

IN AUSILIO A PROBLEMI D'ORDINARIA COMPLESSITÀ

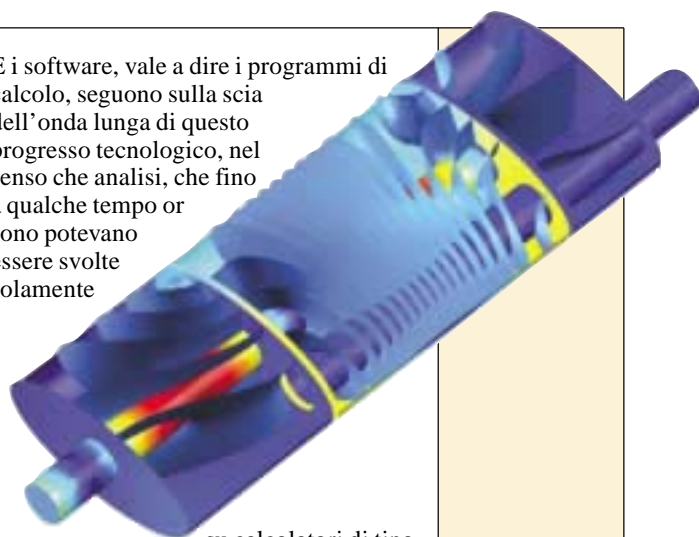
L'elevata capacità di calcolo degli odierni calcolatori e adeguati software d'analisi FEM integrati con il CAD 3D consentono di simulare contemporaneamente più fenomeni fisici con le relative interazioni. Mediante una più aderente ricostruzione della realtà si aprono per i progettisti nuovi scenari. È iniziata l'era delle simulazioni multidisciplinari

di **Silvestro Blatto**

Processori funzionanti a velocità (MHz) costantemente crescenti, sistemi operativi a 32 e 64 bit, calcolatori dalla potenza impressionante e impensabile solo qualche anno or sono, in grado di macinare miliardi d'operazioni matematiche in brevissimo tempo (e le prospettive sono ancor più entusiasmanti): questo il quadro dell'hardware sulle scrivanie dei progettisti e di chi si occupa di simulazioni virtuali.

Il tutto rientra nelle ipotesi previste a metà degli anni sessanta da Gordon Moore, uno dei fondatori della Intel: quella che fu poi definita *legge di Moore* prevedeva, infatti, che la potenza di calcolo dei microprocessori sarebbe raddoppiata, rispetto al periodo precedente, ogni 18 o 24 mesi.

E i software, vale a dire i programmi di calcolo, seguono sulla scia dell'onda lunga di questo progresso tecnologico, nel senso che analisi, che fino a qualche tempo or sono potevano essere svolte solamente

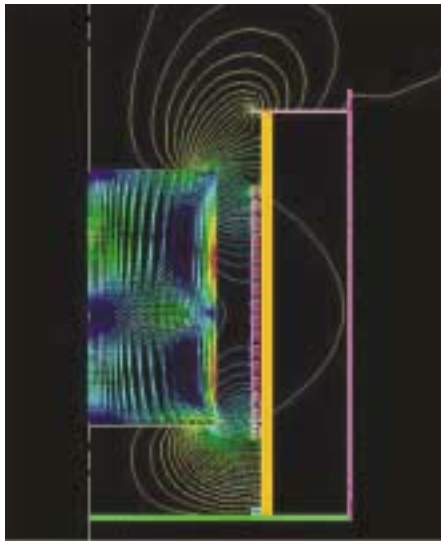


su calcolatori di tipo workstation o mainframe, ora sono, con le dovute cautele del caso, realizzabili anche su macchina alla portata d'ogni azienda. Già, perché, come ormai è ben noto, i benefici derivanti dall'utilizzo dei metodi di simulazione (CAE) fin dalla fase di progettazione, consentono di ottenere tempi di sviluppo più brevi, minori costi di sperimentazione e, soprattutto, risultati ottimali.

