

LA CORRELAZIONE NUMERICO-SPERIMENTALE PERCHÉ SPERIMENTARE

LA VERIFICA E VALIDAZIONE DEI MODELLI ANALITICI, ATTRAVERSO LE TECNICHE DI CORRELAZIONE FEM-SPERIMENTALE, CONSENTE DI APPURARE CHE: LE IPOTESI, LE APPROSSIMAZIONI (TALVOLTA INEVITABILI), LA MODELLAZIONE ED I RISULTATI CONSEGUITI DAL CALCOLO, SIANO COERENTI E VEROSIMILMENTE SIANO CORRELATI, APPUNTO, AL FENOMENO REALE



Il test di conformità ROPS (Roll-Over Protective Structure), eseguito sulle strutture di protezione passiva installate sulle moderne trattrici agricole, prevede l'applicazione di carichi (quasi) statici esercitati mediante cilindro idraulico (V max di avanzamento 5mm/s) e applicati alla struttura in punti convenzionalmente definiti dalla norma

Correlazione: un matrimonio virtuoso tra Simulazione e Test funzionali

La simulazione dei fenomeni fisici sottoposti a stress, attraverso gli Elementi Finiti, è una tecnica potente, oramai ampiamente diffusa tra i progettisti, a supporto della moderna attività ingegneristica. È noto come il calcolo FEM sia un modo sicuro per minimizzare, se non evitare, potenziali e costosi errori di progettazione. Tutto questo avviene attraverso lo sviluppo di modelli digitali "virtuali" che possono essere verificati, economicamente, su una vasta gamma di scenari possibili. È altrettanto noto che i risultati ottenuti con il calcolo FEM sono fortemente dipendenti dall'esperienza e dal giudizio dei tecnici coinvolti nell'analisi del problema e nella definizione del modello di simulazione.

La crescente dipendenza dei progetti dai risultati delle simulazioni numeriche, sempre più raffinate e di dettaglio, suggerisce la necessità/opportunità di convalidare tali risultati con test fisici sul componente o sul sistema in oggetto, riproducendo le condizioni operative dello stesso, precedentemente studiate con l'approccio numerico. La verifica e validazione dei modelli analitici, attraverso le tecniche di Correlazione FEM-Sperimentale, consente di appurare che:

le ipotesi, le approssimazioni (talvolta inevitabili), la modellazione ed i risultati conseguiti dal calcolo, siano coerenti e verosimilmente siano correlati, appunto, al fenomeno reale. Spesso alcuni parametri di input della simulazione sono incerti per cui vengono assunti a priori dall'analista: un esempio fra tutti le caratteristiche del materiale con la necessità di scegliere tra un minimo e un massimo di alcune grandezze fisiche dichiarate dal fornitore (carico di snervamento, di rottura, modulo elastico, ecc.). Questo spiega le inevitabili differenze tra il comportamento del sistema ottenuto dalla simulazione e i risultati prodotti dalla struttura reale che si manifestano in laboratorio o in esercizio nella configurazione definitiva. Occorre tuttavia ribadire che la simulazione, per definizione, introduce approssimazioni che si ripercuotono sulla rappresentatività del modello numerico rispetto la realtà. Questo gap può essere ridotto, e quasi annullato,

attraverso opportuni accorgimenti introdotti durante le fasi preparatorie del modello stesso: accuratezza nel definire le condizioni a contorno, le relative condizioni di carico/funzionamento simulato e altro ancora. Una maggior accuratezza nel definire il Modello consente di conseguire risultati con un grado di precisione un po' più elevato, anche se sempre fortemente dipendente dall'esperienza e sensibilità dell'analista. ... Un altro contributo che la sperimentazione può offrire riguarda la qualità ed il dettaglio dei modelli numerici virtuali. Si pensi, ad esempio, alla possibilità di "tarare" e "raffinare" i modelli numerici utilizzando le informazioni fornite dai test. In questo modo si ha l'opportunità di comprendere meglio i fenomeni fisici, mettere a punto e/o migliorare le metodologie di calcolo adottate per giungere più rapidamente alla convergenza ottimale. In pratica, il Valore indiscutibile che la correlazione aggiunge all'analisi numerica è quello di poter individuare, e valutare in maniera oggettiva, le analogie e le differenze tra ciò che è stato "simulato" e quanto "misurato" fisicamente quindi calibrare la simulazione per completare la campagna di indagine simulata con una maggior precisione.

