

DALL'EMA ALL'OMA

STORIA , EVOLUZIONE, ASPETTI SALIENTI, VANTAGGI E SVILUPPI FUTURI DI UNA TECNICA IMPRESCINDIBILE PER LA CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DELLE STRUTTURE

Autori

Giorgio Sforza

Ingegnere meccanico, fin dalla tesi operativo nel settore delle misure, è direttore tecnico della ESSEBI che opera da oltre un trentennio nell'ambito della diagnostica strutturale e del monitoraggio. Autore di numerosi articoli e lavori a carattere scientifico, gli ultimi dei quali presentati quest'anno a Stoccolma e a Milano, in occasione dell'EVACES.

Emanuele Burgognoni

Con una laurea breve in ingegneria elettronica ha avuto alcune esperienze di collaborazione con società operanti nel settore della diagnostica e del monitoraggio, per poi approdare in DEWESoft Italia, in cui sta fornendo il supporto ai numerosi Project Integrator che stanno installando impianti di monitoraggio sparsi in tutta Italia.

PREMESSA

La conoscenza del comportamento dinamico delle strutture, o di sottoinsiemi strutturali, ha una importanza rilevante come elemento d'ausilio alla progettazione e come efficace strumento di verifica. Quando ai test dinamici ci si riferisce col termine di analisi modale è possibile identificare una struttura per quel che riguarda le sue caratteristiche di comportamento elastico: modi propri di vibrazione, corrispondenti frequenze di vibrazione e coefficienti di smorzamento. Ogni struttura, infatti, è caratterizzata da una serie di frequenze proprie, ognuna delle quali è dotata del relativo smorzamento e della propria deformata modale. Quando una forza interna, od esterna alla struttura, agisce sulla stessa fornendo energia ad una o più di queste frequenze, s'instaura un'oscillazione che, nei casi estremi, può provocare degli effetti indesiderati, a cominciare dall'emissione di rumore, fino al possibile collasso di alcuni elementi strutturali e addirittura di tutto l'insieme. Una volta note le proprietà dinamiche, è, quindi, possibile identificare il comportamento della struttura nel suo ambiente operativo e quindi la si può controllare ed ottimizzare, per meglio farla corrispondere alle esigenze progettuali. Probabilmente la più popolare applicazione dell'analisi sperimentale modale consiste nel confronto tra le predizioni teoriche riguardo al comportamento dinamico della struttura e quello effettivamente osservato in pratica. Talvolta ci si riferisce a questo processo con il termine di validazione di un modello teorico

consistente in una serie di passi il primo dei quali risiede nel confronto oggettivo tra le specifiche proprietà dinamiche misurate verso quelle previste. Il secondo passo, che forse continua ad essere parte del primo, consiste nella correlazione, da intendersi come l'entità delle differenze (o uguaglianze) tra i due set di dati. Il terzo passo sta nell'identificazione o localizzazione di sorgenti di discrepanza tra i due modelli ed il quarto ed ultimo passo consiste nel fare aggiustamenti e/o modifiche ad uno o all'altro dei due set di risultati in ordine di renderli il più possibile simili e sovrapponibili. Gli ultimi due passi possono riassumersi in una sorta di aggiornamento, sebbene il termine "riconciliazione" sembri essere quello più adatto alla specificità del caso. Arrivati a questo punto, si può, ragionevolmente, concludere che il modello teorico è stato validato e pronto ad essere sottoposto a successive analisi predittive del comportamento reale del manufatto modellizzato. Nell'ambito dell'analisi modale classica si impone una sollecitazione nota, che può essere modulabile, con vibrodina, o impulsiva, alla struttura e se ne misura, quindi, la risposta (analisi modale input-output). L'analisi consiste nel determinare, nel dominio delle frequenze, le funzioni di risposta in frequenza (FRF), o funzioni di trasferimento, tra ingresso e uscita. L'analisi modale operativa, ormai universalmente nota con l'acronimo OMA, viene utilizzata invece nei casi in cui l'eccitazione, cui è soggetta la struttura, non è

affatto nota, perché non misurata o perché non ha alcun senso misurarla. È quest'ultimo il caso in cui essa è di tipo casuale, quale è ad esempio il rumore di fondo di tipo vibrazionale dell'ambiente nel quale la struttura stessa si trova ad operare, a causa della sua collocazione rispetto a sorgenti artificiali e/o naturali di vibrazione (traffico, impianti industriali, vento, microtremore sismico, etc.). Anche se la sorgente d'eccitazione non viene misurata si conoscono, a priori, alcune sue caratteristiche spettrali (nel dominio delle frequenze) che emergono dalla sua natura stocastica ed è quindi possibile analizzare la sola risposta della struttura con opportuni algoritmi di

estrazione modale (analisi del tipo output-only). È questo, ormai, il caso diventato più ricorrente di fronte a strutture di grandi dimensioni, come accade sempre nel settore civile, infrastrutturale ed architettonico-monumentale, che, unitamente alla possibilità di impiegare catene di misura sempre più prestazionali, rende elettiva la scelta dell'OMA come metodo universale ed affidabile per giungere ad una loro caratterizzazione dinamica, ovvero definirne in modo compiuto i parametri identificativi, atti a fornirne una vera e propria carta d'identità dinamica intrinseca, che deve rimanere immutabile, a condizione che non cambino né le rigidità, né le masse in gioco.

STORIA E DIFFUSIONE

Una delle tante conseguenze dell'avvento dei computer e dell'acquisizione dei dati in forma digitale è stata la curiosità di andare ad indagare sulle modalità di vibrazione delle strutture, con algoritmi già ampiamente consolidati, ma operativamente impossibili da implementare fino a quel momento. Già nel 1965 James Cooley, anonimo dipendente dell'IBM, insieme a John Tukey, ricercatore dell'università di Princeton, pubblicarono un articolo in cui si faceva vedere come calcolare con un computer la trasformata di Fourier. L'articolo ebbe da subito un grande successo grazie al crescente uso di convertitori A/D e nacque così il famoso algoritmo FFT (Fast Fourier Transform), di grande efficienza quando si utilizzano intervalli rappresentati da numeri pari alla potenza di due.

