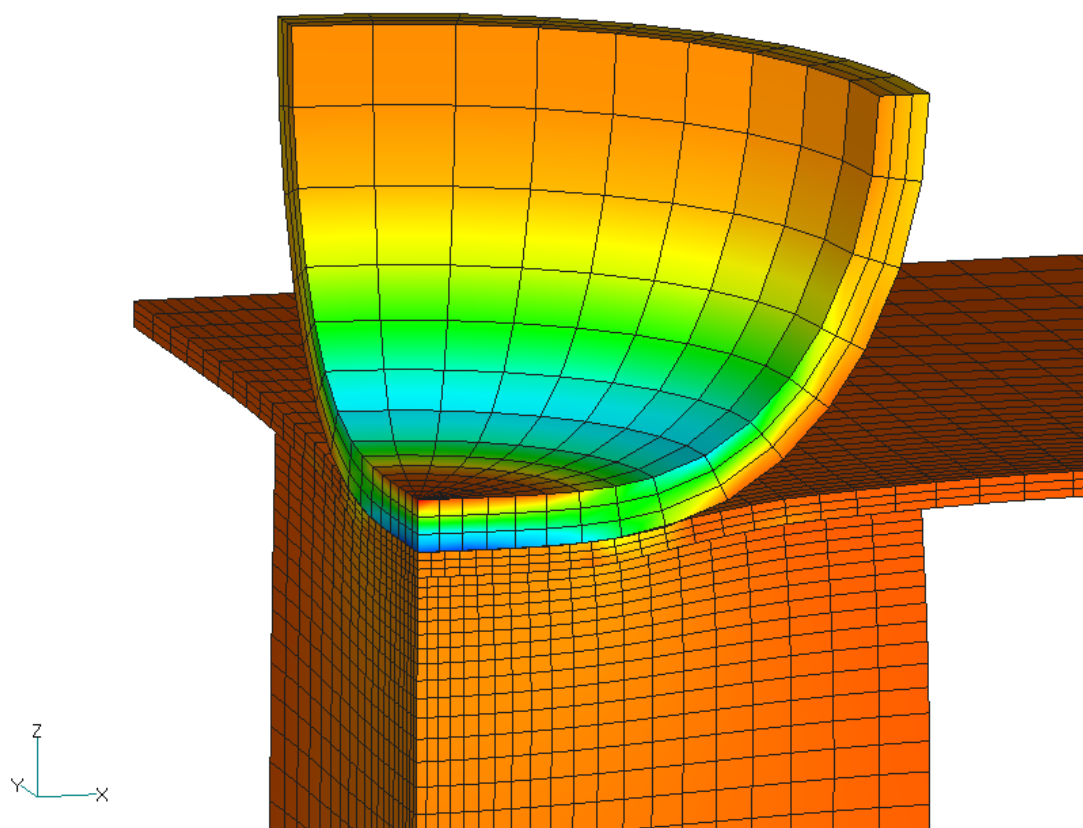


Whitepaper

Quando l'analisi diventa non lineare

Simulare Accuratamente il Comportamento Reale del Progetto



Sommario

Introduzione	3
La modellazione del contatto	4
Le proprietà del contatto.....	5
Quali strumenti ci mette a disposizione il solutore FEM per schematizzare il contatto?	6
Incollaggio vs. Contatto	8
Considerazioni sulla modellazione del contatto	9
Il comportamento non lineare del materiale.....	10
Differenze tra materiale lineare e non lineare	11
Modelli di Materiale Non Lineare	12
Materiale Iperelastico	13
Tipi di curva Stress-Strain	14
Effetto della Temperatura	15
Incrudimento	16
Le non linearità geometriche e i grandi spostamenti	17
Large Displacements.....	18
Follower Forces.....	19
Buckling non lineare	20
Conclusioni	21
Tips & Tricks	22
Chi è SmartCAE.....	25
Ulteriori risorse.....	26
Prova Gratis Femap per 45 giorni	27

Introduzione

La gran parte dei dimensionamenti strutturali vengono ricondotti a calcoli di tipo statico, ovvero verifiche della condizione di equilibrio stazionario tra i carichi esterni e lo stato di deformazione del sistema in esame. L'analisi statica lineare rappresenta il primo gradino nella scala di complessità di una attività di calcolo agli elementi finiti ed è un valido strumento di validazione preliminare.

Spesso però accade che per comprendere a fondo il comportamento di un sistema meccanico e riuscire a coglierne le modalità di collasso, sia necessario tenere in conto di fenomeni che richiedono l'abbandono dell'ipotesi di linearità, come il contatto tra le parti, la plasticizzazione, il post-buckling.