NON SOLO LINEARE

Il metodo degli Elementi Finiti (FEM), base della maggior parte dei metodi di calcolo in ambito ingegneristico – ma non solo –, sta continuamente espandendosi e conquistando nuovi utilizzatori, grazie anche alla sua integrazione e interoperabilità con i programmi di CAD tridimensionale. Inoltre, accanto ai tradizionali solutori operanti in campo *lineare*, sono attualmente disponibili numerosi software commerciali (praticamente quasi tutti) che permettono di affrontare analisi *non lineari*. Questa

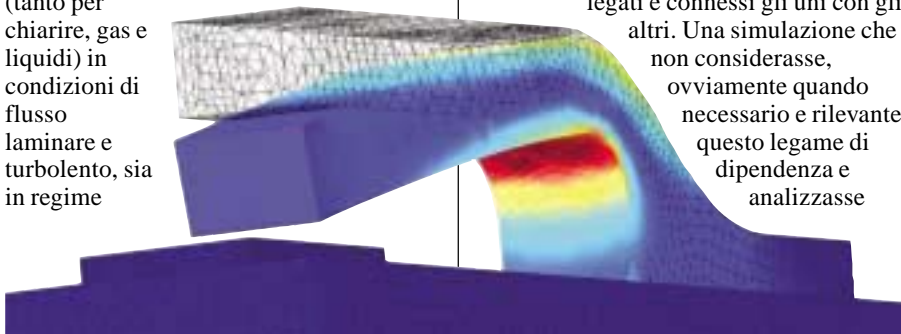
Forno A.C. a induzione. L'analisi elettromagnetica evidenzia le linee di flusso; il campo magnetico produce le forze di Lorenz che sono responsabili del rimescolamento del metallo liquido, come è messo in evidenza dalla simulazione CFD. (Fonte: Ansys)



espressione è tipica di fenomeni che non seguono una legge lineare; ad esempio, nei calcoli strutturali si possono presentare problemi caratterizzati da: non linearità nelle caratteristiche dei materiali, come materiali elastici non lineari, elastoplastici, iperelastici (ad esempio le gomme) e a scorrimento viscoso; non linearità geometriche, nel caso di grandi spostamenti e/o grandi deformazioni; contatto tra corpi diversi e/o autocontatto (il corpo tocca su se stesso); meccanica della frattura duttile; problemi termici definiti da conducibilità (o altre caratteristiche dei materiali costituenti l'oggetto in esame) funzione della temperatura, convezione libera, irraggiamento, cambiamenti di fase; scorrimento viscoso; ed altro ancora.

Altri tipi di studi intrinsecamente non lineari sono quelli riguardanti le analisi fluidodinamiche; per inciso ricordiamo che questi software sono basati sulle equazioni di Navier-Stokes per il moto di un fluido viscoso.

I programmi di fluidodinamica computazionale (noti come CFD: Computational Fluid Dynamics) sono in grado di analizzare il comportamento di fluidi comprimibili e incompressibili (tanto per chiarire, gas e liquidi) in condizioni di flusso laminare e turbolento, sia in regime



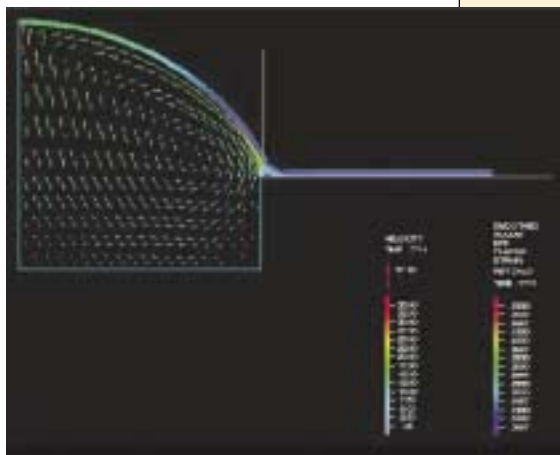
Analisi MEMS di un interruttore. In questo caso il modello accoppia un calcolo meccanico con un campo elettrico quasi statico. Quest'ultimo genera una forza che flette la mensola. (Fonte: Femlab)

stazionario che transitorio.

La relativa semplicità d'utilizzo di questi sistemi di calcolo (a patto che si sappia tout court di che si tratta e come valutare la bontà dei risultati ottenuti) permette la simulazione anche di scenari molto complessi.

