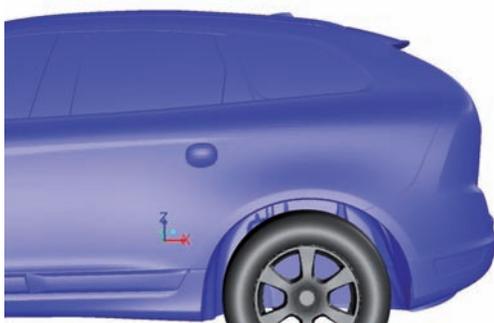


Dall'Università

► Fig. 15 -
Effetto parametro
Boat Tail Angle



► Fig. 16 -
Effetto parametro
Long Roof Drop
Angle



► Fig. 17 -
Effetto parametro
Green House



► Fig. 18 -
Effetto parametro
Front Spoiler Angle



genziale rispetto alla rotazione. Anche in questo caso il *set-up* RBF è dato da un *box* ed un insieme di punti estratti dalla superficie della vettura (Fig. 12).

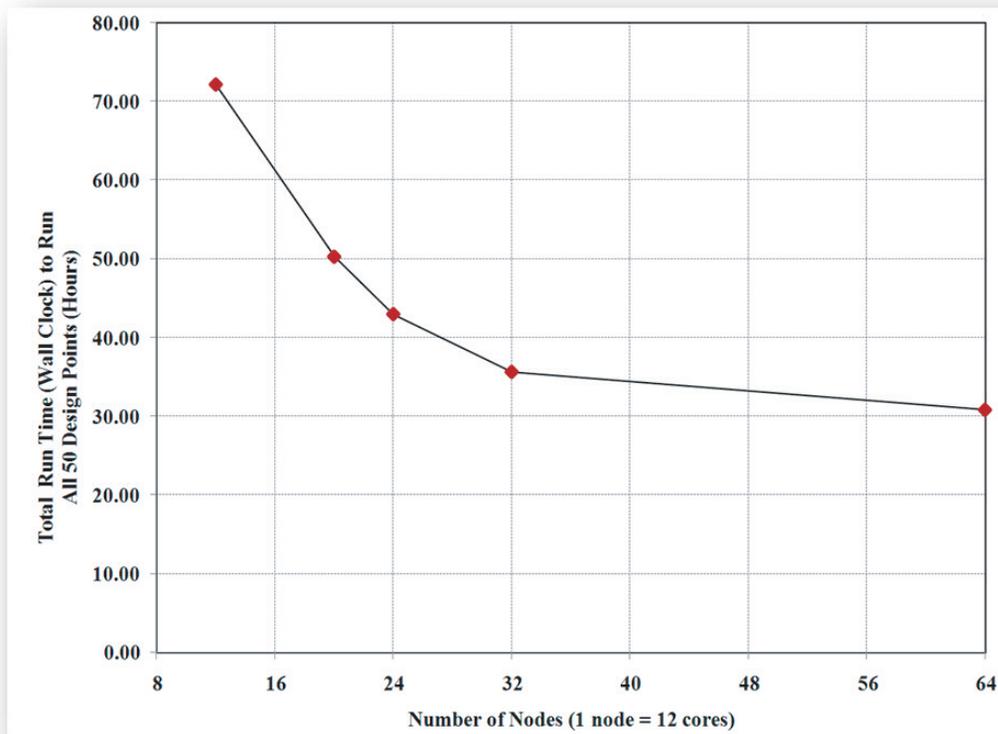
Front Spoiler Angle

La posizione dello *spoiler* viene controllata mediante una rotazione attorno ad un asse orizzontale passante per la spalla interna dei

passaruota anteriori (Fig. 13). Il campo di validità viene controllato in base al movimento verticale del punto C nel *range* +/-30mm. Il *set-up* RBF è illustrato in Fig. 14.

Risultati

Nelle Figg. da 15 a 18 si riporta l'effetto che ogni parametro di forma ha sulla superficie della macchina considerando i due estremi di vali-

