

TECNICHE DI SIMULAZIONE IN CAMPO AUTOMOBILISTICO



La spinta verso la riduzione dei tempi e dei costi ha guidato la progettazione virtuale verso potenti e veloci metodi di calcolo: oltre al tradizionale FEM si sono sviluppati altri metodi di grande valore predittivo. Tale tendenza ha formato un ingegnere progettista orientato verso una conoscenza di metodi matematici e strumenti numerici; parallelamente si è sviluppata una forza verso potenze di calcolo crescenti e gestioni di grandi risorse computazionali; queste diverse spinte stanno formando una figura professionale nuova, ridisegnando il ruolo e le competenze dell'ingegnere progettista.

Roberto Vadori

1. UNA VISIONE RISTRETTA?

Rischiando di esordire con una banalità, si deve premettere che un autoveicolo è un sistema complesso: a tal punto che per un ingegnere di oggi è difficile avere la stessa conoscenza estesa e approfondita dei vari sistemi che compongono un veicolo come quella che poteva avere un grande ingegnere di quarant'anni fa: ho in mente Dante Giacosa, *si parva licet*. Ciò per dire che oggi un autoveicolo è progettato integrando le più diverse competenze e abilità, e un ingegnere con esperienza nella progettazione strutturale di un autoveicolo ha comunque una visione settoriale. Non necessariamente una visione ristretta, anzi a volte anche molto ampia, a seconda della sua esperienza e della sua formazione, dei compiti svolti durante la progettazione e anche del percorso seguito in questi ultimi anni, che sarebbe riduttivo definire frenetici e tumultuosi.

Quella che segue è dunque un'analisi vista da una prospettiva particolare: quella di un progettista, formatosi in una scuola Politecnica la quale ricalca(va) l'impostazione ottocentesca

delle Scuole d'Ingegneria francesi, che ha avuto la fortuna di poter iniziare ad usare i primi sistemi di calcolo dedicati all'analisi strutturale e - naturale evoluzione - alla simulazione numerica in senso lato dei sistemi meccanici che compongono un veicolo.

2. I PROBLEMI MECCANICI E LA SIMULAZIONE

2.1. I problemi meccanici

Per poter parlare con chiarezza del presente e del futuro della simulazione in campo autoveicolistico, è necessario tenere conto anche del suo passato, che non sempre è un passato recente.

Ricordiamo che l'argomento della Meccanica (classica) è lo studio del moto dei corpi; del "come" e del "perché" del moto, ovvero del modo in cui un corpo si muove e delle cause che provocano e determinano il moto. È una definizione storica che, se può essere fatta risalire alla classicità greca, ha trovato la sua sistemazione compiuta nella metà del XIX secolo con Kirchhoff.



Gli strumenti a disposizione degli ingegneri progettisti, sino a pochi decenni fa, erano sostanzialmente gli stessi a disposizione degli ingegneri delle scuole Politecniche dell'ottocento: una solida base costruita sul calcolo infinitesimale, sulla meccanica razionale, sulla meccanica del continuo. Diciamo che i metodi ed i risultati di Newton, Leibniz, Lagrange e Cauchy hanno costituito e tutt'ora costituiscono il nocciolo della formazione culturale e tecnica di un ingegnere meccanico: un arco di tempo pari a due secoli.

Agli occhi e alla mente di un ingegnere dunque la meccanica di un corpo è descrivibile mediante un insieme di equazioni differenziali, generalmente alle derivate parziali nelle coordinate spaziali e alle derivate totali nel tempo. La soluzione di questa serie di equazioni fornisce un legame diretto tra la posizione occupata da un corpo in un certo istante di tempo e la posizione occupata in ogni istante futuro. Il valore predittivo di una soluzione di questo tipo è decisivo: dato il "qui ed ora", il modello matematico della soluzione delle equazioni per-

mette di dire tutto sul passato e sul futuro del sistema meccanico (naturalmente fatte salve le ipotesi che hanno permesso di ottenere la soluzione).

La soluzione delle equazioni della meccanica è ottenibile "in forma chiusa", ovvero con legame diretto tra spazio occupato dal corpo e tempo, in pochi fortunati casi¹: non appena la complessità del modello meccanico cresce, anche di poco, la soluzione sfugge, diventa irraggiungibile (Figura 1): è necessario ricorrere ad altri mezzi per ottenere delle risposte.