Il calcolo FEM non lineare, pur essendo una disciplina che richiede maggiori attenzioni nella preparazione del modello e software di analisi adeguati, si sta dimostrando una strada sempre più necessaria per portare al massimo grado di accuratezza la prototipazione virtuale di strutture complesse.

Per aiutare i progettisti ad orientarsi sul tema del calcolo FEM non lineare, abbiamo realizzato questo whitepaper nel quale individuiamo i casi più frequenti con cui ci si confronta nelle verifiche strutturali:

La modellazione del contatto. La maggior parte dei prodotti è costituito da assiemi di componenti, che interagiscono tra di loro scambiandosi forze di contatto sulle superfici accoppiate. Riuscire a schematizzare correttamente queste forze risulta essenziale

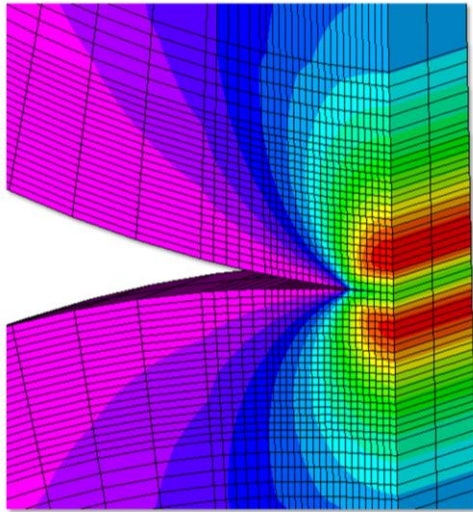
per eseguire il dimensionamento degli organi della macchina.

Il comportamento non lineare del materiale. Spesso capita che l'ipotesi di materiale con caratteristiche elastiche lineari risulti inadeguata per modellare correttamente il fenomeno meccanico che si vuole simulare. Questo può manifestarsi, ad esempio, quando gli stress nei materiali duttili raggiungono e superano la tensione di snervamento e nascono plasticizzazioni, oppure quando il materiale presenta intrinsecamente un comportamento non lineare tra carico applicato e deformazione, come nel caso delle plastiche o delle gomme.

Le non linearità geometriche e gli effetti dei grandi spostamenti. Queste possono manifestarsi quando la configurazione deformata determina uno spostamento dei punti di applicazione del carico, modificando quindi l'intensità o addirittura la direzione delle forze (effetto che in gergo si chiama "follower forces"). Oppure si può manifestare quando un componente tende a irrigidirsi o a rammollirsi sotto l'azione dei carichi (in gergo si parla di "stress-stiffening" e "stress-softening").

Va da sé come, nelle applicazioni generali, questi diversi tipi di non linearità possano manifestarsi simultaneamente nel comportamento meccanico del prodotto. Per questo motivo l'ingegnere deve essere in grado di riconoscerle e di schematizzarle nella maniera più appropriata nel modello FEM.

La modellazione del contatto



Macro : Dinamica del contatto

Intermedia : Stress/Strain, Deformazioni

Micro : Tribologia

Nano : Interazione atomica

Figura 1 – Meccanica del contatto

Il fenomeno del contatto si manifesta molto di frequente nella progettazione meccanica. Di fatto, in un assieme costituito da più parti, queste interagiscono tra loro scambiandosi delle forze sulle superfici di interfaccia. Pertanto si tratta di un fenomeno con il quale il progettista meccanico e l'analista strutturale si confrontano quotidianamente.

La meccanica del contatto con attrito è lo studio della deformazione dei solidi che si toccano in uno o più punti. Le forze che nascono dall'interazione possono essere scomposte in componenti normali all'interfaccia (che possono essere di

compressione o di adesione) e in componenti tangenziali (dovute all'attrito o all'adesione).

Elencando le varie scale a cui può essere affrontato il problema del contatto, a noi interessa quella branca della fisica che si preoccupa di studiare il contatto su scala intermedia, ovvero determinare lo stato di sollecitazione, allungamenti e deformazioni di un sistema di corpi che interagiscono tra loro.

Pertanto le formulazioni matematiche della meccanica del contatto con attrito possono essere introdotte in varia maniera all'interno di un solutore FEM per replicare questo fenomeno attraverso la simulazione.