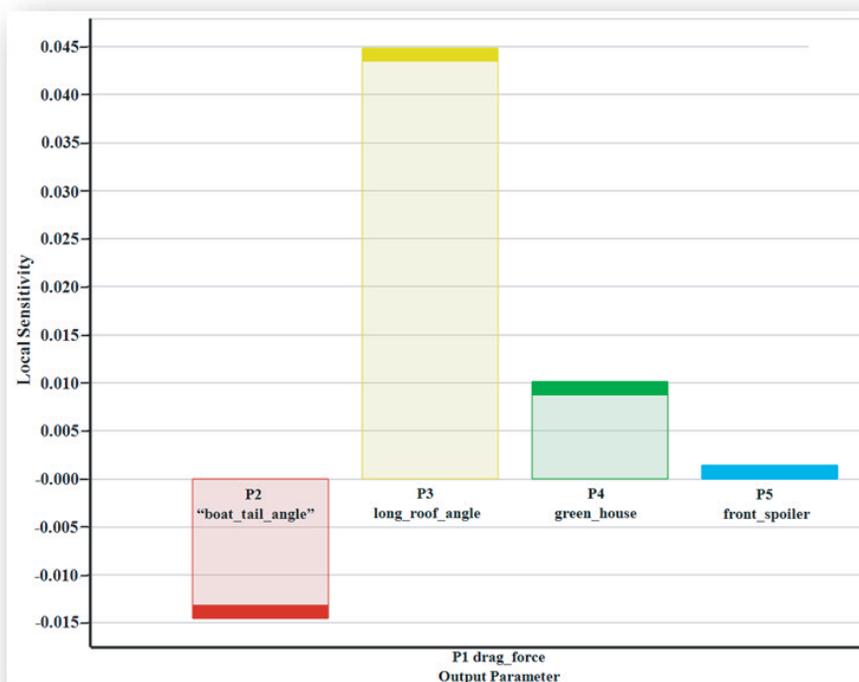


◀ Fig. 19 – Tempo necessario per l'intero calcolo al variare del numero dei nodi di calcolo

dità. Nel *range* di interesse la *mesh* risulta valida e mantiene una qualità ancora accettabile rispetto al requisito sulla massima *Skewness*.

Per arrivare alle 50 forme è stata generata una DOE *table* costituita dai 49 punti rimanenti; ogni combinazione consiste in un *set* di 4

valori per i 4 parametri di forma. La tabella DOE è ottimizzata avvalendosi di un algoritmo di *Optimal Space Filling* in modo da ottenere il maggior numero di informazioni possibile sul comportamento dell'intero spazio parametrico, utilizzando i 50 punti di calcolo disponibili. Per ogni punto di calcolo, oltre alla soluzio-



◀ Fig. 20 – Analisi di sensibilità

Dall'Università

► **Tab. 1 -
Risultati
ottimizzazione**

Design Points	Boat Tail Angle (P2)	Long Roof Angle (P3)	Green House (P4)	Front Spoiler Angle (P5)	Drag Force (N) (P1)
1	0.000	0.000	0.000	0.000	388.01
9	0.000	1.500	0.000	1.900	393.01
19	1.850	-2.300	-0.700	0.000	372.30
25	-1.850	1.500	-0.700	0.000	397.33

ne di flusso completa, viene calcolata la resistenza all'avanzamento; la soluzione viene iterata per ogni geometria fino a che la forza resistente non si sia stabilizzata.

L'intera procedura è stata ripetuta più volte (Fig. 19) al variare del numero di nodi di calcolo parallelo utilizzando, un *cluster* Intel con le seguenti caratteristiche:

- Intel's Endeavor Cluster,
- Intel Xeon X5670 (dual socket),
- Clock speed 2.93 GHz,
- Six cores per socket (12 cores per node),
- 24 GB RAM @ 1333 MHz, SMT ON,
- Turbo ON, QDR Infiniband, RHEL Server Release 6.1.

▼ **Fig. 21 -
Andamento della
scia. Configurazione
1 sx configurazione
19 dx**

Come si può osservare dalla Fig. 19 per arrivare alla prestazione 50:50:50 sono necessari 252 cuori; la massima potenza di calcolo (768 cuori) porta il tempo totale a circa 30 ore (50:50:30); volendo accettare tempi di calco-

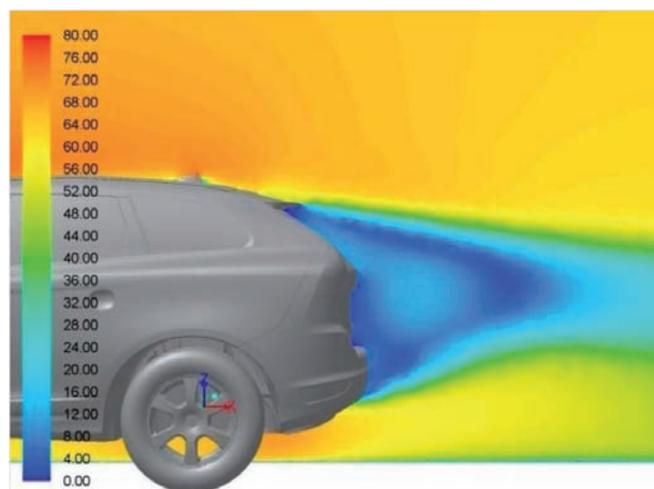
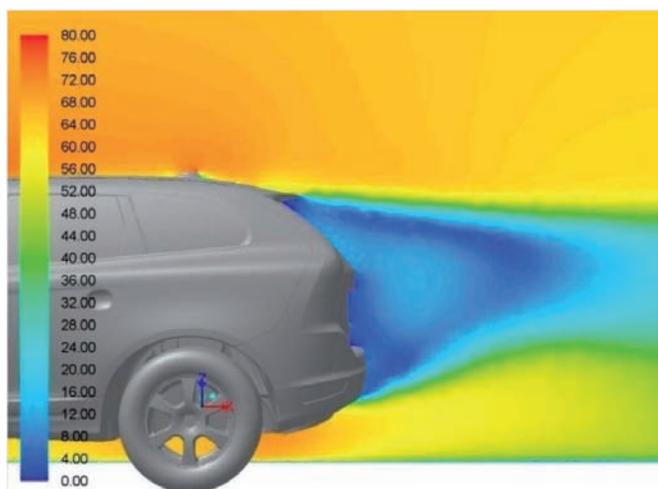
lo maggiori (50:50:75) è sufficiente dotarsi di una risorsa con 144 cuori.

