



Ing. Alessandro Tornincasa, laureato in Ingegneria per L'Ambiente e il Territorio nel 2004 con una tesi teorico-sperimentale sulla cinematica delle polveri industriali, Alessandro Tornincasa ha lavorato per circa un anno come progettista CAD presso un'azienda nel campo dell'automazione del torinese, e lavora oggi presso Nuovamacut Nord Ovest srl, del gruppo Nuovamacut Automazione (rivenditore di software CAD, sviluppo applicativi per l'automazione della progettazione, e servizi di consulenza e formazione per le aziende). Certificato come tecnico di supporto Solidworks, istruttore Solidworks, e tecnico di supporto SolidWorks Simulation, attualmente svolge mansioni di tecnico e consulente CAD e applicativi di analisi FEM, cinematica-dinamica e fluidodinamica.

STRATEGIE DI MODELLAZIONE 3D

L'utilizzo del 3D oltre la barriera del ciclo di sviluppo: tecniche speciali di animazione

Storicamente, i modelli CAD 3D della fase di ingegnerizzazione vengono difficilmente utilizzati per funzioni aziendali a valle della produzione, come il marketing, il supporto vendite, la documentazione tecnica, il servizio manutenzione e di formazione aziendale, a causa di ostacoli tecnici e di problemi di riservatezza. In realtà i modelli 3D interattivi e le relative animazioni permettono di mostrare in modo immediato ed esplicativo il funzionamento di una macchina o di un prodotto nell'arco di pochissimi minuti (figura 1), coinvolgendo anche quella parte di clientela che non ha un background tecnico ma che può avere potere decisionale (per esempio un responsabile degli acquisti o un

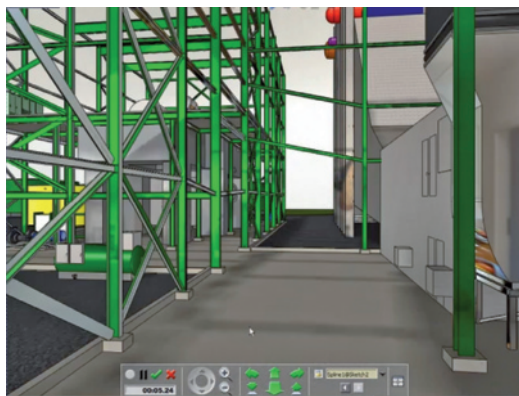
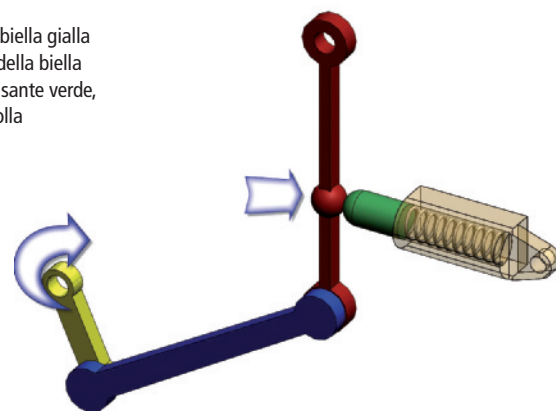


Figura 1 – La stragrande maggioranza dei sistemi CAD tridimensionali utilizzati dalle piccole e medie aziende prevede la possibilità di realizzare delle animazioni molto fedeli alla realtà, simulando movimentazioni di meccanismi (es. l'intero ciclo di lavorazione di una macchina) oppure effettuando dei walk-through (delle "camminate virtuali" all'interno di un impianto) e creando il filmato renderizzato (quindi mostrando in modo reale l'interazione della luce con i vari materiali e l'ambiente)

direttore commerciale).

Vi sono però alcune limitazioni dei moduli di animazione dei sistemi CAD (come ad esempio impossibilità di simulare la deformazione di un componente): in questi casi le aziende si avvalgono di software specializzati (3D Studio MAX, Maya) per utilizzare i quali è necessario investire sulla formazione di una figura interna all'azienda, oppure ricorrere a costose consulenze esterne. In realtà, alcune limitazioni dei moduli di animazione possono

Figura 2 – La rotazione della biella gialla fa sì che la superficie sferica della biella rossa entri in contatto col pulsante verde, e che questo comprima la molla



essere superate grazie all'utilizzo di tecniche speciali che permettono di ottenere dei risultati di un realismo adeguato, utilizzando il proprio software CAD tridimensionale.