Le proprietà del contatto

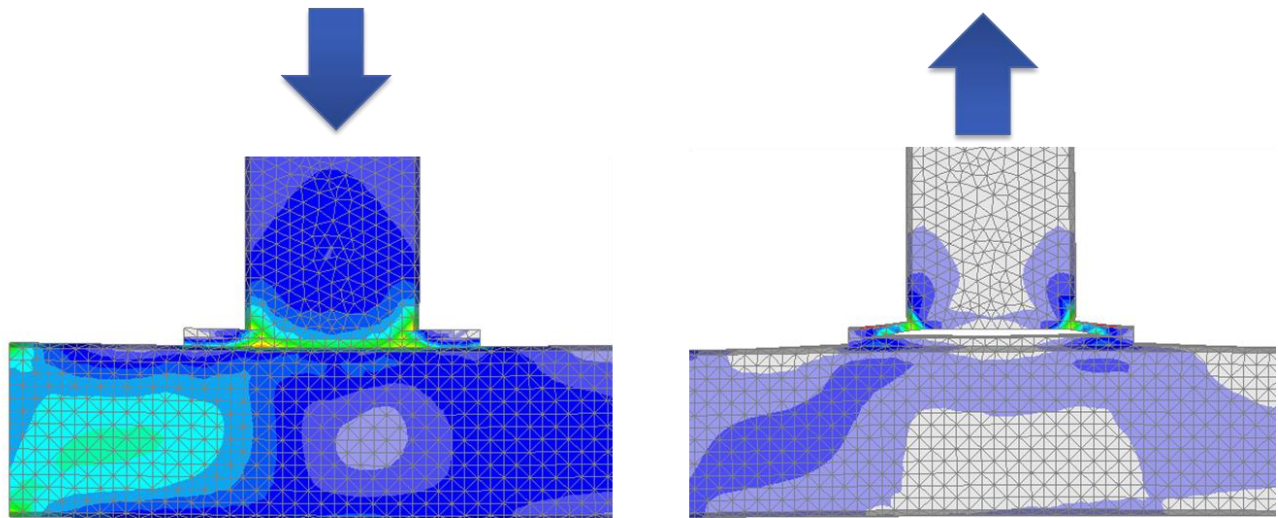


Figura 2 – Relazione Unilatera. Le due immagini mettono in evidenza come si ottengano stati di deformazione e sollecitazione diversi quando la flangia viene sottoposta ad un carico di compressione (sinistra) o di trazione (destra).

La prima proprietà del contatto è quella di essere una relazione **unilatera**, tra i corpi. Con questo termine si indica il fatto che il contatto non lavora alla medesima maniera in tutte le direzioni. In particolare, quando le forze applicate spingono le parti l'una contro l'altra, nascono delle forze di compressione dovute al fatto che i corpi elastici impediscono la compenetrazione. Se però invertiamo la direzione delle forze applicate, i due corpi possono distaccarsi liberamente e non nascono forze di trazione sulla superficie. Il fatto che invertendo il segno della forza viene a mancare la proporzionalità tra carico e deformazione determina l'etichetta di

fenomeno **non lineare** che è stata appiccicata al contatto.

Il secondo concetto intimamente legato al contatto è quello dell'**attrito radente**, ovvero la presenza di forze tangenziali proporzionali alle forze di compressione normali alla superficie, che si oppongono al moto relativo dei corpi nel piano di contatto. Anche questo fenomeno introduce delle non linearità nel sistema.

Per fare le cose al meglio, la modellazione FEM dovrebbe tenere di conto di entrambi questi fenomeni.

Quali strumenti ci mette a disposizione il solutore FEM per schematizzare il contatto?

Elemento	Semplicità Modellazione	Accuratezza	Tempo di Calcolo	Soluzione NX Nastran
Nessuno	+	+	++++	101
Incollaggio	++++	+	+++	101
Contatto Linearizzato	++++	+++	++	101
Gap / Slide Line	+	++	+	106
Contatto Non Lineare	++++	++++	++	401, 601

Figura 3 – Elementi e Formulazioni di contatto disponibili in Femap con NX Nastran

A seconda dell'ambiente di analisi FEM che abbiamo a disposizione, inteso sia come modellatore che come moduli disponibili nel solutore, ci possono essere più strategie per inserire nell'analisi una relazione di contatto tra i corpi.

Nessun elemento di contatto. Il caso più sfortunato è quello in cui il nostro software non possieda alcun elemento specialistico per gestire il contatto. In questo caso contemplo anche l'eventualità in cui l'utente non voglia o non possa utilizzare degli elementi di contatto nel modello. Cito l'esempio delle aziende che operano nel settore spazio le quali devono interfacciarsi con enti come NASA o ESA che impongono ai partner rigide specifiche di modellazione che non prevedono l'utilizzo degli elementi di contatto. Questo viene fatto per evitare problemi di compatibilità del modello con le varie versioni di Nastran. In questo caso l'utente deve rimboccarsi le maniche e utilizzare il modellatore e la libreria di elementi disponibile in maniera creativa.