Per quanto riguarda l'ottimizzazione si riporta in Fig. 20 l'andamento della sensibilità, da cui si evince che il parametro più significativo è l'angolo di inclinazione del tetto.

La Tab. 1 riporta alcune configurazioni notevoli in termini di *drag* (massimo, minimo, *baseline*). In particolare confrontando la configurazione originale (1) e la configurazione di *mino drag* (19) si osserva una riduzione di *drag* pari circa al 4%. Tale variazione è evidenziata dalla differente struttura della scia riportata nella Fig. 20.

Conclusioni

Questo articolo riassume le conclusioni più importanti del progetto 50:50:50, che dimostra come sia possibile vagliare numerose configurazioni (50), mantenendo una grande accuratezza (50 milioni di celle) in un tempo accetta-



bile (50 ore). Ciò è possibile grazie all'uso di un solutore CFD avanzato (ANSYS Fluent) in grado di scalare anche con grandi numeri di processi paralleli, abbinato ad una risorsa di calcolo adeguata (*cluster Intel Endeavor*) e ad un tool di *mesh morphing* (RBF Morph).

La parametrizzazione della forma utilizzata 0.000 per imporre le variazioni decise dai progettisti della Volvo è stata illustrata nel dettaglio dimostrando le prestazioni del *mesh morphing* su un problema industriale concreto.

Tutti i parametri di forma sono stati testati nei range di validità imposti dalle specifiche di progetto ottenendo *mesh* valide e di buona qualità.

È interessante osservare che lo strumento di *mesh morphing* RBF Morph è nato nel 2007 su specifica richiesta di un *top team* di Formula 1. Come molto spesso accade, la Formula 1 spinge la ricerca verso innovazioni tecnologiche e metodologiche che, in tempi brevi (3-5 anni), possono avere ricadute importanti sulla produzione di serie.

Ringraziamenti

Il progetto 50:50:50 è frutto di una collaborazione fra ANSYS Inc., Intel, RBF Morph e Volvo.

Bibliografia

- [1] S. Jakobsson, O. Amoignon, "Mesh deformation using radial basis Functions for Gradient based aerodynamic shape Optimization", *Computers and Fluids* Volume: 36, Issue: 6, July, 2007, pp. 1119-1136
- [2] M. 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, 2012. 347-380. Web. 14 Jun. 2012. doi:10.4018/978-1-61350-116-0.ch015
- [3] E. Abbasciano, M.E. Biancolini, "Shape morphing of CFD Models: Fluent and RBF Morph combine for the Optimisation of a FSAE Car Airbox", *Ingegneria dell'Autoveicolo* VOL. 64 N.1/2 Jan/Feb 2011
- [4] A. Khondge, S. Sovani, "Scaling new Heights in Aerodynamics Optimization: the 50:50:50 Method", *White Paper ANSYS Inc.* 2012
- [5] A. Khondge, S. Sovani, "An Accurate, Extensive, and Rapid Method for Aerodynamics Optimization: The 50:50:50 Method", *SAE Technical Paper 2012-01-0174*, 2012, doi:10.4271/2012-01-0174



Marco Evangelos Biancolini

Ha studiato e lavora presso l'Università di Roma Tor Vergata. Laureato con lode nel 1997 ha poi completato il dottorato di Ricerca in Progettazione dei sistemi Meccanici nel 2001.

Ricercatore a tempo pieno presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dal 2000, insegna presso la cattedra di Costruzione di Macchine dal 2002.

È coordinatore Scientifico del gruppo TVK (Tor Vergata Karting) dal 2002. Le esperienze professionali comprendono la progettazione strutturale nel settore aerospaziale e l'ottimizzazione aerodinamica nella Formula 1.

Ricopre il ruolo di Faculty Advisor del team Formula SAE di Tor Vergata dal 2006.

Premiato per il "Most Advanced Approach using integrated and combined simulation methods" presso la European Automotive Simulation Conference (EASC 2009) per la presentazione "Industrial Application Of The Meshless Morpher RBF Morph To A Motorbike Windshield Optimisation" in occasione del lancio del software RBF Morph di cui è autore.

e-mail: biancolini@ing.uniroma2.it