Gli ingegneri meccanici progettisti di autoveicoli si confrontano ogni giorno con una forma particolare del problema posto dalla Meccanica: si chiedono: "come si dispone nel tempo un autoveicolo"? Mentre la risposta può, almeno all'apparenza, essere immediata in condizioni, diciamo così, "normali", diventa molto meno semplice se per esempio ci si chiede: "come si dispone nel tempo un autoveicolo che urta contro una parete fissa partendo da una velocità di 50 km/h? E come si muovono all'interno di esso dei simulacri di passeggeri? E come si muove, si deforma, si dispone uno spazio che li racchiude e che viene chiamato "spazio di sopravvivenza"?". La risposta a queste domande è tutt'altro che banale. Non solo, è tutt'altro che accademica, visto che decide, o aiuta a decidere, della vita degli occupanti di un veicolo coinvolto in un incidente stradale.

2.2. La simulazione

La soluzione delle equazioni differenziali, oltre che in forma chiusa, può essere ottenuta in forma numerica approssimata. Le tecniche algebriche coinvolte vanno sotto il generico nome di "tecniche di discretizzazione", dato che il loro obiettivo è operare su quantità continue (lo spazio e il tempo) ponendo in relazione tra loro una serie di quantità discrete (una rete di punti nello spazio e una serie di istanti temporali intervallati tra loro). A seconda della "granularità" della discretizzazione, della fittezza di suddivisione dello spazio e del tempo in istanti e punti, si hanno - rispettando alcune condizioni - delle soluzioni numeriche che si avvicinano



FIGURA 1
Michael Maier, Atalanta Fugiens (1618): una metafora dell'attività ingegneristica

¹ Fortunatamente i "pochi" casi sono tecnicamente essenziali: la teoria delle travi, dei gusci, dei solidi a simmetria cilindrica e a parete sottile forniscono al progettista una serie di strumenti fondamentali per la progettazione razionale delle strutture meccaniche.

con accuratezza via via crescente alla soluzione analitica che si otterrebbe risolvendo la serie di equazioni. Non solo, le tecniche di discretizzazione permettono di fare delle stime dell'errore che si commette, affermando che l'errore non può essere superiore a una certa quantità, e permettono di fare anche una stima del prezzo che si deve pagare per ottenere una soluzione più precisa, sia in termini di risorse computazionali che di tempo occorrente.

Tali tecniche affondano le loro radici in anni di molto posteriori a Lagrange e Cauchy: quasi un secolo e mezzo dopo. Le radici di questi nuovi metodi sono americane ma anche europee: a metà degli anni '50 Clough a Berkeley, in California, insieme a Turner della Boeing e Argyris a Stoccarda, in Germania, iniziano a sviluppare quello che oggi è diventato il metodo di soluzione principale per i problemi ingegneristici complessi: il Metodo degli Elementi Finiti (FEM, *Finite Element Method*). Il metodo nasce non senza difficoltà: per molti anni il *Journal of Applied Mathematics* rifiutò articoli sul metodo FEM perché considerato di nessun valore scientifico. Ma per i molti progettisti impegnati nella progettazione aeronautica e aerospaziale, il FEM venne subito considerato per quello che era: una promessa molto chiara. Finalmente ci si poteva cimentare nell'analisi e nel progetto delle strutture complesse del mondo reale².

Il risultato finale di queste tecniche è, in generale, un sistema lineare, o una successione di sistemi lineari, che deve essere risolto nelle sue incognite. Quante incognite? Alcune centinaia di migliaia, sino a giungere ad alcuni milioni. Il FEM procede di pari passo con l'evoluzione degli elaboratori: senza di essi non sarebbe un metodo proponibile. Il primo elaboratore che risolse un problema FEM fu, nel 1957, un IBM 701 dell'Università di Berkeley; l'elaboratore, dotato di unità a nastro e di una RAM di 4096 locazioni di memoria da 16 bit, poteva risolvere al massimo un sistema di circa 40 equazioni lineari simultanee.

Sarebbe certamente interessante seguire l'evoluzione del metodo FEM confrontandolo di

pari passo con l'evoluzione dei calcolatori, sino a delineare la situazione presente, dove una simulazione FEM è condotta su elaboratori con CPU a frequenza di clock dell'ordine dei 3 GHz, con RAM dell'ordine dei GBytes e spazio su disco misurato in TBytes, con una legge di crescita esponenziale delle prestazioni apparentemente inarrestabile. Oggi un'analisi strutturale FEM è in grado di gestire un *full crash* di un autoveicolo come un calcolo ormai considerato di routine. Ma la tendenza è davvero quella che sembra suggerirci una applicazione della legge di Moore o forse siamo vicini ad un cambiamento inatteso?