Incollaggio tra parti con mesh incongruenti. Il secondo caso è quello offerto ormai dalla maggior parte dei software FEM commerciali, specialmente quelli integrati nei

modellatori CAD, ovvero la possibilità di incollare tra di loro la mesh delle parti attraverso la superficie di interfaccia. Questo approccio ingelosisce molto l'utente in quanto si presta alla massima automazione: spesso bastano un paio di click per attaccare insieme tutte le parti di un assieme complesso e avere il modello pronto per girare. Per contro è un approccio approssimativo che non tiene conto delle proprietà del contatto, come vedremo tra breve.

Modellazione lineare del contatto. Il terzo livello di implementazione è dato dall'utilizzo di una formulazione di contatto che funziona nel calcolo statico lineare che prende il nome di contatto linearizzato. In questo caso il solutore ha implementato una procedura che permette di considerare l'interazione di contatto con maggiore precisione rispetto all'incollaggio. Anche questo approccio si basa su mesh incongruenti e la definizione delle coppie di superfici a contatto può essere automatizzata in pochi click. Come l'incollaggio questo approccio funziona quando i corpi sono già in contatto prima dell'applicazione del carico.

Modellazione non lineare del contatto. Si arriva poi all'utilizzo delle soluzioni non lineari

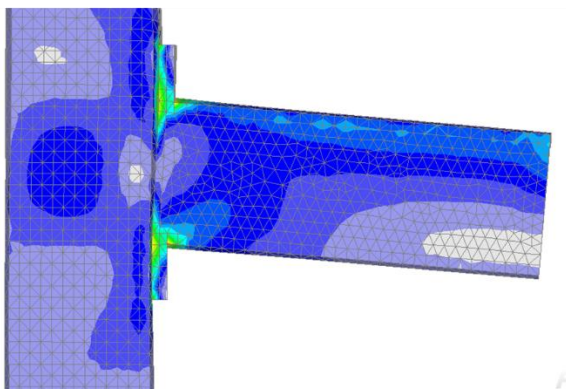
e di elementi specializzati come il GAP e le Slide Line, che storicamente sono la maniera con cui i solutori FEM hanno implementato la formulazione del contatto. Questo tipo di elemento richiede particolare attenzione nella creazione del modello in quanto occorre creare dei collegamenti nodo-nodo (per il GAP) o segmenti di nodi su segmenti di nodi (per le Slide Line) che prevedono la creazione di mesh affacciate tra le due parti, cosa che spesso richiede l'uso di comandi di meshatura manuale. Più recentemente i solutori FEM hanno implementato la formulazione delle superfici di contatto e dell'esecuzione di una procedura di calcolo non-lineare. Questo è l'approccio migliore perché coniuga la semplicità di impostazione con la possibilità di considerare altri effetti non lineari nel modello.

Ad esempio le due superfici di interfaccia potrebbero essere inizialmente non vicine ma entrare in contatto soltanto al raggiungimento di un determinato livello di carico, cosa che non è prevista nel contatto linearizzato.

Giusto per completare il quadro tra i vari approcci, in tabella sono indicati il livello di semplicità della modellazione (correlato al tempo uomo necessario per creare il modello), il livello di precisione in termini di gestione della non linearità, il tempo di calcolo richiesto al solutore per generare i risultati, il codice della soluzione NX Nastran corrispondente per eseguire lo studio.

Incollaggio vs. Contatto

Incollaggio



Contatto

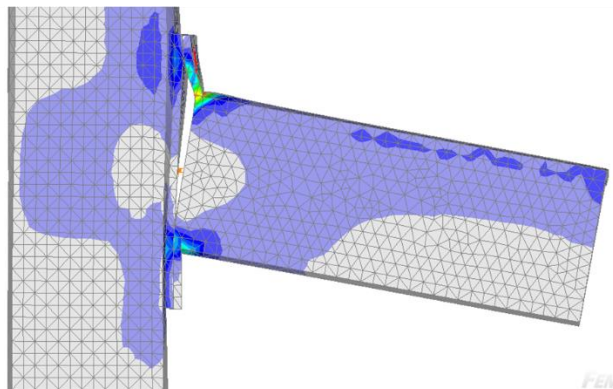


Figura 4 – Incollaggio vs. Contatto. E' evidente come nel caso di esempio l'incollaggio porti a sottostimare sia lo stato di deformazione che lo stress massimo nella flangia.

Uno dei temi ricorrenti nei colloqui con gli utilizzatori dei nostri sistemi è quando convenga utilizzare l'incollaggio, quando il contatto, quando un mix dei due. Non esiste una risposta univoca ma in questa pagina vogliamo provare a fornire dei concetti di base che possono essere di aiuto a identificare la tattica di modellazione migliore per il tuo scopo.