Nello stesso anno all'Università di Cincinnati si costituisce l'SDRL, Laboratorio per la Ricerca Aerospaziale, come parte di un contratto dell'Aeronautica Militare degli USA per studiare le vibrazioni delle macchine utensili. Sotto la solerte guida dei professori David Brown e Randy Allemang, SDRL condusse attività di ricerca, seminari e progetti industriali concernenti la sperimentazione e la susseguente analisi nel settore della dinamica modale. Tale laboratorio collaborò con diverse Università tra cui la Katholieke Universiteit a Leuven (KUL) in Belgio. Il naturale scambio di studenti da un posto all'altro permise la nascita, un po' ovunque, di molte società originatesi proprio da questo laboratorio. Nel 1967, per opera di Jack Lemon, membro della SDRL a Cincinnati, nasce la ben nota società SDRC che pose le proprie radici a Milford (OH) ed in seno ad essa si originò il famoso software I-DEAS (Integrated Design and Engineering Analysis Software) per la Computer Aided Design (CAD), la Computer Aided Engineering (CAE) e il Computer Aided Testing (CAT).

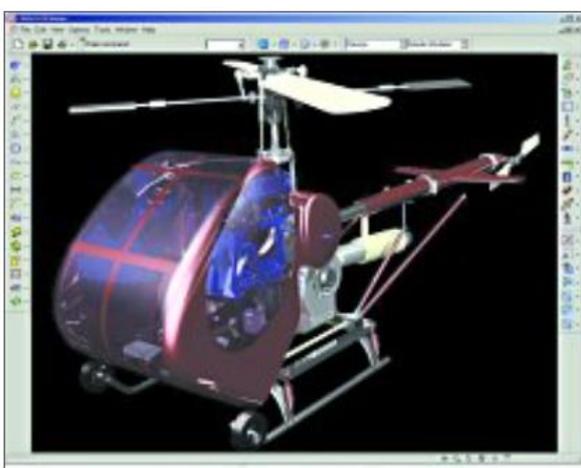


Fig.1 – Modello con I-DAS SDRC



Fig.2 – Operatore di workstation Catia

Soltanto un decennio dopo, si ebbe una risposta significativa a questo software con un altro, sostanzialmente analogo, che copriva tutto il ciclo di vita di un prodotto, il CATIA, realizzato dalla Dassault Aviation per uso interno e poi divenuto software principale per il CAD 3D all'interno della Boeing. Alla fine degli anni 60, quando I-DEAS trovava le prime timide applicazioni, era da diverso tempo che la NASA (National Aeronautics Space Agency) aveva dato notizia che ciascuna delle sue divisioni stava sviluppando il proprio codice software per l'analisi strutturale. A partire anche dalla pubblicazione del testo cult "Finite Element Method" nel 1967 di O.C. Zienkiewicz e di una sensibilità che stava vieppiù crescendo nel settore, tali molteplici sforzi vennero combinati in un unico codice di calcolo, il NASTRAN (NASA STRucture Analysis) rilasciato in commercio ufficialmente a partire dal 1968 dalla CSC (Computer Science Corporation). Ciascuna soluzione, a seconda della tipologia ingegneristica da affrontare era classificata con codici numerici: la 103 era quella mirata all'analisi modale. Agli inizi degli anni settanta sviluppò il primo e largamente molto imitato software FEM open source che diede genesi al SAP, che trovò un forte attecchimento in campo civile.

A partire dal 1973 cominciarono ad essere prodotti in ingente quantità accelerometri piezoelettrici e martelli strumentati per la conduzione essenzialmente di analisi modali di tipo impulsivo. Questi trasduttori, con elettronica a bordo, basati sulla tecnologia IEPE (integrated Electronic Piezo-Electric), potevano essere cablati in modo semplice ed alimentati direttamente dal sistema di acquisizione, evitando l'impiego di amplificatori di carica esterni che rendevano più complessa e onerosa la catena di misura.



Fig. 3 – Martello strumentato tipo, con vari tip

Nel 1982 si tenne ad Orlando, in Florida, la prima conferenza internazionale IMAC 1 (Intenational Modal Analysis Conference) sull'Analisi Modale, organizzata dalla Society of Experimental Mechanics (SEM); ma l'effettivo anno di svolta è il 1984. Jan Leuridan, studente di scambio presso lo Structural Dynamics Research Lab (SDRL), pubblica la sua tesi di dottorato presso l'Università di Cincinnati: "Some direct parameter model identification methods applicable for multiple input modal analysis" che ha dato l'abbrivio a tutto quanto è venuto dopo nell'ambito dell'analisi modale sperimentale. Nello stesso anno il prof. David Ewins, dell'Imperial College di Londra, pubblica il famoso testo "Modal Testing: Theory, Practice and Application", tuttora considerato una vera e propria pietra miliare e saldo punto di riferimento per chi opera nel settore.

