

# VALIDAZIONE E VERIFICA DI MODELLI AD ELEMENTI FINITI ATTRAVERSO LA CORRELAZIONE FEM-TEST

FRANCESCO PALLONI

*L'analisi ad Elementi Finiti è una tecnica potente e accessibile a supporto della moderna pratica ingegneristica. È noto come il calcolo FEM sia un modo sicuro per evitare costosi errori di progettazione in quanto permette di creare modelli matematici "virtuali" che possono essere testati 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 in tutti i settori dell'ingegneria richiede che nessuna analisi dovrebbe essere effettuata senza opportuna convalida e (se necessario) attraverso uno studio della convergenza dei modelli.*

La Verifica e Validazione dei modelli analitici attraverso le tecniche di Correlazione FEM-Test permette di certificare che le idealizzazioni, la modellazione e i risultati conseguiti dal calcolo siano corretti. Spesso capita che molti parametri in una analisi a elementi finiti siano incerti e vengano assunti a priori dall'analista. Questo talvolta riesce a spiegare alcune differenze tra il comportamento della simulazione e i risultati prodotti dalla struttura reale che si manifestano in laboratorio o in esercizio.

## CHE COSA È LA CORRELAZIONE FEM-TEST?

Con il termine Correlazione FEM-Test viene comunemente indicata una serie di criteri standard e di metodi numerici consolidati che permettono di confrontare qualitativamente e quantitativamente i risultati prodotti dal calcolo ad Elementi Finiti con le misure sperimentali. Gli strumenti matematici offerti dalla Correlazione FEM-Test sono molteplici e permettono di esprimere in maniera oggettiva le analogie e le differenze ciò che è stato "simulato", con ciò che è stato "misurato".

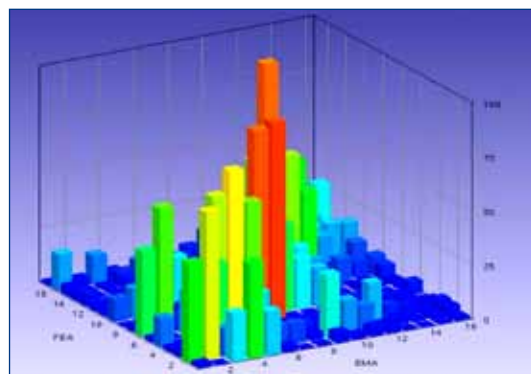
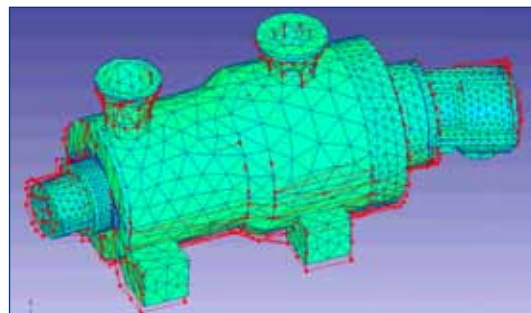


Figura 1: Correlazione Spaziale e Modale del modello FEM di una pompa.

## CORRELAZIONE SPAZIALE

Permette di individuare e correggere eventuali differenze legate al posizionamento reciproco e all'orientamento dei sensori (es. accelerometri) rispetto alla posizione dei nodi FEM corrispondenti.

## CORRELAZIONE STATICA

Consente di individuare differenze nella distribuzione di rigidità tra il modello virtuale e il prototipo fisico. Il confronto avviene per mezzo di indici quali il DAC (Displacement Assurance Criterion) e il DSF (Displacement Scale Factor).

## CORRELAZIONE DINAMICA

Esprime l'affinità tra i due modelli nel dominio delle risposte in ambito della dinamica delle vibrazioni. Il confronto dei risultati dell'analisi modale avviene attraverso l'utilizzo di indici di correlazione quali il MAC (Modal Assurance Criterion), lo XOR (Cross Orthogonality Check), il Co-MAC (Coordinate MAC), mentre per le funzioni di risposta in frequenza vengono utilizzati indici

quali il CSAC (Cross Signature Assurance Criterion) o il CSF (Cross Signature Scale Factor).

### ESEMPI DI CORRELAZIONE FEM-TEST

In Figura 1 è riportata la sovrapposizione tra la mesh ad elementi finiti e la griglia di misura accelerometrica (Correlazione Spaziale) e la matrice del MAC (Correlazione Modale) rilevato sul modello del corpo di una pompa [Rif. 1].

In Figura 2 sono illustrate la Correlazione Spaziale e Dinamica tra il modello FEM e quello sperimentale di un blocco motore [Rif. 2]. In Figura 3 è riportato un esempio di correlazione tra curve FRF. Benché il modello A presenti un andamento in frequenza molto simile a quello misurato, gli indici CSAC e CSF mostrano una scarsa correlazione nel range in frequenza evidenziato. Il modello B, ottenuto al modello A dopo la calibrazione di alcuni parametri, evidenzia un'ottima correlazione su tutto il range in frequenza.