Come abbiamo visto in precedenza, il contatto è una relazione **unilatera**. L'incollaggio invece è una relazione **bilatera** in quanto prevede la perfetta adesione tra le due superfici di interfaccia. Questo vuol dire che, nel caso in cui la configurazione di carico porti al distacco dell'interfaccia, con le superfici incollate questo non può avvenire, portando a valutazioni errate sia nella rigidità che nello

stato di sollecitazione locale della giunzione. Ciò non vuol dire che i risultati ottenuti non siano ingegneristicamente sensati per una rigidità globale del sistema, a patto di andare a verificare a posteriori la presenza bulloni sufficientemente robusti nelle zone che vorrebbero distaccarsi, e di spine per reggere il taglio nelle zone che vorrebbero scorrere tangenzialmente.

Per contro ci sono casi in cui l'utilizzo indiscriminato e non consapevole degli incollaggi per tenere insieme il modello può portare a sovrastimare la rigidità del sistema e a sottostimare lo stato di sollecitazione nei componenti, con tutti i rischi che ne conseguono, come nell'esempio illustrato in Figura 4.

Considerazioni sulla modellazione del contatto

L'incollaggio è uno strumento molto comodo per collegare tra di loro le parti ma, può portare a errori sostanziali nella valutazione della rigidezza e dello stato di sollecitazione dell'assieme, con tutti i rischi che questo comporta.

In prima battuta le formulazioni di contatto linearizzato permettono di introdurre nel modello un primo livello di non-linearità, che tra l'altro si sposa molto bene anche con altri parametri di progetto quali il precarico dei bulloni. Per contro ricordiamoci che si tratta di un approccio approssimato, basato sempre sull'ipotesi delle piccole deformazioni e del materiale lineare. Questo vuol dire, ad esempio, che non posso simulare un fenomeno in cui due corpi che inizialmente

sono distaccati entrano in contatto a causa della deformazione sotto carico, oppure non posso simulare lo scorrimento relativo di un corpo su di un altro, come ad esempio una slitta su un piano. Risulta comunque un ottimo strumento per gestire la maggior parte dei collegamenti meccanici.

Il contatto gestito da una soluzione completamente non lineare è il metodo numericamente più accurato e permette di includere nel modello anche altri fenomeni quali la plasticizzazione o i grandi spostamenti (i due temi che vedremo nei prossimi capitoli). Pertanto permette di elevare il livello di accuratezza del calcolo e aiutare la comprensione del funzionamento del prodotto.

Il comportamento non lineare del materiale

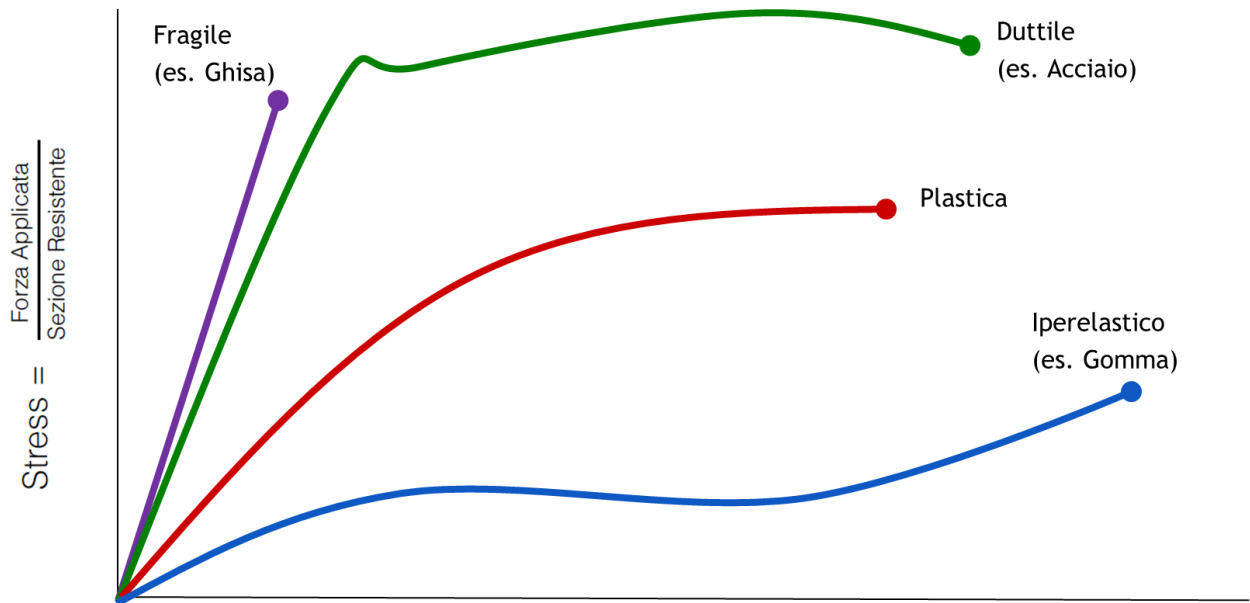


Figura 5 – Vari modelli di materiale non lineare a confronto

Il secondo capo saldo della teoria dell'elasticità lineare è quello di assumere la proporzionalità diretta tra le deformazioni di un corpo e i carichi applicati. Ciò si traduce nella famosa legge di Hooke che si esprime matematicamente il legame tra la forza applicata e l'allungamento.