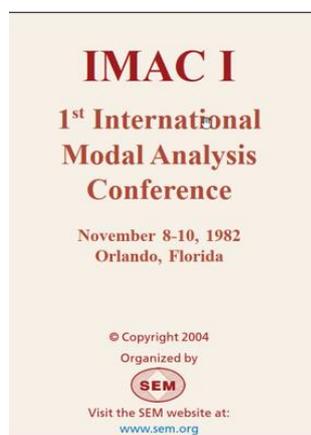


Fig. 4 – Prima Conferenza IMAC

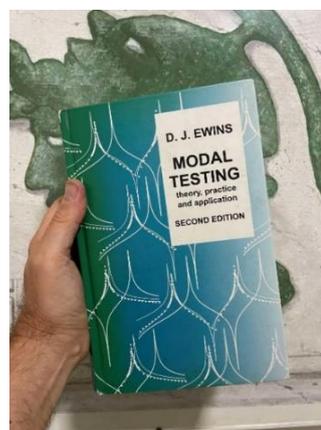


Fig. 5 – Modal Testing di J. Ewins,

Alla International Modal Analysis Conference (IMAC) del 1985, nell'articolo di H.Vold, J. Crowley, e G. Rocklin, "A comparison of H1, H2 and HV frequency response functions" viene presentato lo stimatore HV per le funzioni di risposta in frequenza (FRF). L'HV, che stima l'ampiezza di una FRF ad una data frequenza basata su medie multiple, insieme ad altri stimatori, aiutò molto il calcolo sperimentale delle funzioni di risposta in frequenza in presenza di rumore.

Dal 1986 cominciarono ad essere introdotte le workstation con sistema operativo UNIX che, sebbene di notevoli dimensioni rispetto ai moderni PC, erano snelle e molto più versatili rispetto a quanto la tecnologia elettronica aveva messo a disposizione fino a quel momento (si operava in sostanza solo sui mainframe).

Dal 1987 cominciarono a diffondersi sempre di più e con maggiore sofisticatezza i test di vibrazione al suolo per la verifica del flutter aeroelastico per aeromobili. Test che da questo momento in poi divennero obbligatori per tutti gli aerei commerciali adibiti al trasporto di persone, per determinarne la gamma di velocità operativa più sicura ed idonea.



Fig. 6 – Test bench per flutter

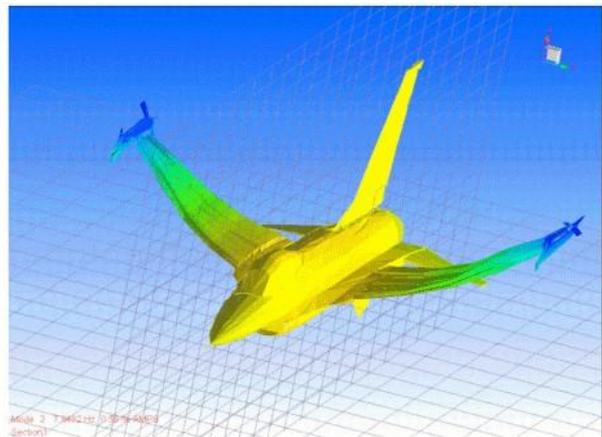


Fig. 7 – Modellazione flutter

Dal 1991 al 1994 comincia a godere di molto interesse la tecnica RD (Random Decrement), che è una procedura nel dominio del tempo, in cui le risposte strutturali ai carichi operativi vengono trasformate in funzioni di decremento casuale, che sono proporzionali alle funzioni di correlazione delle risposte operative del sistema o possono, in modo del tutto equivalente, essere considerate come risposte alle libere oscillazioni.

Con il documento "The Natural Excitation Technique (NExT) for Modal Parameter Extraction from Operating Structures", pubblicato nel 1995, nel SEM International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, si apre ufficialmente l'era dell'analisi modale operativa, in cui, invece delle forze applicate artificialmente, si utilizza la risposta di eccitazione alle sollecitazioni di un oggetto in uso per stimare parametri modali come la frequenza naturale, lo smorzamento e le forme modali.

Dal 1996 vari ricercatori tra i quali S.R.Ibrahim, J. C. Asmussen, P. H. Kirkegaard, S. Krenk, J. L. Jensen, L. Zhang, R. Brincker e P. Andersen sono estremamente attivi, con il risultato di molteplici pubblicazioni, per favorire lo sviluppo dell'analisi modale operativa. In particolare gli ultimi due, basandosi dapprima sul metodo ARMA (AutoRegressive Moving Average Modeling), ovvero il ben noto modello statistico regressivo a media mobile, che fornisce istante per istante un valore di uscita basandosi sui precedenti valori in entrata e in uscita, e poi su algoritmi ad hoc da loro stessi sviluppati, danno vita al software Artemis (SVS), che comincia a trovare diffusione, soprattutto in ambiente industriale a partire dall'anno 2000. In quell'anno con l'articolo "Output-Only Modal Analysis by Frequency Domain Decomposition" di R. Brincker, L. Zhang, P. Andersen, trova consacrazione uno degli algoritmi di estrazione, quello per l'appunto di decomposizione nel dominio della frequenza (FDD), alla base del suddetto software Artemis.

Nel 1998 il Professor Peter Avitabile, dello Structural Dynamics and Acoustic Systems Laboratory dell'Università del Massachusetts Lowell, pubblica il primo "Modal Space Article". Da quel momento, in modo continuo, saranno divulgati un centinaio di articoli sullo spazio modale argomentativi di vari argomenti conseguenti ad attività di testing in campo modale. Essi sono stati originariamente pubblicati in Experimental Techniques dalla Society for Experimental Mechanics e Blackwell Publishing e possono essere consultati sul sito web dell'Università del Massachusetts Lowell: Modal Space Articles.

A cavallo della fine del millennio cominciano a diffondersi metodi operativi nel dominio dei tempi. Come quelli nel dominio delle frequenze si riferiscono alle funzioni FRF, quelli nel dominio dei tempi si riferiscono alla risposta impulsiva e alla covarianza di un sistema eccitato dal solo rumore bianco. Si comincia sempre di più a considerare validi i metodi, sia nel dominio del tempo che della frequenza, che fanno riferimento esclusivo ai dati di output. L'articolo del 2001 di B. Peters e G. De Rock "Stochastic System Identification for Operational Modal Analysis: A Review" propone una disamina dei metodi di identificazione SSI (Subspace Stochastic Identification) nel subspazio stocastico, utilizzati per stimare i parametri modali delle strutture vibranti in condizioni operative. Da esso si evince che la funzione di indicazione della modalità complessa CMIF (Complex Mode Indication Function) può essere applicata sia alla risposta in frequenza che a quella degli spettri incrociati; che il metodo PTD (Polyreference Time Domain), applicato alla funzione di risposta impulsiva, è simile al metodo IV (Instrumental Variable), applicato alla covarianza delle grandezze in output e che l'algoritmo ERA (Eiegnsystem Realisation Algorithm) è, di fatto, equivalente all'algoritmo SSI.