3. NUOVE TECNICHE DI SIMULAZIONE

È difficile fare previsioni sul futuro della progettazione numerica dell'autoveicolo; per esempio, stanno nascendo metodi numerici nuovi, non più vincolati ad una delle tradizionali strettoie, sia in termini di costo che di tempo, della costruzione di un modello numerico: la discretizzazione spaziale e la costruzione della *mesh*. Metodi *meshless*, come per esempio il relativamente meno recente metodo SPH, *Smoothed Particle Hydrodynamics*, iniziano già oggi ad essere implementati in codici commerciali, ma il campo dell'applicazione dei metodi SPH nella meccanica strutturale è ancora piuttosto inesplorato. Altri metodi che hanno invece iniziato a percorrere una strada già decisamente rivolta verso la maturità applicativa si basano su un approccio statistico del modello numerico.

Un primo esempio di applicazione di tecniche non tradizionali proviene da un studio completamente diverso dal FEM, nato cercando di risolvere un problema di interesse industriale: qual è l'effetto di una raffica di particelle sollevate dalle ruote in moto sul sottoscocca e sulle parti in vista di un veicolo? Il fenomeno, noto come "*stone chipping*", determina il rapido insorgere di nuclei di corrosione nelle zone interessate (Figura 2), se non adeguatamente protette, ma il *layout* dei sistemi di protezione, nel caso specifico strati di vernici protettive sul sottoscocca o pellicole trasparenti sulle parti in vista, è deciso in base all'esperienza e ad una certa qual dose di intuito.

² Ted Belytschko *et alii*, *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*, p. 4.



FIGURA 2

“Stone Chipping” su parti in vista di un autoveicolo. L’urto delle particelle sollevate dalle ruote durante il moto del veicolo è causa di innesco di corrosione sulle parti in vista colpite

Il problema fu proposto dal gruppo FIAT Auto ad AMET ed Altair Engineering con l’obiettivo di sviluppare un metodo per la progettazione razionale della disposizione delle pellicole protettive e degli strati di vernice assorbenti. Una simulazione della reale cinematica delle particelle, delle loro mutue interazioni e della dinamica dell’urto con le parti colpite è impensabile: probabilmente è affrontabile da un punto di vista computazionale, ma è inutilmente accurata: per esempio, che utilità avrebbe il simulare il moto di due particelle che si urtano in volo, deviano dal loro percorso e non colpiscono il veicolo? Non solo, il numero di particelle sollevate durante una prova su pista è dell’ordine di grandezza di alcune centinaia di migliaia: la simulazione “puntuale” di un sistema di questo tipo rappresenta uno sforzo computazionale enorme e inutile, un vero spreco di risorse.

Si è allora affrontato il problema con metodi probabilistici: è stata definita una “particella” casuale, dotata di massa, posizione di partenza e velocità iniziale distribuite secondo opportune distribuzioni di probabilità. La particella, lanciata verso il veicolo, lo colpisce in un punto determinato (o non lo colpisce affatto) e con una certa angolazione rispetto alla normale locale del punto di impatto. L’angolo formato tra direzione di impatto e normale locale è una possibile misura della

quantità di energia cinetica che una particella è in grado di trasmettere alla parte colpita: in misura maggiore se l’urto è “frontale”, via via decrescente fino ad urti completamente “tangenziali”.

La generazione di decine o anche centinaia di migliaia di tali particelle casuali è estremamente veloce, l’unico peso computazionale è individuare dove una ben determinata particella colpisce il veicolo: per scoprire tale punto è stata utilizzata la tecnica del FEM ma solo nei suoi aspetti puramente geometrici: le parti in vista sono state modellate mediante elementi triangolari, che geometricamente individuano un piano nello spazio. Conoscendo poi la direzione di uscita della particella, è semplice determinare quale elemento di piano andrà a colpire e con quale angolo.