LE ANALISI MULTIDISCIPLINARI

A tutt'oggi la maggior parte dei programmi ad Elementi Finiti è in grado di esaminare problemi relativi a singole e ben identificate discipline. In altre parole, per esempio, se interessano le sollecitazioni e le deformazioni in un qualsiasi prodotto per effetto di carichi meccanici, oppure se importano le

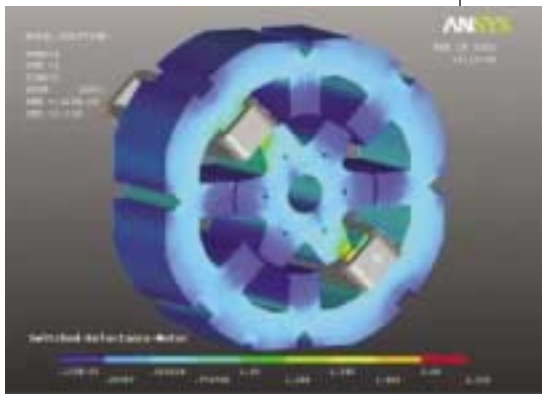


distribuzioni di temperatura in un oggetto, ovvero ancora se hanno significato gli andamenti delle pressioni e delle velocità all'interno di un qualsivoglia componente, si utilizzeranno, rispettivamente, programmi in grado di realizzare analisi strutturali o termiche o fluidodinamiche. Non ci vuole però molto spirito d'osservazione per accorgersi di quanto la realtà degli oggetti e delle cose che dobbiamo studiare, capire, migliorare e ottimizzare si discosti dall'immagine semplificata di un processo lineare, univoco ed efficiente, tipica di un diverso approccio.

Nel mondo reale, sempre, i fenomeni fisici sono interdipendenti, vale a dire legati e connessi gli uni con gli altri. Una simulazione che non considerasse, ovviamente quando necessario e rilevante, questo legame di dipendenza e analizzasse

Idroformatura. L'analisi FSI, fluidodinamica e strutturale, permette di seguire l'evolversi del fenomeno fornendo contemporaneamente i parametri fluidodinamici e di sollecitazione-deformazione elastoplastica del materiale. (Fonte: Adina)

Esempio di macchina rotante. (Fonte: CAD-FEM GmbH con Ansys)



percio i fenomeni presi singolarmente, potrebbe portare, nel migliore dei casi, a risultati non corretti.

Il grande passo in avanti è stato fatto con l'introduzione di software in grado di simulare l'interazione tra diversi domini fisici in un'unica fase di calcolo e in un unico ambiente, parallelamente all'evoluzione di calcolatori sempre più potenti e disponibili ad un prezzo contenuto.

La svolta è importante, perché segna il *passaggio dal mondo del pressappoco all'universo della precisione*, come afferma lo storico francese Alexandre Koyré, dal particolare a quello del generale.

Questa tecnologia è destinata a segnare un passo importante nella simulazione *computer aided* dei problemi ingegneristici, perché permette una descrizione più aderente alla realtà fisica ed è uno slancio in avanti del processo

sull'alettone posteriore (spoiler) di un'autovettura in movimento a velocità elevata (lo stesso discorso potrebbe anche valere per quello che succede sulla pala di una turbina o di un compressore).

Per simulare il fenomeno, l'analista di turno potrebbe ricorrere ad un programma di fluidodinamica che fornirebbe come risultato anche la distribuzione di pressione incognita. Quest'ultima, però,

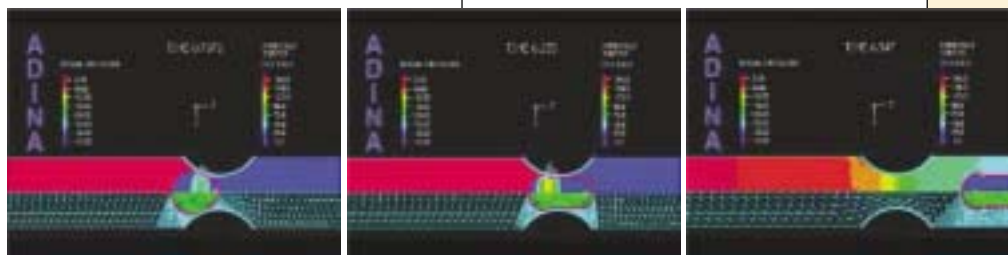
vista come carico meccanico, darebbe senza dubbio origine, utilizzando un programma di calcolo strutturale, ad uno stato di sollecitazione e deformazione sul pezzo in oggetto.