A volte, per ottenere un filmato fedele alla realtà, è necessario mostrare anche componenti flessibili o deformabili che cambiano la loro forma durante il movimento (per esempio una molla, un soffietto che funge da riparo per una guida lineare, un cinghia ecc.).

Si prenda il caso di una molla presente all'interno di un interruttore elettromeccanico: durante l'animazione, a seguito della rotazione della biella gialla, l'interruttore verde viene spinto per contatto e comprime la molla intervenendo su un circuito (figura 2).

È possibile simulare la compressione dinamica della molla introducendo una relazione esterna tra la molla e l'interruttore.

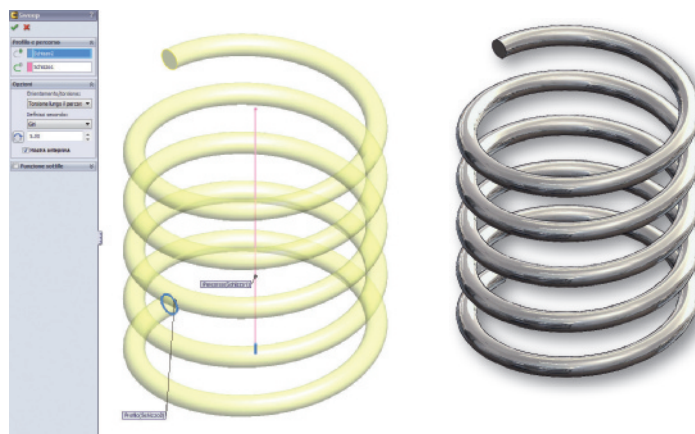


Figura 3 – Procedura di modellazione della molla alternativa a quella classica: sul piano frontale si disegna uno schizzo contenente una linea verticale rappresentante l'asse della molla, con un estremo vincolato all'origine e un estremo libero. Sempre sullo stesso piano, si disegna un altro schizzo contenente una circonferenza in cui vengono inserite le quote del diametro di filo e del diametro esterno della molla.

Si crea una funzione di sweep che ha la circonferenza come profilo e la linea verticale come percorso, e si attiva l'opzione "torsione lungo il percorso", dove il numero di giri identifica il numero di spire della molla, ottenendo come risultato una molla realistica

Un prerequisito affinché tale tecnica funzioni è che la molla sia modellata seguendo una procedura alternativa a quella classica che prevede l'utilizzo di una funzione di sweep in cui un profilo circolare segue il percorso di un'elica (figura 3).

La molla viene poi assemblata in modo che risulti completamente definita e non possa effettuare alcun movimento: è buona norma infatti introdurre relazioni esterne solo su componenti completamente bloccati per evitare di avere risultati inattesi durante la ricostruzione.

Si introduce una relazione esterna tra la molla e il pulsante dell'interruttore: è sufficiente modificare lo schizzo che definisce l'asse della molla dall'interno dell'assieme, e poi aggiungere un vincolo di coincidenza tra il bordo del pulsante e l'estremo non vincolato della linea (figura 4). Come risultato, la lunghezza della molla sarà sempre legata alla posizione dell'interruttore: quando l'interruttore si sposta verso destra la molla si comprime, mentre quando si sposta verso

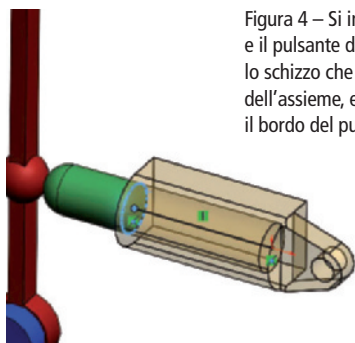


Figura 4 – Si introduce una relazione esterna tra la molla e il pulsante dell'interruttore: è sufficiente modificare lo schizzo che definisce l'asse della molla dall'interno dell'assieme, e poi aggiungere un vincolo di coincidenza tra il bordo del pulsante e l'estremo non vincolato della linea