Nel processo di Sviluppo-Prodotto, questi risultati sono preziosi in quanto:

- riducono il numero di iterazioni necessarie all'ottimizzazione e di conseguenza i tempi di sviluppo;
- aumentano la qualità del progetto;
- riducono il numero di prototipi necessari alla delibera del progetto/prodotto;
- aumenta la sensibilità del team di sviluppo sul comportamento del modello numerico, sul prodotto "fisico" e la risposta ai carichi simulati e reali.

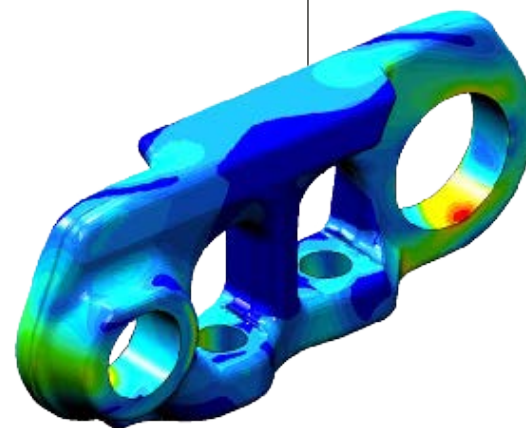
Lo sviluppo tecnologico dei software di simulazione, la diffusione dei metodi e le crescenti capacità di calcolo dei computer, che contribuiscono a creare modelli di simulazione sempre più affidabili e di dettaglio, non riducono di significato ed efficacia la sperimentazione. Anzi! In realtà costituisce un prerequisito fondamentale per poter sfruttare l'enorme potenziale e l'efficacia dell'analisi numerica.

Applicazioni pratiche nell'industria

Da un punto di vista ingegneristico, un sedile aeronautico rappresenta l'interfaccia strutturale tra passeggero e aeromobile e, di conseguenza, uno dei componenti meccanici più influenti sulla sicurezza dei passeggeri.

La normativa in vigore impone di focalizzare l'attenzione principalmente su due aspetti: il carico biomeccanico degli occupanti e integrità della struttura del sedile durante l'impatto. Talvolta, la sola fase di CBA

Il calcolo FEM è un modo sicuro per minimizzare, se non evitare, potenziali e costosi errori di progettazione. Tutto questo avviene attraverso lo sviluppo di modelli digitali "virtuali" che possono essere verificati, economicamente, su una vasta gamma di scenari possibili

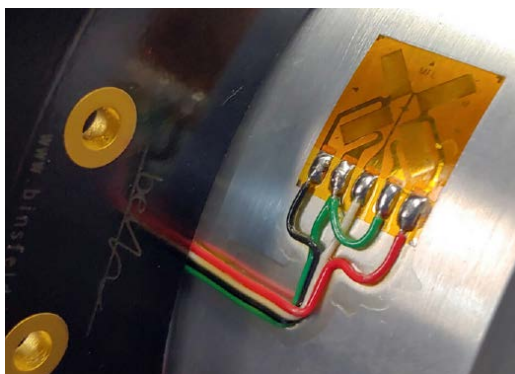


(Certification By Analysis) risulta non esaustiva per la delibera del prodotto. Infatti, il numero e la complessità dei parametri in campo imporrebbe una campagna di prove sperimentali lunga e onerosa in termini di tempo e costi. Circostanze e necessità, quindi, inducono a ridurre il numero di test sperimentali al fine di ridurre investimenti e durata. Purtroppo questo metodo di indagine tende all'obiettivo confidando soprattutto sull'esperienza dei progettisti ma non consente un'accurata analisi dello scenario di come le variazioni dei parametri, esaminati singolarmente o accoppiati, influenzino il risultato finale.

L'applicabilità di un approccio numerico ibrido CAE-Sperimentale come metodo di sviluppo nella fase di progettazione ha come obiettivo ridurre il numero delle prove sperimentali propedeutiche ad ottimizzare il prodotto raffinando quindi la versione finale per i test di omologazione. Il vero vantaggio dell'approccio ibrido è costituito dal notevole risparmio di tempo necessario alla messa a punto di un modello di calcolo corrispondente alla realtà rispetto al full FEM, conservando, contemporaneamente, la peculiarità di entrambi i metodi. Un'applicazione, in apparenza, meno sofisticata riguarda lo studio del comportamento di un Roll Bar applicato ad una macchina agricola per la sicurezza dell'operatore in caso di ribaltamento. Anche in questo caso, così come per il precedente, obiettivo della simulazione numerica accoppiata alla campagna di testing è di ridurre sia il numero di prove che dei componenti fisici sacrificati.