A parità di forma del componente, l'allungamento dipende dalle caratteristiche del materiale, in particolare dal modulo di elasticità;

Nel grafico di Figura 5 sono rappresentati quattro diversi tipi di materiali.

La curva viola indica un **materiale fragile** (come la ghisa o il vetro), che presenta una

pendenza costante fino al raggiungimento della rottura.

La curva verde mostra l'andamento tipico di un **materiale duttile** (come un acciaio dolce) il quale, una volta superato la lo snervamento, manifesta una deviazione rispetto alla linearità.

La curva rossa mostra qualitativamente l'andamento di un **materiale plastico**.

La curva azzurra mostra il comportamento di una gomma, ovvero di un **materiale iperelastico**. In questo caso l'ipotesi di linearità copre soltanto un tratto molto limitato della curva.

Differenze tra materiale lineare e non lineare

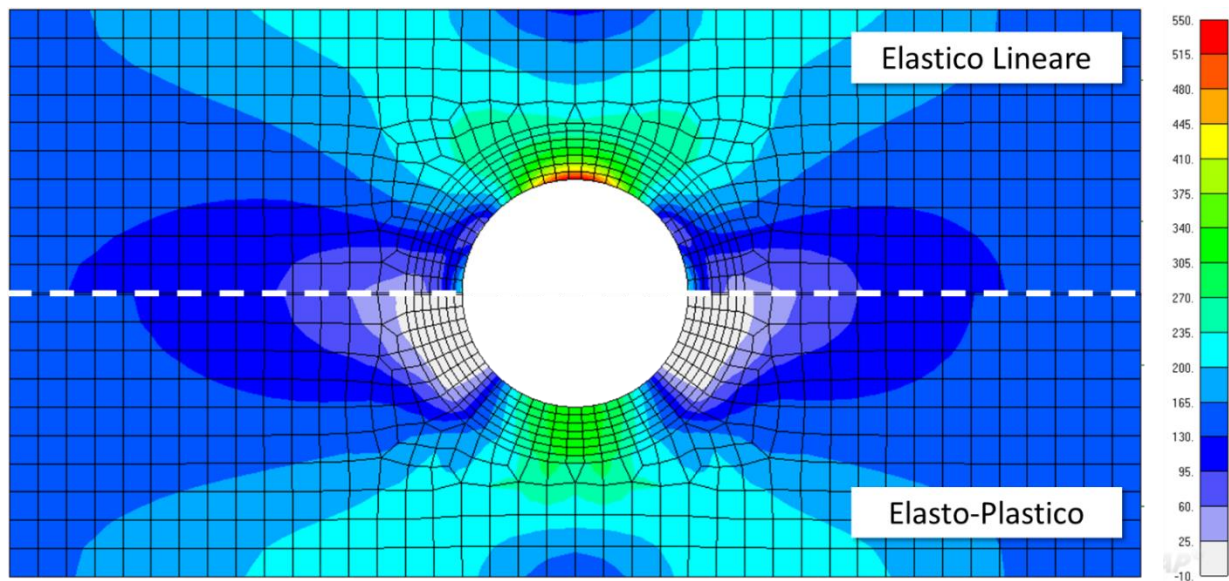


Figura 6 – Confronto dello stato di sollecitazione su una piastra forata tra materiale lineare elastico e materiale elasto-plastico, a parità di carico applicato.

Come già detto, nella maggior parte dei casi, l'ipotesi di linearità è idonea per rappresentare il comportamento del materiale nei calcoli ingegneristici. Un modello di materiale perfettamente lineare è sufficiente per il proporzionamento degli organi meccanici, utilizzando materiali metallici, quando il livello di sollecitazione è inferiore alla tensione di snervamento.

Se però il nostro calcolo lineare produce sollecitazioni che sono più alte rispetto allo snervamento come ci comportiamo? Di solito andiamo ad aumentare spessori e a riprogettare la parte in maniera da riportare lo stress sotto il valore dello snervamento.

In realtà, per un materiale duttile superare lo snervamento ed entrare in campo plastico produce un effetto particolare sullo stato di sollecitazione. Il materiale snervato non è in grado di sostenere ulteriori incrementi di sollecitazioni locali, le quali tenderanno a ridistribuirsi nella zona circostante, tipicamente una zona limitata.