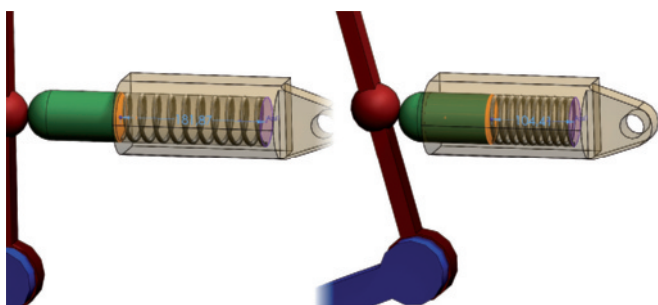


Figura 5 – La lunghezza della molla sarà sempre legata alla posizione dell'interruttore: quando l'interruttore si sposta verso destra la molla si comprime, mentre quando si sposta verso sinistra la molla si allunga

sinistra la molla si allunga (figura 5). Per realizzare l'animazione del movimento con la compressione della molla nell'ambiente "motion manager" ci si sposta sul tempo corrispondente alla fine della compressione della molla (esempio 5 secondi), si modifica l'angolo di rotazione della biella, inserendo quello corrispondente alla fine della compressione della molla, e infine si ricostruisce l'assieme. Il

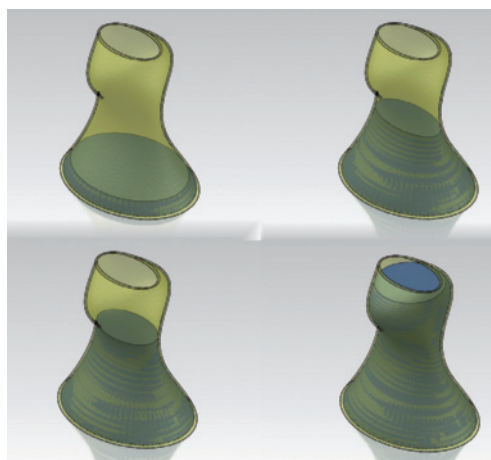


Figura 6 – Tramite la tecnica illustrata è possibile simulare (a livello qualitativo) il riempimento di recipienti, serbatoi, o tubazioni da parte di un liquido

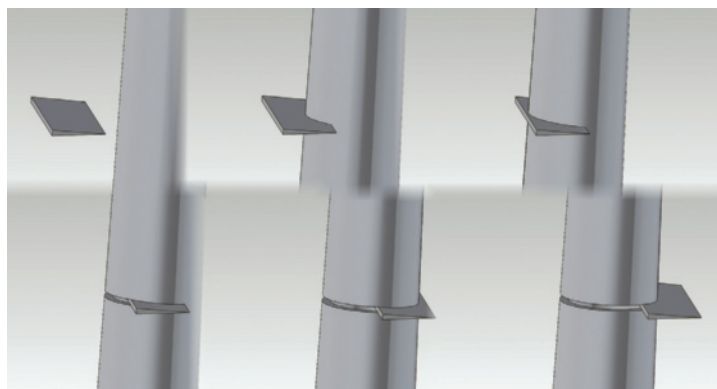


Figura 7 – Animazione del taglio di un tubo

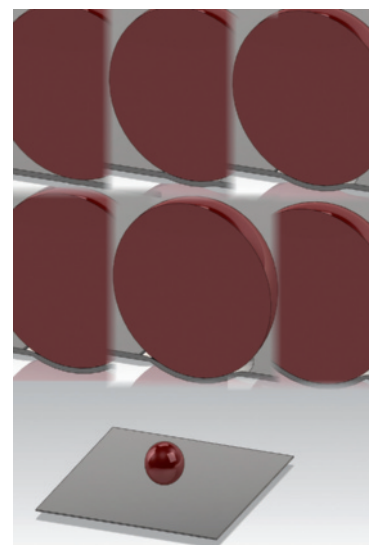


Figura 8 – Animazione qualitativa della deformazione di una lamiera da parte di una sfera

sistema CAD non farà altro che associare la forma compressa della molla al fotogramma finale (5 secondi), la forma non compressa al fotogramma iniziale (0 secondi), e ricaverà la forma nei fotogrammi intermedi per interpolazione lineare.

Tramite questa tecnica possono essere create delle animazioni con un buon grado di realismo per rappresentare elementi che variano la loro forma (es. liquidi che riempiono recipienti, taglio di componenti, deformazione di componenti). Nelle figure 6, 7, 8 vengono mostrati alcuni esempi.