### LA PIATTAFORMA FEMTOOLS

FEMtools è una famiglia di software CAE multifunzionali, cross-platform e indipendenti dal solutore che abilitano capacità di analisi e di scripting per diversi tipi di applicazioni, sviluppata da Dynamic Design Solutions, largamente utilizzato per la validazione di modelli a elementi finiti, confronto tra diverse strategie di modellazione, identificazione di eventuali errori di modellazione. I risultati dell'analisi di correlazione prodotti da FEMtools possono essere utilizzati come riferimento per la validazione e l'aggiornamento dei modelli.

Un'altra applicazione è quella di fornire all'analista strumenti per recuperare e utilizzare nel calcolo dati che possono soltanto essere misurati. Un esempio è lo smorzamento modale, utilizzato nel calcolo della risposta dinamica (FRF, Armonica) attraverso la tecnica della sovrapposizione modale. Lo smorzamento modale ottenuto sperimentalmente può essere applicato alle forme modali analitiche e tarato utilizzando l'analisi di correlazione, in maniera da trovare la migliore correlazione con la risposta sperimentale.

FEMtools offre una gamma completa di indici di correlazione, sia di tipo Globale (come il MAC) che di tipo Locale (come il CoMAC). A differenza della correlazione globale, i metodi locali possono essere utilizzati per identificare aree di migliore e peggiore correlazione che, in unione alle informazioni strutturali, possono essere interpretate come "errori di modellazione". I risultati dell'analisi di Correlazione FEM-Test possono pertanto aiutare l'analista a selezio-

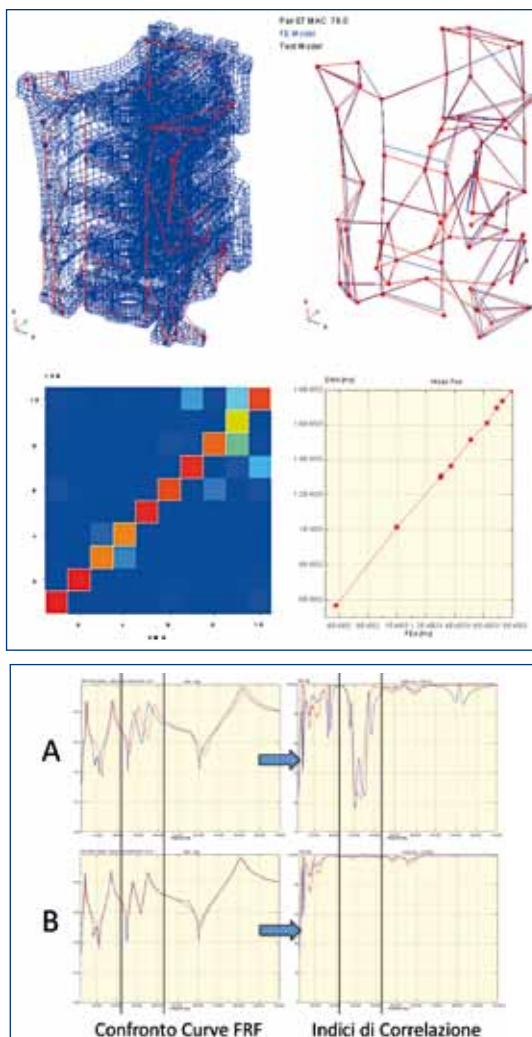


Figura 2: Correlazione Spaziale e Modale di un blocco motore.

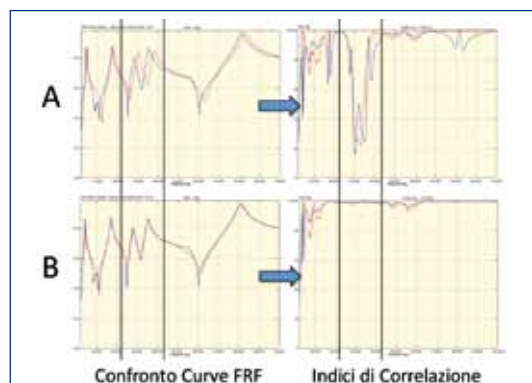


Figura 3: Correlazione tra curve FRF.

nare i parametri del modello FEM che devono essere aggiornati.

### CONCLUSIONI

Le fasi di Verifica e Validazione di un modello ad Elementi Finiti attraverso gli strumenti di Correlazione FEM-Test costituiscono un passo essenziale nei processi di progettazione basati sulla simulazione in quanto permettono di confrontare in maniera oggettiva il prodotto della simulazione con la risposta del prodotto reale. La Correlazione FEM-Test del modello è un processo standardizzabile e ripetibile che dovrebbe far parte di ogni moderna procedura di Controllo Qualità delle analisi tecniche (rif. ISO 9001).

### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Rif. 1 - Y. Deger, Coupled Use of FEA and EMA for the Investigation of Dynamic Behavior of an Injection Pump, Presented at the NAFEMS 2005 World Congress, May 17-20, 2005, Malta.

Rif. 2 - P. Dorey, Application du Recalage Modal Automatisé avec le Logiciel FEMtools entre Modèles FEA. Presented at ASTELAB 2009 Conference, September 2009, Paris, France.