Il test di conformità ROPS (Roll-Over Protective Structure), eseguito sulle strutture di protezione passiva installate sulle moderne trattrici agricole, prevede l'applicazione di carichi (quasi) statici esercitati mediante cilindro idraulico (V max di avanzamento 5mm/s) e applicati alla struttura in punti convenzionalmente definiti dalla norma. Per inciso, il carico applicato può variare perché direttamente dipendente dal peso della macchina agricola in esame. In questo contesto industriale sono molte le variabili, aleatorie, introdotte dal modo di produrre e che, poten-

Un sedile aeronautico rappresenta l'interfaccia strutturale tra passeggero e aeromobile e, di conseguenza, uno dei componenti meccanici più influenti sulla sicurezza dei passeggeri. La normativa in vigore impone di focalizzare l'attenzione principalmente su due aspetti: il carico biomeccanico degli occupanti e integrità della struttura del sedile durante l'impatto



I più diffusi estensimetri (o Strain Gauge) utilizzati dagli addetti ai lavori sono gli "Elettrici a Resistenza" il cui funzionamento si basa sulla misura della variazione di resistenza elettrica di un filamento di Costantana sottoposto a deformazione: a trazione o a compressione

Il Valore indiscutibile che la correlazione aggiunge all'analisi numerica è quello di poter individuare, e valutare in maniera oggettiva, le analogie e le differenze tra ciò che è stato "simulato" e quanto "misurato" fisicamente, quindi calibrare la simulazione per completare la campagna di indagine simulata con una maggior precisione



IL PROCESSO

La correlazione tra il comportamento simulato e quello misurato in realtà avviene, in prima istanza, confrontando i dati elaborati dal CAE con quelli raccolti nella campagna sperimentale. Il processo che governa la campagna di validazione del progetto inizia con la messa a punto del modello numerico. Nel caso di un'analisi strutturale FEM, la topologia del CAD viene preparata per la simulazione (CAE) scegliendo opportunamente le tipologie di elementi finiti che la devono rappresentare e le zone critiche sulle quali concentrare le attività di dettaglio. Successivamente si procede nel definire Carichi e Condizioni a Contorno (temperature e gradienti, forze meccaniche statiche, le eventuali dinamiche, ecc.), i vincoli, gli accoppiamenti e quant'altro possa rappresentare il più fedelmente possibile le condizioni di impiego da simulare. Per ultimo, ma non meno importante, il materiale e la sua caratterizzazione. Il modello numerico, completo delle condizioni di carico, viene elaborato dal codice-solutore e i risultati resi visibili nel corso della fase di post-processing che ne evidenzia, attraverso mappe colorate, i valori di stress e la

localizzazione sulla struttura. Le informazioni di deformazione ed intensità del carico, restituite dal CAE, sono utilizzate dagli sperimentatori per l'applicazione degli estensimetri sul prototipo nei punti idonei all'acquisizione dei dati. Il prototipo, opportunamente strumentato e collegato al sistema di acquisizione, viene impiegato sia nelle condizioni standard che quelle limite. In alcuni casi anche oltre i limiti con l'intento di verificare sia l'effettiva vita utile che le caratteristiche di robustezza ovvero la capacità di andare oltre le normali condizioni di impiego.

Localizzazione sulla struttura. Le informazioni di deformazione ed intensità del carico, restituite dal CAE, sono utilizzate dagli sperimentatori per l'applicazione degli estensimetri sul prototipo nei punti idonei all'acquisizione dei dati. Il prototipo, opportunamente strumentato e collegato al sistema di acquisizione, viene impiegato sia nelle condizioni standard che quelle limite. In alcuni casi anche oltre i limiti con l'intento di verificare sia l'effettiva vita utile che le caratteristiche di robustezza ovvero la capacità di andare oltre le normali condizioni di impiego.