Introduzione alle analisi non lineari

Il metodo degli elementi finiti si è inizialmente sviluppato principalmente come strumento per la soluzione di problemi lineari, nei quali la risposta di una struttura è proporzionale ai carichi applicati e per i quali, conseguentemente, le matrici che definiscono il problema vengono costruite nella fase iniziale dell'analisi e rimangono invariate durante la simulazione. Ciò è dovuto, soprattutto, alle limitate potenzialità computazionali degli elaboratori delle epoche passate, piuttosto che, almeno entro certi limiti, a difficoltà concettuali nel definire strategie risolutive. Con la continua evoluzione di hardware e software, queste limitazioni sono via via venute meno e le analisi non lineari sono divenute più popolari, non solo in campi high-tech ma anche per affrontare problemi di progettazione in settori più tradizionali.

Analisi non lineari: quando e come

Ma quali sono i problemi per i quali c'è bisogno di impostare un'analisi non lineare per ottenere risultati significativi? Quando un problema non può essere convenientemente linearizzato ed è necessario modellarlo come non-lineare, appunto? Quali sono i tipi di non linearità che può più comunemente capitare d'incontrare? Quali sono le tecniche risolutive da applicare per risolvere un problema non lineare e come è possibile valutare la bontà dei risultati ottenuti? Vediamo, se possibile, di dare una risposta a tali quesiti che, anche se non esaustiva, permetta di comprendere finalità, problematiche, complessità e vantaggi di un'analisi non lineare.

Le non linearità più comuni

La prima non linearità che viene in mente è, in genere quella legata alla legge costitutiva del materiale. Se, infatti, la relazione che lega sforzi e deformazioni di una materiale non è lineare ma viene a dipendere sia dal livello dello sforzo applicato così come dalla velocità di applicazione del carico, non sarà possibile fare riferimento al solo modulo elastico e al coefficiente di Poisson per descrivere

il suo comportamento. Vi sono poi casi in cui la non linearità è dovuta all'elevato valore degli spostamenti o delle deformazioni, la qualcosa rende necessario ricostruire, durante l'analisi, la matrice di rigidezza in funzione dell'entità degli spostamenti e delle deformazioni, appunto, per tenere in considerazione la mutata configurazione geometrica.

Un esempio di questo tipo sono le simulazioni di processi tecnologici che coinvolgono elevate deformazioni plastiche (metal forming), nei quali si manifesta anche la non linearità del materiale. Un altro caso di non linearità sono i problemi di contatto, oppure i problemi accoppiati, quali l'interazione fluido-strutturale, in cui vi è una mutua influenza tra il comportamento fluidodinamico e le proprietà meccaniche di una struttura. Vi sono, infine, i problemi dinamici non lineari, come l'impatto di un proiettile o i casi in cui si manifestano vibrazioni non lineari.

L'elenco ora riportato, benché non completo, permette di comprendere la complessità dei problemi di cui si sta parlando ma anche la loro crescente importanza in tutti i settori industriali.

Risulta anche evidente che gli algoritmi di calcolo per la soluzione di questi problemi risulteranno complessi (troppo per essere trattati in poche righe) e potranno variare a seconda del codice di calcolo utilizzato. Tuttavia, vediamo di descrivere i rudimenti di questi algoritmi, le basi sulle quali questi ultimi si basano, sia perché essi sono in buona parte indipendenti dal tipo di non-linearità sia perché l'analista, per impostare consapevolmente un'analisi non lineare, deve sapere le basi per fare delle scelte che influenzeranno l'accuratezza dei risultati che impongono la conoscenza degli aspetti di base, pena la ripetizione dell'analisi.

Per capire come si svolge un'analisi non lineare facciamo riferimento, senza nulla togliere in generalità, a un caso molto semplice, illustrato in figura 2, una molla non lineare, con rigidezza variabile in funzione dell'allungamento subito. Due sono i casi che si possono incontrare: la rigidezza aumenta con l'allungamento (molla incrudente) la rigidezza diminuisce in funzione dello spostamento