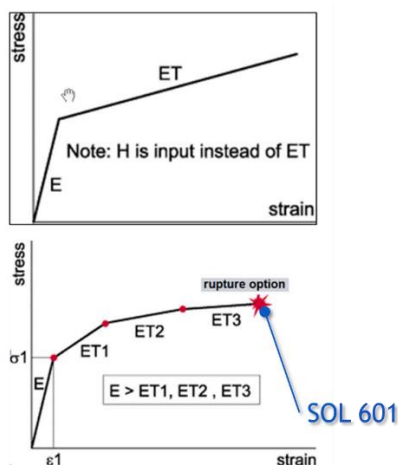
Quando si supera lo snervamento l'effetto quindi non è quello della rottura catastrofica

del componente (cosa che potrebbe anche succedere se i carichi sono elevati), ma la generazione di una deformazione plastica permanente locale, che potrebbe comunque risultare pienamente compatibile con la funzionalità della parte.

Nella Figura 6 si vede il confronto tra due verifiche eseguite sul solito modello, una piastra forata soggetta a un carico di trazione. La parte superiore della figura mostra la verifica con una legge di materiale lineare, la parte inferiore mostra i risultati nell'ipotesi di utilizzare un materiale elasto-plastico.

Come si vede la ridistribuzione delle sollecitazioni a causa dello snervamento del materiale porta il sistema ad uno stato di equilibrio con sollecitazioni molto inferiori rispetto al calcolo lineare elastico, facilitando la verifica. Non a caso, esistono delle normative di riferimento quali le API statunitensi per la verifica delle pompe, o le normative per i recipienti a pressione quali ASME VIII Div. 2 e EN 13445 che prevedono delle procedura di verifica al FEM con modello di materiale elasto-plastico.

Modelli di Materiale Non Lineare



Modello	Dati	Soluzione NX Nastran
Elastico Non-Lineare	Curva Stress-Strain	106, 601
Elasto-Plastico (Bilineare)	Snervamento, H	106, 601
Elasto-Plastico	Curva Stress-Strain	106, 601
Elasto-Plastico (large strain)	Curva Stress-Strain	601
Iperelastico	Coefficienti	106, 601

Figura 7 – Modelli di materiale non lineare disponibili in Femap con NX Nastran

Mettiamo in evidenza alcuni tipi di materiale che comunemente vengono modellati al FEM.

Elastico Non-Lineare, ovvero il materiale non plasticizza, ma segue una curva sperimentale che viene inserita nel modello come una serie di punti.

Materiale Elasto-Plastico. Di questo tipo di modello esistono varie formulazioni:

Modello Bilineare nel quale il materiale, dopo lo snervamento, presenta una pendenza molto più bassa di quella del tratto lineare.

Modello Elasto-Plastico nel quale la curva stress-strain viene inserita **per punti**.

Modello Large Strain. Vedremo con maggiore attenzione questo tipo di modello tra nelle prossime pagine.

Materiale Iperelastico. Oltre ai modelli di materiale elastico non-lineare, è possibile modellare il comportamento di materiali con comportamento completamente non-lineare come i materiali iperelastici, utilizzati per modellare le gomme.

La tabella illustra come queste funzioni sono disponibili nei vari solver non-lineari di NX Nastran. In particolare la SOL601, Advanced Non Linear permette di introdurre nel modello anche lo stress di rottura del materiale, per simulare gli eventi post-rottura.

Materiale Iperelastico

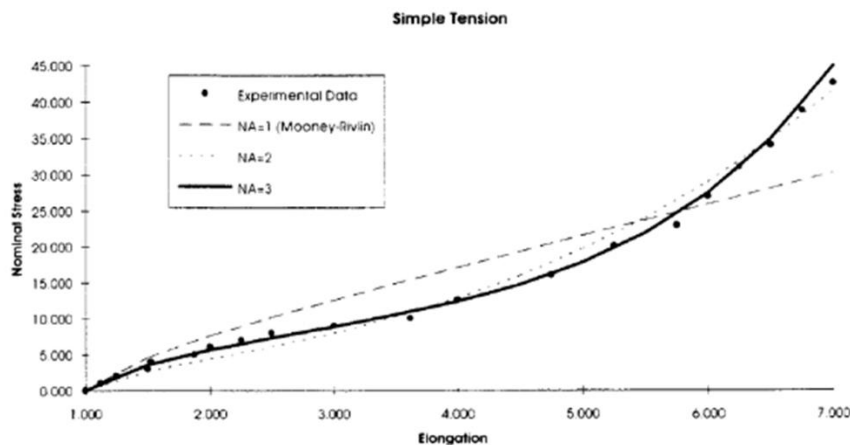


Figura 8 – Dati sperimentali di un materiale iperelastico e curve-fit con NX Nastran.