Dove sta allora il problema?

Se la deformata strutturale derivante dalla pressione esercitata dall'aria in movimento è significativa, vuol dire che il calcolo CFD realizzato sulla struttura indeformata non è più valido e quindi quest'ultima analisi deve essere ripetuta, tenendo conto della deformata dello spoiler, per ottenere nuovi valori fluidodinamici.

Questo ciclo iterativo deve essere ripetuto numerose volte fino ad ottenere un certo equilibrio tra i due fenomeni fisici, assicurando così una buona approssimazione dei risultati.

In realtà, disponendo di software distinti per i due tipi d'analisi succitate (fluidodinamica e strutturale), le cose non



d'innovazione tecnologica.

In pratica, con un unico programma, sempre nell'ottica del paradigma FEM, si può simulare un'ampia gamma di fenomeni fisici in ambiti in cui essi interagiscono, determinando il funzionamento di uno specifico meccanismo o di un sistema.

Si parla così d'analisi *multidisciplinari* o *accoppiate* o di *multiphysics*.

Questo concetto non è nuovo, ma è da rilevare il fatto che gli attuali sistemi contribuiscono parecchio a semplificarne l'implementazione e l'utilizzo.

GIUSTO PER CAPIRE

Immaginiamo di voler calcolare la distribuzione di pressione che agisce

sono così semplici e lineari come potrebbero apparire: modelli geometrici diversi, ciascuno con una sua discretizzazione di elementi, trasferimento di risultati da un programma all'altro (i risultati di uno, sono i dati d'input dell'altro), formati di dati diversi, ecc.

Il tutto, poi, in maniera scarsamente automatizzabile.

È chiaro, allora, che per risolvere questo problema che comporta una notevole perdita di tempo e è fonte di potenziali errori (e siamo solo nell'ambito di due discipline fisiche, ma queste potrebbero essere in numero maggiore), sono stati sviluppati software in grado di realizzare analisi *multidisciplinari*.

Analisi FSI d'interazione fluido-struttura. Nelle tre figure si può notare come l'oggetto interno al tubo si deformi al passaggio attraverso la strettoia; in evidenza la mesh autoadattativa che si rigenera, le forze di contatto ed i parametri fluidodinamici. (Fonte: Adina)

Con uno di questi software, l'analisi di cui sopra, a prescindere dalla sua complessità intrinseca, sarebbe stata riportata sul terreno di una maggiore semplicità operativa da parte dell'utente: tramite un'unica interfaccia, un unico modello geometrico e senza nessun trasferimento di dati, l'utilizzatore analista avrebbe potuto attivare l'analisi accoppiata la quale, per ogni istante di calcolo, avrebbe fornito contemporaneamente sia i risultati fluidodinamici che quelli strutturali.

DENTRO AL PROGRAMMA

In questo paragrafo saranno fatte alcune brevi considerazioni riguardo ai metodi di soluzione delle analisi multidisciplinari, che servono per capire gli sviluppi che hanno coinvolto questa tecnologia. Qualora si utilizzino programmi basati sul FEM, ci sono due procedimenti per risolvere la questione: il primo, definito *sequenziale*, agisce, come dice il nome stesso, risolvendo in maniera sequenziale il problema.

In altre parole, vengono ricavate tutte le incognite (più correttamente bisognerebbe dire che sono risolti tutti i gradi di libertà incogniti) relativamente al primo dominio fisico e quindi sono passati i risultati, in termini di carichi e condizioni al contorno, alla seconda analisi fisica. È il software che fa la spola tra i diversi domini fisici controllando la convergenza della soluzione.

Questa impostazione, che agisce fondamentalmente sul vettore dei carichi, è definita anche *load-vector coupling*.

Il secondo metodo, invece, è chiamato *diretto* e agisce, come intuibile, direttamente sul cuore dell'algoritmo risolutivo, cioè sulla matrice dei coefficienti.