Nel 2004, viene presentato, nello "Shock and Vibration Journal" con l'articolo "The Polymax frequency-domain method: a new standard for modal parameter estimation?" di B. Peeters, H. Van der Auweraer, P. Guillaume e J. Leuridan, il Polymax, l'algoritmo di estrazione modale alla base del referenziato software Test Lab, che, a partire da quel momento, ha costituito uno standard industriale, sia per la chiarezza dei diagrammi di stabilizzazione, sia per la sua genesi che si è sviluppata a cavallo tra il mondo accademico e l'industria. In particolare la suddetta collaborazione si è concretizzata tra l'Università di Bruxelles (VUB) e la società LMS di Leuven (assorbita dal 2013 all'interno del grande gruppo multinazionale Siemens).

Nel 2005, nell'articolo di B. Peeters e H. Van der Auweraer "Polymax: a revolution in operational modal analysis", presentato all'IOMAC (International Operational Modal Analysis Conference) di Copenhagen, il Polymax è esteso al caso operativo con input sconosciuti e la sola risposta strutturale disponibile per l'identificazione del sistema. In esso particolare attenzione è stata rivolta alla pre-elaborazione dei dati grezzi del tempo operativo e alla post-elaborazione dei poli e fattori di riferimento operativi per ottenere le forme modali.

A partire dal 2006, nel mondo di Artemis, mentre si cerca di automatizzare il metodo di estrazione FDD (R. Brincker, P. Andersen, N.J. Jacobse – "Automated Frequency Domain Decomposition for Operational Modal Analysis"), si introduce contemporaneamente un algoritmo alternativo, lo Stochastic Subspace Identification (SSI), che opera nel dominio dei tempi (R. Brincker, P. Andersen, "Understanding Stochastic Subspace Identification").

Dal 2006 ad oggi sono stati implementati molteplici perfezionamenti e la nuova frontiera dell'OMA è rivolta ad algoritmi di ultima generazione che si incentrano sull'analisi del danno e alla sempre più spinta automazione del processo di estrazione.

Dall'EMA all'OMA

Sia l'OMA che l'EMA sono noti come metodi "parametrici", il che significa che i dati di misurazione vengono utilizzati per costruire un modello matematico delle caratteristiche dinamiche della struttura. Questo modello matematico viene, quindi, utilizzato per estrarre i parametri modali della struttura in modo sistematico, noto come curve-fitting.

In entrambi i metodi, il modello matematico della struttura viene costruito utilizzando una famiglia di funzioni nel dominio della frequenza calcolate dalle misurazioni che esprimono la relazione tra i riferimenti (o input) e le risposte (output) per varie posizioni intorno alla struttura.

Nell'Analisi Modale Sperimentale (Experimental Modal Analysis, meglio nota con l'acronimo di EMA), volta alla caratterizzazione modale delle strutture, ovvero a determinarne i modi propri di vibrare, le rispettive frequenze e gli smorzamenti associati, l'eccitazione avviene con un lento e progressivo spazzolamento armonico a mezzo di vibrodina, o in modo impulsivo con il martello strumentato e la risoluzione del problema si ottiene a mezzo della FRF, ovvero della Funzione di Risposta in Frequenza, detta anche risposta armonica, che è la descrizione della sua uscita (funzione del tempo) utilizzando come variabile la frequenza invece che il tempo (ovvero nel dominio della frequenza).

In modo più rigoroso, la FRF è la funzione di trasferimento valutata lungo l'asse delle frequenze, ovvero considerandone solo la parte reale, in quanto quella immaginaria è trascurabile nell'intorno di dove avviene la risonanza.