Generando centinaia di migliaia di particelle e risolvendo centinaia di migliaia di volte un problema geometricamente molto semplice si è stati in grado di mappare con notevole accuratezza le zone interessate dal fenomeno (Figura 3). Al termine del lavoro, agli sviluppatori apparve evidente l’analogia con il problema dell’ago di Buffon: ripetere un numero molto grande di volte delle operazioni estremamente semplici e veloci. Non solo, il metodo si è rivelato utile anche in direzioni inaspettate, permettendo per esempio di determinare le zone del frontale di un veicolo maggiormente interessate dal lancio di particelle sollevate dal veicolo che lo precede.

Un’altra applicazione recente di metodi stocastici, condotta in collaborazione tra Altair Engineering, AMET ed il Gruppo FIAT Auto, ha valutato l’influenza della catena di tolleranze sulle effettive dimensioni finali di un componente meccanico assemblato; mentre già esistono codici in grado di valutare la catena delle tolleranze di componenti massicci, gli stessi codici utilizzati su assemblati flessibili per stimare i valori dimensionali medi e i loro scostamenti forniscono risultati meno buoni: in tali casi il ridotto valore predittivo ne limita fortemente l’uso verso strutture come per esempio una scocca autoveicolistica.

Le tecnica di simulazione elaborata è stata una combinazione di metodi tradizionali inseriti in uno schema di calcolo originale: il nucleo centrale del calcolo è costituito dalla

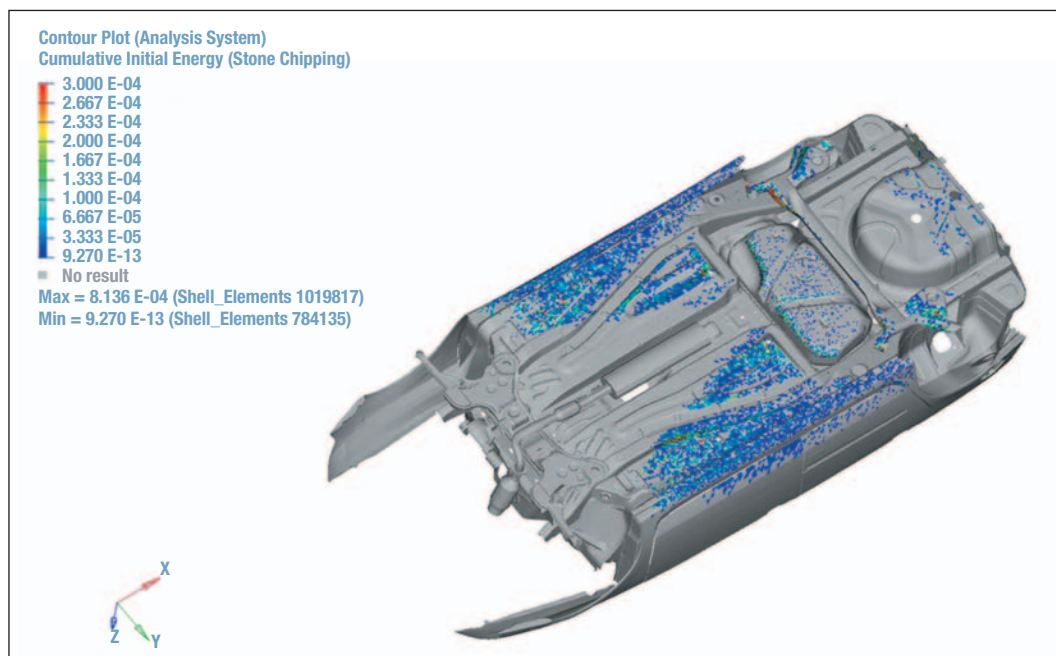


FIGURA 3

Cumulata dell'energia trasformata dalle parti colpite (scale arbitrarie). La mappa in colore rappresenta quanta energia cinetica è stata ceduta dalle particelle che impattano la parte colpita: le zone più severamente interessate appaiono colorate in rosso sulla parte posteriore del veicolo