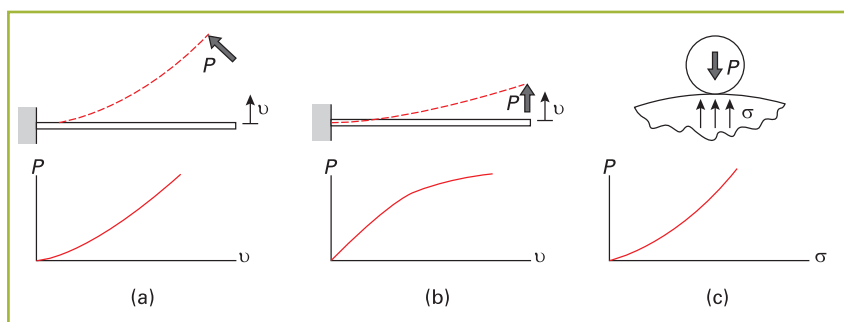


Figura 1 – Tre esempi di analisi non lineari: (a) trave elastica soggetta ad elevati spostamenti, (b) trave elastoplastica, (c) contatto non conforme

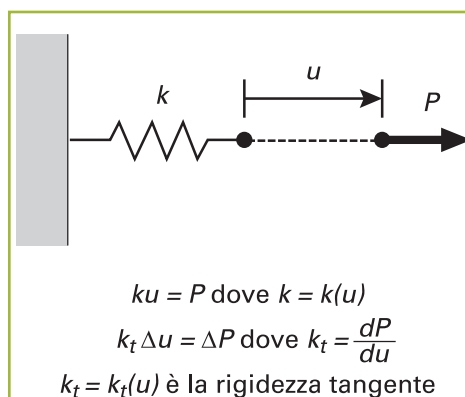


Figura 2 – Molla non lineare con rigidezza k funzione dell'allungamento subito

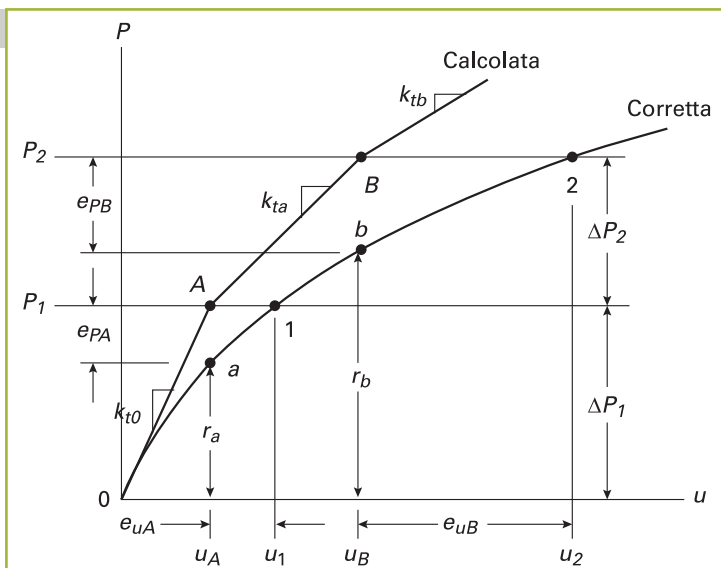


Figura 3 – Legame allungamento-forza non lineare della molla

(molla con caratteristica addolcente). In figura 3 si mostra una caratteristica di questo secondo tipo, alla quale si farà riferimento. Sebbene questo esempio con un grado di libertà sia facile da risolvere in maniera esplicita, nel caso di sistemi più complessi ciò non è possibile ed è necessario risolvere il problema non lineare attraverso una sequenza di passi lineari.

I metodi più utilizzati

I metodi più comunemente utilizzati, almeno nelle analisi dello stato di sforzo (stress analysis), sono i metodi incrementali, che utilizzano la cosiddetta rigidità tangente, che, nel caso del problema a un grado di libertà, è la pendenza della curva P-u nel punto d'interesse. L'analisi parte considerando la pendenza della curva nell'origine e applicando una frazione del carico totale pari a ΔP_1 . Risolvendo un sistema lineare si arriverà a determinare il punto A, le cui coordinate saranno u_A e P_1 . La rigidità tangente in corrispondenza dello spostamento u_A è k_{ta} . Applicando un nuovo incremento di carico ΔP_2 si definisce poi una nuova analisi lineare con pendenza k_{tb} e si arriva al punto B, per il quale sarà possibile definire un nuovo valore della rigidità tangente k_{tb} e così via.

In figura 3 è illustrato il procedimento: nei casi reali la curva corretta P-u è incognita, tuttavia, il grafico rende evidente che il procedimento ora esposto diverge progressivamente dal risultato corretto, in quanto gli spostamenti calcolati u_A e u_B presentano un errore e_{uA} , e_{uB} via via crescente.