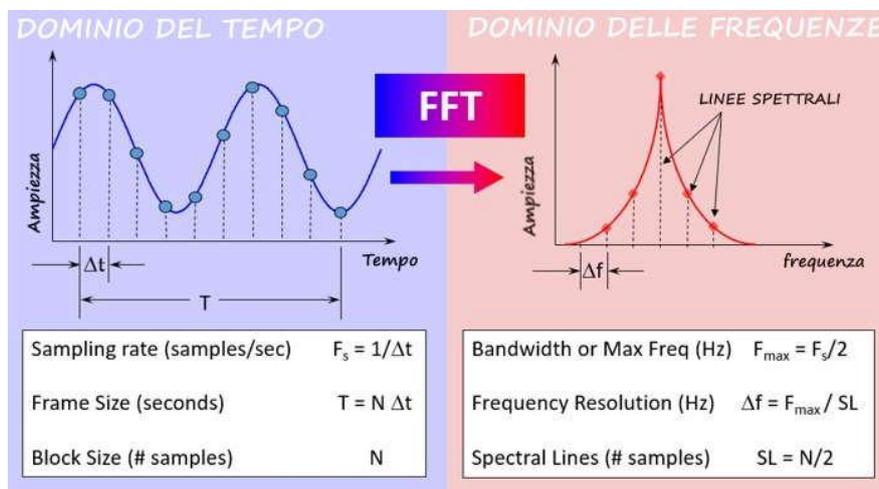


Fig. 8 – Passaggio dal dominio dei tempi a quello delle frequenze

Laddove si aveva a che fare con grandi strutture, come è avvenuto dapprima nel campo aeronautico, per poi passare, in modo progressivo a quello navale e quindi civile ed infrastrutturale, si è dovuti riferirsi, gioco forza, a qualcosa di alternativo, perché risultava estremamente dispendioso, se non addirittura impossibile, eccitare in modo artificiale il manufatto. È risultato quasi naturale fare riferimento, quindi, all'eccitazione naturale, o antropica, proveniente dall'ambiente in cui il manufatto era contestualizzato. Eccitazione nelle sue normali condizioni di funzionamento, di natura casuale, detta operativa per l'appunto. Mancando le grandezze di input e non potendo riferirsi alla funzione di risposta in frequenza si è cercato di introdurre qualcosa di equivalente dal punto di vista analitico che potesse, poi, fornire un costrutto simile a quello per l'analisi modale classica, quella con eccitazione nota. Ecco quindi l'introduzione dei Crosspettri (Cross Power Spectra), che non sono altro che funzioni di potenza incrociata, ovvero calcolata in modo reciproco tra punti di misura, appartenenti all'insieme complesso, uno rispetto all'altro.

I risultati ottenuti sono apparsi da subito estremamente convincenti ed è stato possibile utilizzare gran parte del lavoro svolto, in termini di sviluppo computazionale, per l'analisi modale classica e travasarlo a questa nuova metodologia di approccio.

Dall'inizio del secondo millennio, quindi, in presenza di manufatti di grandi dimensioni, è risultato conveniente, più produttivo ed in definitiva anche più affidabile operare con questo nuovo approccio metodologico, del tipo, per l'appunto, output only. Alcune società, come per esempio LMS, hanno adattato in modo estremamente efficiente e proficuo quanto sino a quel momento avevano implementato nell'ambito

della modale classica, altre, come la SVS e la promettente società italiana S2X, sono nate appositamente con l'interesse precipuo in questa direzione, sviluppando ex novo un software specifico e dedicato all'argomento.

Chi abbia realizzato il prodotto migliore ancora oggi non si può dire. ESSEBI utilizza da quindici anni il software Test Lab con piena soddisfazione e ne è assolutamente convinta sulla potenzialità per la risoluzione di qualsivoglia problema, fermo restando che ultimamente ha eseguito molteplici test comparativi con Artemis, di cui è licenziataria da un paio di anni, che forniscono altrettanti soddisfacenti risultati. Insomma i due software di maggiore e consolidata diffusione, con dietro una solida struttura di supporto che garantisce una continua manutenzione ed uno sviluppo progressivo, ovvero Test Lab ed Artemis, pur operando con approcci sostanziali diversi, soprattutto nelle fasi di estrazione dei parametri modali, forniscono risultati molto spesso sovrapponibili, a dimostrazione, alla fin fine, della potenza intrinseca e bontà delle diverse metodologie di base adottate.

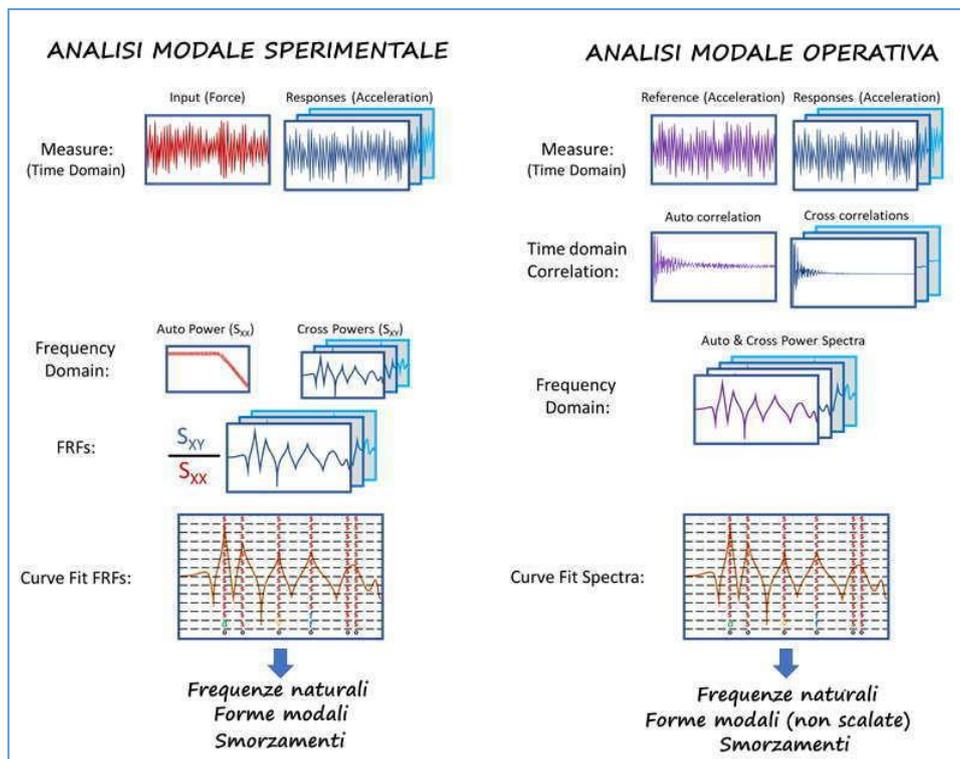


Fig. 9 – Flussi EMA e OMA a confronto

L'OMA

Nell'OMA, le forze in ingresso, rappresentate con [X] nella figura che segue sono sconosciute e non possono essere misurate; l'unica informazione disponibile è la risposta del sistema, rappresentata con [Y].