zialmente, rendono l'iter omologativo dispendioso in termini di tempo e in numero di prototipi necessari per superare il test. Basti pensare agli acciai impiegati, alle tecnologie produttive (es. la saldatura) e alla precisione dimensionale tipica della sub-fornitura... Ma non solo. Altri elementi che possono influire sul risultato finale riguardano: numero, dimensioni e spessore dei tubolari impiegati, delle piastre di ancoraggio al telaio (o direttamente agli elementi della trasmissione per macchine piccole), numero, tipologia e classi di viti/bulloni. Un approccio ibrido risulta statisticamente più vantaggioso in termini economici e di time-to-market rispetto al Full-FEM e al cosiddetto "trial & error" dove si producono più design e prototipi fisici di roll-bar, si provano in successione sino a identificare la versione che supera la prova.

L'impiego degli estensimetri applicati ad una struttura in test, sviluppato con l'ausilio del CAE, consente di rilevare le deformazioni subite dal componente, a partire da queste risalire ai carichi corrispondenti, e quindi correlare i dati acquisiti con il modello virtuale, identificare eventuali azioni correttive e sviluppare un design in grado di superare i requisiti della norma.

Estensimetri, Accelerometri e altri sistemi per la raccolta dei dati

Gli Estensimetri, o Strain Gauge, consentono di misurare la deformazione media nell'intorno della zona da analizzare e da questa, in funzione delle caratteristiche fisiche del materiale della sua forma, ecc. è possibile ricavare lo stato tensionale dell'area (superficiale) sulla quale il sensore è applicato. I più diffusi, e utilizzati dai professionisti, sono gli "Elettrici a Resistenza" il cui funzionamento si basa sulla misura della variazione di resistenza elettrica di un filamento di Costantina sottoposto a deformazione: a trazione o a compressione.

Questa tipologia di componente è il più diffuso ed è applicabile su qualsiasi materiale (isotropo, anisotropo, omogeneo o disomogeneo) e in ogni settore industriale: aeronautica, automotive, macchine industriali, edilizia, e molto altro ancora. Gli estensimetri possono operare in condizioni limite come alte o basse temperature, nel vuoto o alle alte pressioni, in presenza di campi magnetici, radiazioni, in ambienti saturi di umidità o nei liquidi. Oltre ad un impiego per rilevare fenomeni statici o a bassa velocità, il componente viene utilizzato anche per misure dinamiche (prove di fatica) e se accoppiato con altri trasduttori (accelerometri, potenziometri, ecc.) consente di studiare fenomeni particolarmente complessi. Le applicazioni, in ambito industriale, possono essere le più disparate:



- analisi sperimentali in componenti di macchine nelle diverse fasi del ciclo-vita del prodotto progettazione, produzione, collaudo, ecc. e sino al moderno controllo in esercizio
 - in applicazioni Digital Twin
 - determinazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali
 - integrati all'interno di componenti per applicazioni di mecatronica, robotica, materiali intelligenti, ecc.
 - costruzione di trasduttori (le celle di carico sono le più caratteristiche)
 - applicazioni hardware-on-the-loop per il controllo in tempo reale dei parametri operativi dei macchinari.
- L'estensimetro, nel suo insieme, diventa solidale alla superficie del componente attraverso un supporto adesivo molto robusto. In questo modo, la deformazione superficiale della zona da controllare viene trasferita con precisione alla griglia estensimetrica. La variazione di resistenza elettrica viene misurata collegando la griglia al sistema di acquisizione dati mediante conduttori elettrici (cavi in rame protetti). Le variazioni di segnale, campionate durante la prova, sono raccolte ed elaborate al fine di visualizzarne i valori minimi e massimi, i transitori e, per alcune tipologie di prove, flussi di dati provenienti da più fonti sono integrati ed analizzati in cluster per un più ampio studio del fenomeno. In funzione della tipologia di fenomeno sul quale si sta investigando, le campagne di test possono prevedere l'impiego di altri trasduttori oltre, o in sostituzione, degli estensimetri. Tra questi, quelli più utilizzati nell'ambito delle prove sperimentali sui prodotti industriali vi sono: accelerometri, potenziometri, termometri, flussometri, ecc. ■

Un approccio ibrido risulta statisticamente più vantaggioso in termini economici e di time-to-market rispetto al Full-FEM e al cosiddetto "trial & error" dove si producono più design e prototipi fisici di roll-bar, si provano in successione sino a identificare la versione che supera la prova