simulazione del processo di lastratura, dalla calzatura dei componenti sugli attrezzaggi alla saldatura a punti sino allo scarico dei pezzi con il conseguente loro ritorno elastico. Se tale processo fosse simulato su componenti “nominali”, si dovrebbe ottenere una geometria finale del componente assemblato pari appunto al nominale. Ma i “reali” componenti di partenza hanno geometrie distribuite intorno alla configurazione nominale all’interno di tolleranze specificate: il primo problema, di natura specificatamente matematica, è come generare “mesh” casuali, che comunque rispettino le tolleranze assegnate, a partire da una discretizzazione nominale. Un secondo problema, rivolto principalmente verso la gestione dei sistemi di calcolo, consiste nell’automatizzare il processo di montaggio virtuale degli svariati componenti generati casualmente per simulare un numero adeguato di processi di lastratura su componenti non più nominali, e di raccogliere in forma compatta i risultati di ogni singola simulazione. Un terzo aspetto è invece focalizzato sull’analisi e interpretazione dei risultati, in definitiva una risposta alla domanda “l’assemblato finale è ancora di-

mensionalmente e geometricamente accettabile? Quanti scarti ci si può attendere pur partendo da singoli componenti tutti in tolleranza”? Ma soprattutto “quali sono i componenti critici che guidano e determinano la geometria finale”?

Si concentrerà l’attenzione solo sul primo dei problemi esposti, la generazione di una mesh casuale. Per poter generare una mesh “casuale” occorre necessariamente disporre di informazioni su un campione sufficientemente numeroso prelevato da una popolazione di componenti prodotti secondo un determinato processo tecnologico. La campagna di misurazioni sperimentali ha fornito, per ogni singolo componente misurato, una serie di coordinate di punti significativi: diciamo che abbiamo, come base di dati di partenza, una serie di coordinate di punti nodali “a CAD”, in posizione nominale e, per ognuno di essi, le coordinate “reali” misurate su un campione piuttosto numeroso di pezzi prelevati da un lotto di produzione. Per ogni punto, una terna di coordinate e un centinaio di “variazioni”, e questo per ogni punto prescelto, generalmente una qualche decina.

È chiaro che una semplice perturbazione delle

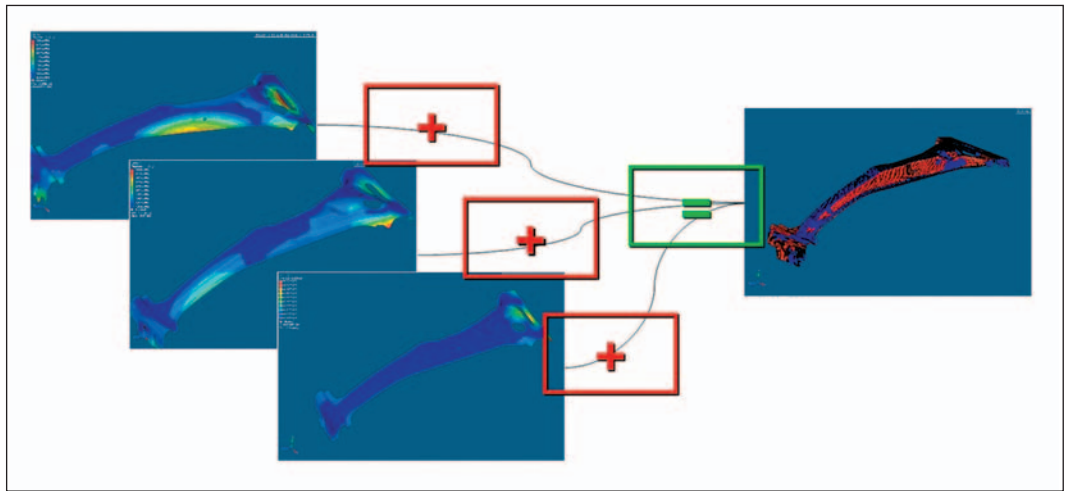


FIGURA 4

Le "funzioni caratteristiche" e il loro funzionamento: una geometria "reale" è ottenuta sommando diverse "funzioni caratteristiche" ma attribuendo diversi "pesi" ad ognuna di esse

coordinate nodali sarebbe errata; si avrebbe un effetto troppo localizzato, dando alla superficie un aspetto "spinoso" e irrealistico: non si terrebbe conto del fatto che lo scostamento dalla posizione nominale di un nodo è correlato allo scostamento dei nodi che lo circondano. D'altra parte ogni geometria "perturbata" potrebbe essere pensata come la combinazione lineare di una serie di funzioni ortogonali, ognuna di esse amplificata da un coefficiente numerico, e, visto che si ha a disposizione la *mesh*, una scelta comoda per questo insieme di funzioni ortogonali è data dagli autovettori della matrice di rigidità del componente, che così formano una base ortonormale di autofunzioni (Figura 4).