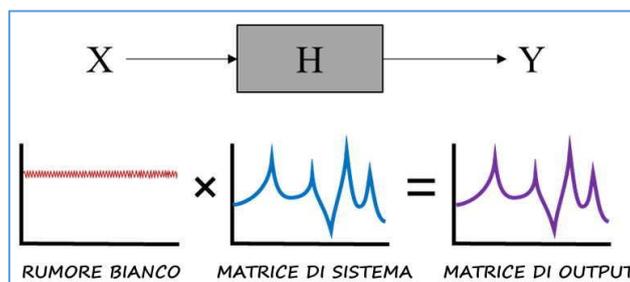


Fig. 10 – Risposta del sistema in una OMA

Tuttavia, se si assume che le forze di input siano sotto forma di rumore bianco (assenza di periodicità e uguale intensità nell'intervallo di frequenza di interesse) e distribuite spazialmente in modo casuale ad avvolgere la struttura, le risposte della struttura conterrebbero tutte le informazioni necessarie per caratterizzare il sistema. Questa ipotesi di rumore bianco consente di utilizzare i segnali di risposta per costruire il modello matematico della struttura ed estrarne i parametri modali senza un input misurato. Tuttavia, senza una forza di riferimento misurata, è impossibile calcolare le FRF allo stesso modo dell'EMA, quindi è necessario utilizzare un metodo alternativo per estrarre le informazioni sulla frequenza.

Le risposte della struttura vengono utilizzate per creare funzioni nel dominio del tempo, note come funzioni di correlazione, strumenti statistici per trovare schemi ripetitivi (come contenuto periodico), sepolti in quelli che sembrano essere segnali casuali. Per ricercare porzioni di segnale in modo tale da determinare la presenza di una componente periodica sepolta dal rumore, si ricorre alla funzione di autocorrelazione (ACF). Essa è il risultato del confronto di un segnale con una versione ritardata di se stesso, ad un tempo Δt , a ritardi crescenti. Possiamo dedurre che se un segnale varia lentamente nel tempo, il suo valore agli istanti $x(t)$ e $x(t+\Delta t)$ sarà pressoché simile (l'autocorrelazione avrà segno positivo). Una ACF fornisce, quindi, una misura della quantità di correlazione tra i due segnali (un valore compreso tra -1 e 1). Se il segnale originale contiene informazioni periodiche (come le frequenze naturali), la versione ritardata del segnale avrà un'elevata correlazione con il segnale originale a determinate periodicità (ritardo). Tuttavia, quando il ritardo tra i segnali aumenta, la correlazione dovrebbe progressivamente decadere a zero, poiché la struttura è eccitata in un modo presunto casuale. La risposta all'orizzonte iniziale (numero ridotto di ritardi temporali) è dominata dalla risposta modale, mentre più avanti, nel prosieguo, è solo casuale, quindi non può esserci una correlazione tra i segnali.

L'ACF estrae, quindi, le periodicità comuni tra il segnale e quello ritardato e la funzione risultante può essere tradotta nel dominio della frequenza. Allo stesso modo, la funzione di correlazione incrociata (CCF) confronta un segnale ritardato con un segnale di riferimento, evidenziando le periodicità comuni tra i segnali provenienti da due diverse posizioni di misurazione.

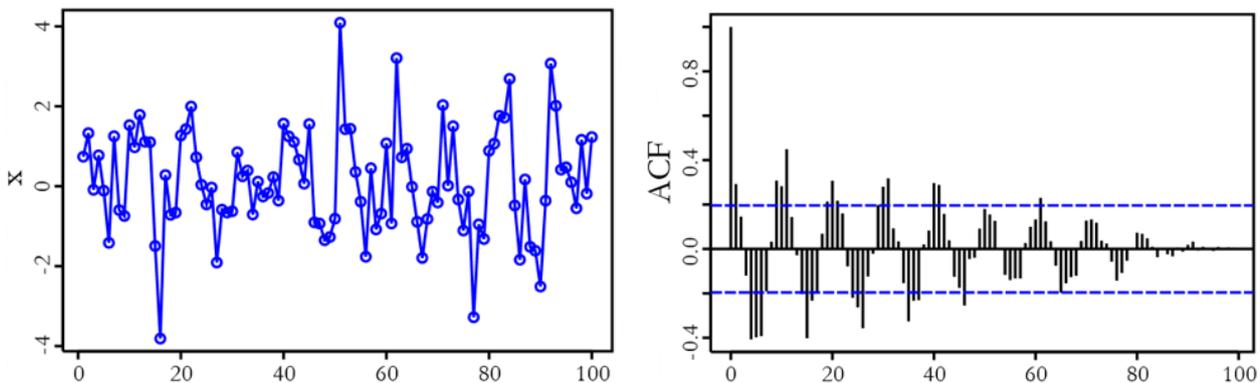


Fig. 11 e 12 – Segnale nel tempo e sua funzione di autocorrelazione

Una o più posizioni di misurazione vengono selezionate come stazioni di riferimento. Utilizzando le risposte nel dominio del tempo misurate sulla struttura, vengono calcolate le funzioni di autocorrelazione e di correlazione incrociata, estraendo periodi comuni a tutte le posizioni di misurazione.

Prendendo la trasformata discreta di Fourier delle funzioni di correlazione, viene generata una famiglia di funzioni nel dominio della frequenza chiamate correlogrammi. Questa famiglia di correlogrammi evidenzia le frequenze dominanti comuni tra le posizioni di misurazione, analogamente alle FRF dell'EMA. I correlogrammi sono spettri di potenza (autospettri e spettri incrociati) e possono essere adattati alla curva in modo identico all'approccio utilizzato nell'EMA.

Per il semplice fatto che le funzioni di correlazione producono un valore non ridimensionato compreso tra -1 e 1 e le forze di input non sono misurate, nel caso dell'OMA si ha una limitazione di fondo, strutturale. I concetti di fattore di partecipazione modale o ridimensionamento modale perdono la loro validità.