Per evitare ciò e riportare l'errore entro valori accettabili e controllabili bisogna introdurre una correzione. Puntando l'attenzione ancora sul punto A, si riconosce che la forza calcolata P_1 è maggiore della reazione esercitata dalla molla, pari a $r_a = k \cdot u_A$. La differenza e_{pA} tra P_1 e r_a ($e_{pA} = P_1 - r_a$) indica che il sistema non è in equilibrio e può essere utilizzata per guidare il risultato verso quello corretto, attraverso alcune iterazioni in cui si procede tenendo il carico P_1 costante (figura 4a). Nella prima iterazione si utilizza k_{ta} e si risolve l'equazione $k_{ta} \Delta u = e_{pA}$. Si aggiunge poi Δu a u_A , ottenendo il punto

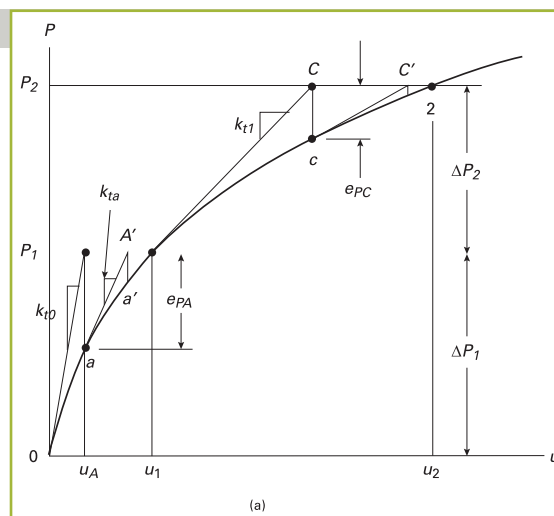
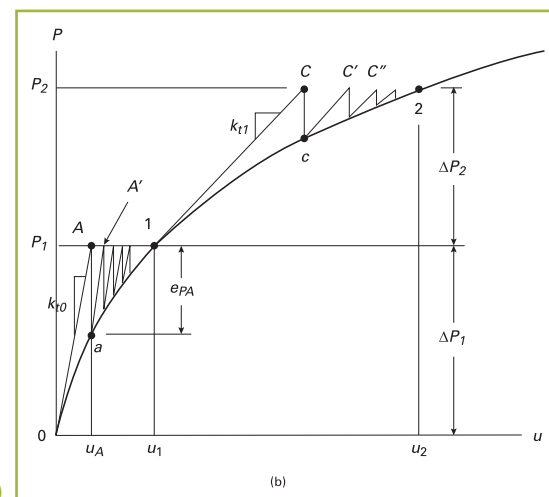


Figura 4 – Soluzioni incrementali con iterazioni di equilibrio dopo ogni step di carico: (a) metodo Newton-Raphson, (b) metodo Newton-Raphson modificato



a' , ancora non in equilibrio seppur in modo meno marcato rispetto al punto A. Ripetendo il procedimento ora descritto, l'errore progressivamente calerà, fino a essere inferiore ad un valore di tolleranza che l'utente può assegnare in fase di definizione del modello (altrimenti il codice di calcolo assegnerà dei valori di default). Quando la tolleranza sarà rispettata sarà possibile applicare un nuovo incremento di carico ΔP_2 e arrivare, quindi, per incrementi successivi e con il procedimento iterativo ora descritto, alla soluzione finale. Il metodo ora descritto, detto di Newton-Raphson, tuttavia, è, nei sistemi con più gradi di libertà, abbastanza costoso in termini di tempo, in quanto richiede la costruzione della matrice di rigidità tangente per ogni iterazione. Per ovviare a questo inconveniente il metodo è stato modificato come in figura 4b. Come si può notare, in questo caso si utilizza la matrice di rigidità tangente che si ha all'inizio dell'incremento che si sta affrontando; il tempo totale di analisi diminuisce, anche se il numero d'iterazioni richieste per arrivare a convergenza aumenta considerevolmente.

Nel caso di strutture con comportamento incrudente si possono applicare le stesse procedure, ma l'analista deve fare attenzione al fatto che il raggiungimento della convergenza dei risultati non è, in questo caso, scontato, e deve assicurarsi degli strumenti che il codice di calcolo possiede per determinare e correggere eventuali instabilità numeriche che potrebbero manifestarsi. ■