Questa scelta offre una serie di vantaggi: data una geometria "reale" i coefficienti numerici delle autofunzioni ortogonali sono facilmente calcolabili e, esaminando i singoli coefficienti relativi a una data funzione, a un dato autovettore, si può valutare di essi la relativa distribuzione statistica.

La generazione di geometrie casuali è allora a questo punto facile: un componente *random* è ottenuto come combinazione lineare delle autofunzioni modulate da coefficienti generati casualmente e appartenenti ognuno di essi alla relativa distribuzione di probabilità. I coefficienti, in un certo senso, costituiscono una "firma" tecnologica caratteristica, descrittiva del processo di realizzazione del componente (Figura 5).

È chiaro che per avere risultati significativi occorre generare decine di componenti casuali, effettuare una scelta dei componenti da assemblare simulando il processo di lastratura e poi, una volta ottenuti gli assemblati, valutare le variazioni di coordinate dei punti misurati nei pezzi assemblati e determinare a sua volta la loro distribuzione.

È una mole di lavoro computazionale non indifferente ma, e questo è cruciale, automatizzabile ed eseguibile con pochi interventi diretti dell'analista. Ma occorrono risorse di calcolo tutt'altro che trascurabili se si vuole approfittare del vantaggio decisivo che ogni simulazione condotta su componenti casualizzati fa storia a sé e non influenza le altre simulazioni: una procedura di calcolo altamente parallelizzabile.

4. NUOVE MACCHINE PER NUOVE TECNICHE

Come si è detto, l'evoluzione dei metodi di simulazione numerica segue una strada parallela all'evoluzione delle tecniche di calcolo e al crescere delle risorse computazionali disponibili. Un *full crash* è ormai proposto come calcolo *overnight*: nel novembre del 2009 RADIOSS di Altair fu il primo software industriale a scendere sotto la soglia dei 5 minuti per svolgere un'analisi *full crash* completa su un modello di oltre un milione di elementi. Il 19 aprile di quest'anno è stata svolta in Altair,

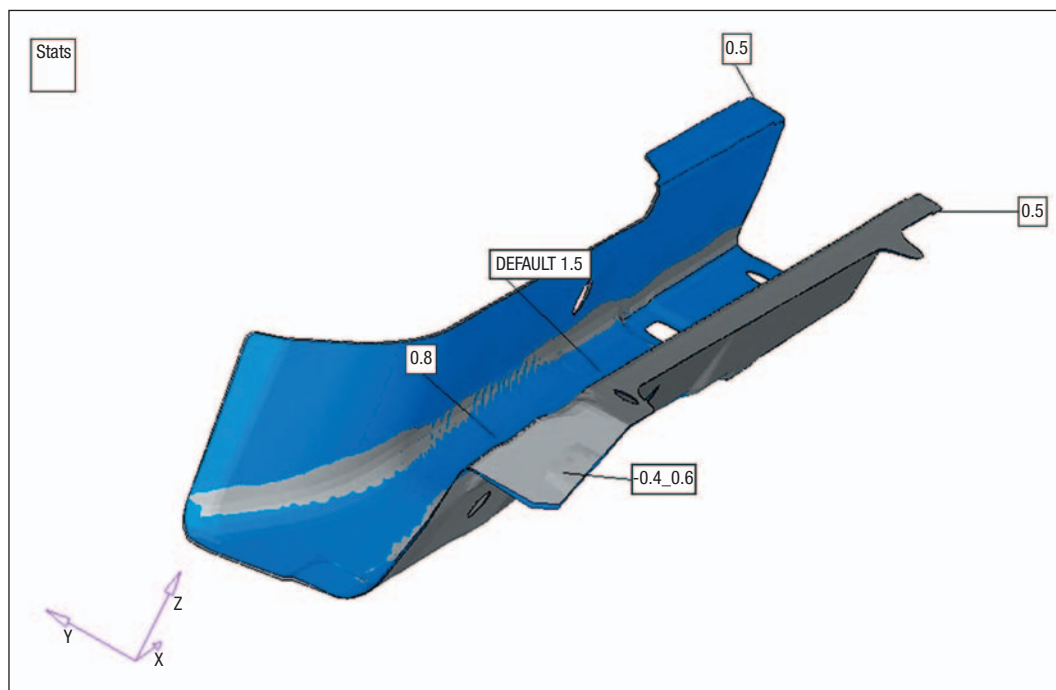


FIGURA 5

Geometria casuale: in blu come da CAD, in grigio perturbata. La geometria casuale (in grigio) è stata ottenuta combinando diverse funzioni caratteristiche, ognuna con un "peso" casuale. Il pezzo casuale ottenuto rispetta ancora tutte le tolleranze imposte dalle specifiche di progetto ma non è più descritto da una geometria "nominale" a CAD