METODI OMA A CONFRONTO NELLA STIMA DEI PARAMETRI MODALI

La parte più complessa e pregnante di tutto il processo che caratterizza una OMA è la stima dei cosiddetti parametri modali.

In generale la risposta di un sistema dinamico è data dalla sovrapposizione di tutte le sue forme modali. Tuttavia, se si assume che in una data banda di frequenze, solo un modo assume carattere prevalente, i parametri di questo modo possono essere determinati separatamente. I metodi che fondano su questa semplice, e riduttiva, assunzione sono chiamati SDOF (Single Degree Of Freedom), ovvero ad un grado di libertà, e in essi l'influenza dei modi vicini è presa in considerazione analiticamente dalle matrici dei termini residuali. Sono questi metodi speditivi, molto veloci e richiedono contenuti sforzi computazionali e limitata memoria del computer.

Operare con un approccio SDOF ha senso e risulta conveniente ed estremamente valido se i modi del sistema sono disaccoppiati, tali da poter essere scissi ed analizzati separatamente. Risulta quindi ovvio pensare che, in generale, non può essere questo il caso. È allora richiesto di approssimare i dati misurati con un modello che includa parecchi modi. I parametri di questi modi vengono quindi stimati in modo simultaneo con il cosiddetto metodo MDOF (Multi Degree Of Freedom), ovvero a più gradi di libertà.

Si trascurano le classificazioni di stima dei parametri modali basate su parametri locali e globali e quelle basate su singolo o multiplo input in quanto attinenti precipuamente l'analisi modale classica (EMA). Gli schemi di stima dei parametri modali possono essere categorizzati in accordo al tipo di modello. I metodi di Identificazione del Modello Modale (MMI) descrivono i segnali di output come combinazioni lineari delle soluzioni caratteristiche, chiamati modi di sistema, delle equazioni differenziali del moto di una struttura meccanica. Il problema dell'identificazione si riduce alla stima di qualche parametro incognito (i parametri modali appunto) relativamente ad un modello noto. I metodi di Identificazione Diretta (DI) usano le equazioni differenziali stesse, piuttosto che la conoscenza a priori riguardo la natura delle soluzioni caratteristiche. Con queste tecniche di identificazione si arriva ai parametri modali con una procedura contraddistinta da due passi. Il primo stima i parametri, ossia i coefficienti, delle equazioni differenziali. Il secondo calcola i parametri modali da questi coefficienti, per esempio a mezzo di una analisi agli autovalori delle matrici di massa, rigidità e smorzamento.

Trascurando i più semplici metodi, e ormai ampiamente superati, del tipo SDOF quali il Peak Picking, il Mode Picking ed il Circle Picking, si analizzano di seguito i più usuali e diffusi metodi MDOF nel dominio del tempo e delle frequenze. Per fare questo ci si riferisce ai due prodotti commercialmente più in uso: Test Lab di Siemens e Artemis di SVIBS. Entrambi hanno la duplice implementazione nei due domini tempo e frequenza.

Il metodo di stima dei parametri modali PolyMAX, elemento focale di Test Lab, deriva di fatto dal metodo polireferenziato LSCE (Least Square Complex Esponential) esponenziale complesso dei minimi quadrati nel dominio del tempo, standard nel settore industriale. In una prima fase viene costruito un diagramma di stabilizzazione contenente frequenza, smorzamento ed informazioni sulla partecipazione modale. Successivamente, le forme modali si trovano selezionando poli stabili in un secondo passaggio basato sull'impiego dei minimi quadrati nel campo complesso. Uno dei vantaggi specifici di questa tecnica risiede proprio nella stabile identificazione dei poli del sistema e dei fattori di partecipazione in funzione dello specificato sistema, portando a diagrammi di stabilizzazione di facile interpretazione ed impiego. Ciò implica un potenziale per automatizzare il metodo e applicarlo a casi di stima "difficili" come quelli di ordine elevato e/o sistemi altamente smorzati, con ampia sovrapposizione modale. Inoltre, PolyMAX è estremamente efficiente dal punto di vista computazionale. Nato dapprima per la modale classica, con input noto e

perfettamente definito, il metodo è stato quasi subito traslato, con ampio successo, anche alla modale operativa, con input stocastico, non determinato.

Il metodo LSCE nel dominio del tempo definisce un insieme di equazioni lineari per l'ordine del modello massimo richiesto, da cui i coefficienti polinomiali della matrice α possono essere calcolati nell'ottica di minimi quadrati; risolvendo un problema agli autovalori per ordini di modelli crescenti, provvede alla costruzione di un diagramma di stabilizzazione, in cui sono contenute le informazioni relative alle frequenze proprie, ai rapporti di smorzamento e ai fattori di partecipazione modale; calcolare le forme modali e i residui inferiore e superiore, nel senso dei minimi quadrati, sulla base dell'interpretazione utente del diagramma di stabilizzazione.

La differenza tra il metodo LSCE e il PolyMAX risiede nel primo passaggio. L'LSCE utilizza le risposte all'impulso per trovare i coefficienti polinomiali, mentre il PolyMAX, giustappunto, perché opera nel dominio delle frequenze, richiede funzioni di risposta in frequenza, o meglio, funzioni spettrali di potenza incrociata (cross power spectra). Con l'applicazione nel tempo, si è visto che quest'ultimo genera diagrammi di stabilizzazione estremamente chiari, rendendo molto semplice la selezione dei poli "fisici". Nel metodo LSCE, invece, i poli non fisici (e talvolta anche fisici) tendono a "vagare" nel diagramma di stabilizzazione, specialmente quando si prendono in considerazione elevati ordini per il modello. Il PolyMAX ha poi l'interessante proprietà che i poli non fisici sono stimati con un rapporto di smorzamento negativo in modo che siano facilmente esclusi dall'insieme dei poli prima di tracciarli. Un diagramma così chiaro non significa che alcuni dei poli mancano; al contrario, con esso, si possono trovare più poli (fisici) rispetto agli altri metodi che rappresentano l'attuale stato dell'arte. È sufficientemente acclarato che i metodi nel dominio del tempo sono preferiti in caso di smorzamento basso e i metodi nel dominio della frequenza in caso di smorzamento elevato. Studi di validazione hanno anche rivelato che il metodo PolyMAX non ha problemi nella stima corretta dei modi con un basso rapporto di smorzamento, per cui si può concludere che è un metodo ambivalente, che eccelle in entrambi i casi.