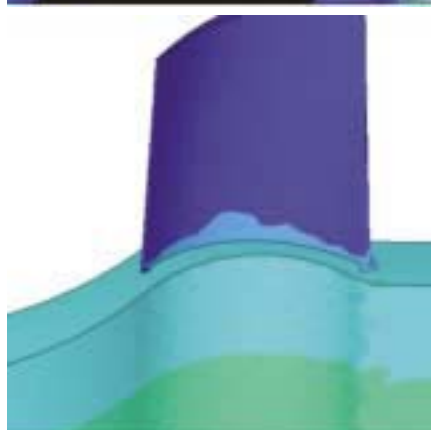
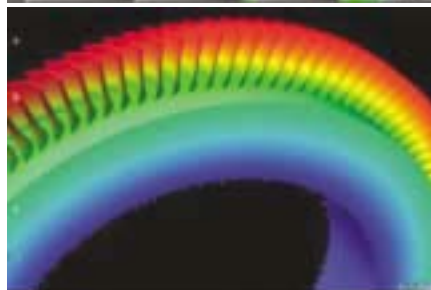
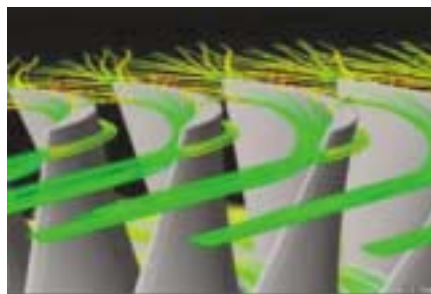
Per i più curiosi dirò che i termini sulla diagonale principale sono quelli in assenza d'interazione, mentre quelli fuori diagonale rappresentano gli effetti d'accoppiamento.

È chiaro che, in questo modo, tutti i gradi di libertà incogniti per ciascun dominio fisico d'interazione (strutturale, fluidodinamico, termico, ecc.) sono dentro una singola matrice dei coefficienti. La soluzione di questa matrice porta al risultato cercato.

Questo metodo viene anche definito, come evidente, *matrix coupling*.

Un terzo approccio completamente diverso è stato sviluppato da una società svedese produttrice di software.

Il loro prodotto consente la manipolazione e la risoluzione di sistemi di equazioni differenziali alle derivate parziali (PDEs: partial differential equations). In questo caso si può risolvere, in modo diretto, problemi con un qualsiasi numero di



La prima figura fornisce i risultati fluidodinamici su una palettatura di turbina, la seconda evidenzia la distribuzione di temperatura mentre la terza fornisce gli andamenti delle sollecitazioni. (Fonte: Ansys)

fenomeni fisici accoppiati.

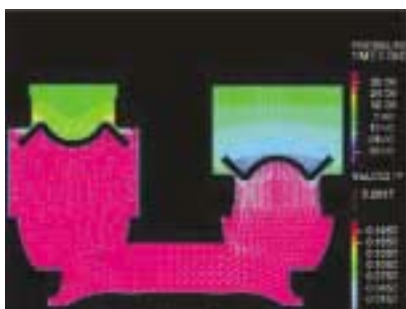
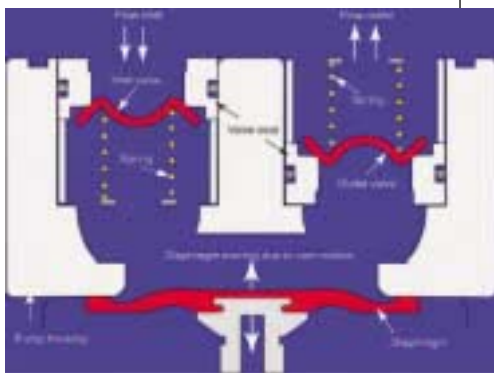
È innovativo, accattivante e si presenta bene; vale la pena di tenerlo in evidenza e di seguirne gli sviluppi.