a partire da CAD nativi forniti dalla Ford Motor Company, un'analisi completa in meno di 24 h: discretizzazione, generazione del modello e sua sottomissione al sistema di calcolo, gestione delle 64 CPU impiegate e delle risorse di memoria, analisi dei risultati: un ciclo svolto in modo automatizzato e con un ridotto intervento manuale.

Simili prestazioni rendono quindi percorribile l'approccio stocastico e l'analisi statistica delle prestazioni, anche se, va detto, l'esempio citato rappresenta un caso alla frontiera delle attuali metodologie di simulazione in ambito autovecolistico.

Su quali macchine e su quali architetture si può pensare che questi calcoli saranno fatti girare in futuro? Fino a pochi anni fa una misura comune (anche se fuorviante e poco rappresentativa) per valutare le prestazioni di un elaboratore era la frequenza della CPU, che dal 1993 al 1999 è aumentata di dieci volte per poi subire una stagnazione: dal 1999 ad oggi è a stento raddoppiata, mentre la barriera dei 4 GHz pare un ostacolo insormontabile, almeno finché si cerca di mantenere i dispositivi di dissipazione del calore entro dimensioni ra-

gionevoli. La sempre crescente potenza di calcolo si è quindi indirizzata verso soluzioni a più CPU operanti in parallelo, "cluster" di processori *multi-core* montati su singole schede madri, collegate tra loro mediante interfacce di rete ad alta velocità e governate da un "front end" che controlla e governa le risorse di calcolo.

I costi che comportano tali soluzioni non sempre sono affrontabili dai tradizionali attori che operano nel settore della meccanica computazionale e della simulazione: non tutte le società di ingegneria possono permettersi di sostenere i costi di gestione di infrastrutture complesse e anche i grossi centri di ricerca automobilistici devono comunque tenere in conto la rapida obsolescenza delle scelte tecniche effettuate.

Si è già profilata all'orizzonte una nuova soluzione: è di poche settimane fa una realizzazione sperimentale di una società di ingegneria di Torino che, utilizzando i servizi forniti da una grande società che opera nella rete, ha "costruito" una macchina virtuale remota che gestisce risorse hardware invisibili all'utilizzatore, distribuite e decentralizzate. È la

tecnologia del “*cloud computing*”, che dà la possibilità anche a piccole e medie aziende di poter affrontare simulazioni e calcoli un tempo riservati a strutture ben più grandi. Uno dei punti di forza di questa soluzione è che i costi sono limitati al tempo di effettivo utilizzato delle risorse remote, senza oneri di infrastrutture e costi di mancato utilizzo delle macchine.

5. UNA VISIONE MENO RISTRETTA?

Fare delle affermazioni sul futuro della simulazione in campo automobilistico (e in qualunque altro campo) è una cosa rischiosa: una tecnica molto usata è fare delle previsioni casuali sperando che cadano nel dimenticatoio in caso di insuccesso. Per poter fare delle previsioni sensate occorre genio e fortuna, quindi non ci azzardiamo a fare nulla del genere. Possiamo però proporre delle stime ragionevoli su un futuro prossimo in base a quello che stiamo vedendo oggi.


Uno dei due nodi cruciali, un polo attorno al quale ruotano le attività di simulazione, è la potenza di calcolo. Le soluzioni tradizionali stanno mostrando i loro limiti; è difficile attendersi aumenti prestazionali decisivi su una singola CPU, e questa tendenza emerge già a partire da metà degli anni '90. Fu allora che si iniziò a percorrere la strada che ancora oggi rappresenta la soluzione più diffusa per le realtà che hanno necessità di eseguire simulazioni numeriche impegnative in tempi brevi: il “*cluster*” di molte CPU veloci operanti su macchine che dialogano tra di loro per mezzo di reti dedicate, affrontando in parallelo compiti computazionali onerosi. Questa soluzione comporta però crescenti costi, che non si limitano all’hardware ma che si estendono a tutti i servizi che ruotano attorno al centro di calcolo, come le sale dedicate, condizionate e a prova d’incendio, i costi connessi al consumo energetico e anche, non ultimi, i costi legati all’uso delle licenze software.