Stabilito che gli algoritmi di estrazione nel dominio del tempo siano adatti a strutture debolmente smorzate, da qualche anno prima della fine del secondo millennio cominciarono a diffondersi i metodi appartenenti alla famiglia SSI (Stochastic Subspace Identification). In particolare ebbero un rapido sviluppo a partire dalla pubblicazione nel 1996 del libro di Van Overschee e De Moor "Subspace Identification for Linear Systems". Unitamente a questo libro è stata diffusa una serie di file MATLAB che hanno consentito alla comunità scientifica di convincersi che gli algoritmi SSI fossero davvero uno strumento forte ed efficiente per l'analisi modale del tipo Output Only, costituendo, de facto, uno standard che ancora oggi si mantiene inalterato.

In particolare il software Artemis ne ha fatto da sempre una sorta di bandiera, arrivando oggi ad avere fino a a cinque differenti metodi di estrazione modale nel dominio del tempo, tutti del tipo CC-SSI (Crystal Clear Stochastic Subspace Identification) molto veloci ed efficienti, che rappresentano versioni avanzate dell'originario SSI. Questi metodi stimano i parametri modali direttamente dalle serie temporali misurate e alcuni di essi arrivano a stimare anche i gradi di incertezza dei parametri modali. In tutti la stima della funzione di correlazione è integrata nell'algoritmo di identificazione. Esso nasce come deterministico. Quando, però, i dati acquisiti durante le prove sperimentali possono essere considerati come una serie a tempo discreto e possono essere descritti in maniera statistica da processi stocastici si ottiene la formulazione SSI, con tutte le varianti del caso.

Nell'ambito del dominio delle frequenze Artemis opera con diverse varianti dell'algoritmo di base del tipo Frequency Domain Decomposition (FDD), con aspetti innovativi che da poco sconfinano nel campo dell'analisi non lineare delle strutture.

In aggiunta ai colossi sopra descritti, è doveroso citare il software S2X, realizzato in Italia, e le tante realizzazioni estemporanee presenti un po' ovunque nel mondo accademico, in alcuni casi molto interessanti,

anche se spesso molto poco affidabili, che utilizzano, come scheletro portante, l'enorme quantità di script disponibili gratuitamente su web.

PRINCIPALI VANTAGGI DELL'OMA

Esistono tre vantaggi/motivi principali alla base del fatto di dover eseguire un'analisi modale operativa, ovvero durante il normale e usuale esercizio della struttura:

- ✚ Le condizioni operative del mondo reale, in cui la struttura si trova collocata a svolgere la sua funzione, che differiscono significativamente dalle condizioni di laboratorio;
- ✚ Le limitazioni pratiche, dettate prevalentemente dalle dimensioni, che impediscono una buona operatività;
- ✚ La possibilità di implementare un monitoraggio volto al controllo dello stato di salute della struttura in modo continuo e al rilevamento dell'insorgenza di eventuali danni.

Alcune strutture evidenziano un alto grado di non linearità, quando vengono sottoposte a prova in un ambiente di laboratorio, rispetto al loro utilizzo nel mondo reale. Un esempio di questo fenomeno è una sospensione automobilistica. Gli ammortizzatori, come elementi costituenti di base, hanno un alto livello di attrito statico quando il veicolo è fermo, che non si presenta affatto quando esso è in movimento su strada. Questo attrito non solo aumenta artificialmente la rigidezza locale della struttura, ma può anche evidenziare un comportamento non lineare al superamento di una certa soglia e la sospensione inizia ad articolarsi. E tale comportamento non lineare può creare scompiglio, quando si tenta di misurare e analizzare con precisione i dati di dinamica strutturale sui veicoli in laboratorio. Potrebbero, poi, anche esserci influenze ambientali sulla struttura al vero, complicate da replicare in laboratorio. Le interazioni aeroelastiche, come il vento e il flusso d'aria, sono un esempio comune. Tutto ciò è fondamentale per comprendere fenomeni come il flutter (riscontrato soprattutto sugli aeromobili, ma da un po' preso in debita considerazione anche sui ponti) , pressoché impossibile da riprodurre in condizioni diverse dal vero.

Molto banalmente alcune strutture, come velivoli, imbarcazioni, edifici, torri, ponti, turbine eoliche, ecc., sono troppo grandi per essere testate in laboratorio e spesso è impossibile eccitarle adeguatamente utilizzando i metodi di input tradizionali. In questi casi, i carichi naturali riscontrati in opera (carico da agenti naturali quali vento e moto ondoso, traffico, effetti antropici, ecc.) sono più realistici e più adatti a sollecitare la struttura e l'OMA , di conseguenza, risulta l'unica valida opzione per analizzarle e caratterizzarle da un punto di vista dinamico.

La modifica dei parametri modali (come la frequenza naturale) può essere, poi, un precoce segnale di maggiore usura, ammaloramento o guasto imminente di una struttura. Monitorandola, quindi, a mezzo delle tecniche OMA, si possono valutarne le condizioni di salute (SHM) direttamente in opera, senza l'interruzione di alcuna usuale operazione. Ciò è decisamente utile per strutture civili molto grandi come ponti ed edifici, in particolare, dopo l'esposizione a eventi eccezionali di natura vibratoria, potenzialmente molto dannosi, come i terremoti.