GLI SCENARI

Trovata la strada teorica e con un'opportuna dose di programmazione, per i tecnici e i ricercatori si aprono scenari ad ampia visuale sul mondo della simulazione della realtà fisica, potendo studiare problemi d'interazione tra corpi notevolmente diversi sia per le loro caratteristiche meccaniche che fisiche. Vediamo d'indicare qualcuno anche se in maniera non esaustiva:

interazione tra fluido in moto e struttura deformabile soggetta alle azioni di detto flusso (FSI: Fluid Structure Interaction). Il problema è molto complesso, soprattutto se il flusso non è permanente, a causa delle azioni che i due ambienti (fluido e struttura) si scambiano mutuamente. Un ulteriore esempio, oltre a quelli citati precedentemente, potrebbe essere quello degli otturatori delle valvole d'intercettazione del fluido negli impianti o ancora tutti i problemi legati alle strutture aerospaziali, con l'aggiunta che

La prima figura illustra lo schema di una pompa alimentare carburante, mentre la seconda evidenzia i parametri fluidodinamici. (Fonte: Adina)



il fluido può muoversi anche a velocità supersonica e oltre;
 interazione tra analisi elettromagnetica e fluidodinamica: si possono simulare i rimescolamenti turbolenti dell'acciaio fuso in un forno ad induzione, con indicazione delle mappe di temperatura;
 processi di simulazione di fusione e/o solidificazione che possono coinvolgere analisi di fluidodinamica (in regime turbolento con superficie libera del fluido), termodinamica, cambio di fase, meccanica dei solidi ed elettromagnetismo;
 analisi dinamiche di strutture flessibili per prevedere il comportamento a sollecitazione e deformazione derivante dall'interazione tra diverse parti;
 simulazione delle saldature con i relativi effetti di deformazioni e sollecitazioni residue;
 analisi della temperatura, delle sollecitazioni indotte nei componenti e della compatibilità elettromagnetica associata ad un certo progetto di una parte elettronica;
 analisi in cui subentrano effetti elettromagnetici, termici e strutturali (MEMS: Micro Electro Mechanical Systems);
 applicazioni relative ai trasduttori, agli attuatori fluidodinamici ed alle macchine a funzionamento elettromagnetico (motori, ecc.);
 modelli di reazioni chimica;
 geofisica;
 applicazioni di acustica;
 applicazioni biotecnologiche.
 In definitiva, un unico buon software, o solutore di tipo multiphysics, permette l'analisi accoppiata di tutte le discipline

che occorrono e quindi può comprendere qualsiasi combinazione di effetti meccanici, termici, dinamici, elettromagnetici, fluidodinamici, acustici, ecc.

CONCLUSIONI

I benefici di un software adatto per analisi multidisciplinari sono innegabili: un solo ambiente per tutta una serie d'analisi in diversi ambiti della fisica, ma anche una completa parametricità dei modelli riguardo al tipo di fenomeno in esame, alla geometria, alle caratteristiche dei materiali, ai tipi di carichi e alle condizioni al contorno. Senza dimenticare, poi, che si stanno studiando prodotti di ottimizzazione legati proprio alle analisi accoppiate; ma questo è un altro discorso.

Una volta abbandonato il concetto empiristico di *tentativo ed errore*, in altre parole di progettare, costruire, provare e distruggere prototipi reali (*build and break*) e quindi riprogettare, costruire di nuovo, ecc., reiterando il ciclo, ma utilizzando la filosofia della progettazione virtuale con tutte le sue possibilità di analizzare cosa succede se (what-if), l'incremento d'efficienza è manifesto. In ogni caso, è indispensabile compiere una validazione sperimentale in modo da giustificare l'idoneità del modello teorico; già il grande Leonardo affermava che senza di essa *nulla dà di sé certezza*. È altrettanto evidente che per sfruttare appieno il potenziale di queste nuove tecnologie occorre dedicare, da parte delle aziende, un grande sforzo per informare, formare e qualificare il personale; inoltre, il management deve mirare a risultati realistici e in tempi non rigidamente stretti e vincolanti.

In definitiva, siamo di fronte ad una non comune visione unificante tra esigenze di mercato, potenziale d'elaborazione e sviluppo degli algoritmi di simulazione numerica; in tal modo, il futuro della sperimentazione virtuale non può che crescere in maniera stimolante e interessante.

Il destino di molte aziende dipenderà parecchio dalla loro capacità d'innovazione dei metodi di progettazione (anche se, in realtà, è con Francesco Bacone che si riconferma l'attribuzione di un valore universale ad alcune categorie tipiche del sapere scientifico: collaborazione, progressività, miglioramento e innovazione). È un nuovo modello di cultura; bisognerà tenerne conto e svilupparlo.

L'ingegner Silvestro Blatto, consulente CAX, è il general manager della Softidea S.a.s. di Milano.