Il secondo nodo cruciale è invece costituito dalle persone che fanno le simulazioni, i tecnici e gli ingegneri che si occupano dei calcoli. La spinta verso simulazioni sempre più complesse, che spaziano su diversi set-

tori dell’ingegneria - dalla termocinetica delle trasformazioni metallurgiche alla teoria della plasticità all’analisi statistica alla meccanica dei corpi continui - sta formando nuove figure di ingegneri, più spiccatamente rivolti verso la matematica applicata, la fisica, il calcolo numerico, gli aspetti computazionali e di gestione dei sistemi di calcolo, la programmazione e la padronanza dei sistemi operativi. Queste figure, attualmente, non si formano nelle Università quanto piuttosto “sul campo”, con la fortuna di poter operare in ambienti stimolanti che credono nella ricerca e nell’innovazione, ambienti dove possono far crescere le loro capacità e la loro esperienza.

Resta inteso che una solida preparazione di base è indispensabile, ma il profilo professionale dell’ingegnere calcolista si costruisce, a volte anche per vie impreviste e laterali, affrontando problemi nuovi con metodi e soluzioni nuove. Esistono in Europa, nel campo automotive, simili ambienti “fortunati”? A parere di chi scrive, al di là del fatto che esistano o meno, essi “devono” poter esistere, se si vuole che il mondo della progettazione automobilistica continui ad essere un’area di eccellenza nella progettazione meccanica. La pressione dei Paesi tecnologicamente emergenti può essere contrastata solo puntando sull’innovazione e sulla ricerca di soluzioni originali e creative; non è possibile reggere la concorrenza di Paesi con ottime risorse ingegneristiche che hanno costi incomparabilmente inferiori di quelli di un progettista europeo se non investendo sulla formazione di tecnici di punta.

Le figure professionali come quelle che sono state tratteggiate sono rare e non tutte le realtà industriali possono o vogliono affrontare gli investimenti necessari per poterle formare completamente: non è infrequente trovare ingegneri calcolisti di eccellenza che hanno seguito, nel loro percorso professionale, molte strade e che si sono confrontati con i più diversi ambiti industriali. Non è raro anche che decidano, ad un certo punto del loro percorso professionale, di diventare una sorta di “*free lance*” mettendo a disposizione la loro capacità e la loro esperienza alle realtà industriali che, di volta in volta, le richiedono. Si riproduce, in un certo senso, il percorso delle ri-



sorse di calcolo: tecnici specializzati, non in senso settoriale e chiuso, ma intesi come estremamente competenti e che sappiano dominare un ampio spettro di competenze. Una figura professionale nuova, dunque, ma tutto sommato simile agli ingegneri progettisti

di alcuni anni fa, dei liberi professionisti, a volte consociati in piccole e medie - ma estremamente capaci - società di ingegneria, che sappiano mettere a frutto le loro esperienze e il loro talento costruito affrontando problemi di progettazione nuovi, complessi e affascinanti.

ROBERTO VADORI si è laureato nel 1989 in ingegneria meccanica nel Politecnico di Torino, dove ha conseguito il suo dottorato di ricerca nel 1995 discutendo una tesi sul danneggiamento dei materiali compositi sottoposti ad impatto, implementando il modello FEM all'interno del codice "public domain" DYNA3D. Entrato nel ruolo dei ricercatori universitari, ha svolto la sua attività di ricerca nel campo della meccanica computazionale prima nella Facoltà di Ingegneria del Politecnico di Torino e poi nell'Università di Modena e Reggio Emilia. Nel 2003 è entrato in Altair Engineering dove ha continuato ad occuparsi di modellazione numerica e di progettazione dell'autoveicolo. Dal 2010 è consulente indipendente di Altair, di AMET e di Prompt Engineering, continuando ad occuparsi di progettazione numerica e di simulazione. È autore di oltre 60 pubblicazioni scientifiche su riviste nazionali ed internazionali. È docente della scuola estiva di dottorato di ricerca del gruppo dei costruttori di macchine italiani.
E-mail: roberto.vadori@gmail.com