Senza scendere troppo nel dettaglio, apriamo una parentesi che riguarda i materiali iperelastici. Questi materiali vengono modellati con una formulazione basata su coefficienti determinati attraverso prove sperimentali.

Nel caso in cui si abbia a disposizione la curva stress-strain della prova, NX Nastran offre la possibilità di determinare internamente i

coefficienti del materiale, effettuando un best-fit della curva sperimentale. A titolo di esempio in Figura 8 è riportata un diagramma estratto dal manuale della teoria di NX Nastran che illustra la curva del materiale interpolata attraverso una serie di punti misurati sperimentalmente.

Tipi di curva Stress-Strain

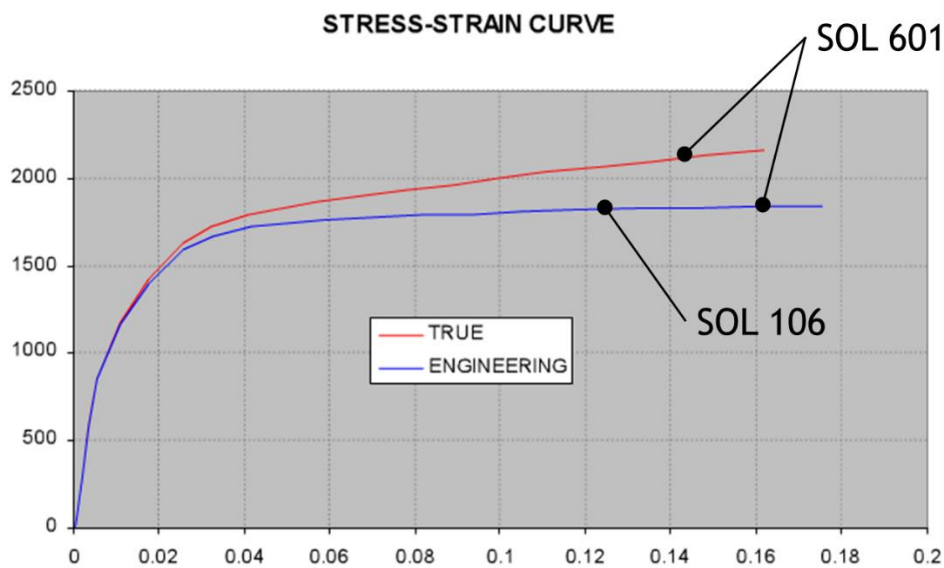


Figura 9 – Confronto tra curva Stress-Strain Ingegneristica e curva True Stress-True Strain.

Nelle ipotesi lineari, gli stress vengono calcolati riferendosi alla configurazione indeformata. Si parla di Small Displacements e Small Strain, ovvero sia le deformate che gli allungamenti sono piccoli. In questo caso la curva del materiale prende il nome di Curva Stress Strain Ingegneristica. È la curva blu nel diagramma di Figura 9 e risulta una approssimazione accettabile per una gran quantità di casi applicativi.

Nella realtà il legame tra stress e strain è quello rappresentato dalla curva rossa, che prende il nome di curva True Stress-True Strain.

Le due curve sono quasi sovrapposte soltanto nel primo tratto, fino a circa il 2% di allungamento, dopo differiscono e non poco.

Pertanto se ho a che fare con plasticizzazioni limitate, la curva ingegneristica può bastare.

Se però voglio spingermi su plasticizzazioni estese, come ad esempio per simulare un processo di formatura o arrivare al necking nella prova di trazione (come nella foto del provino sulla destra), devo per forza di cose utilizzare la curva rossa.

Effetto della Temperatura

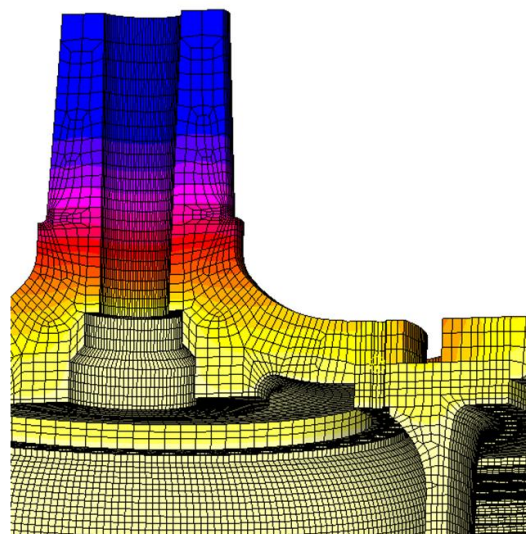
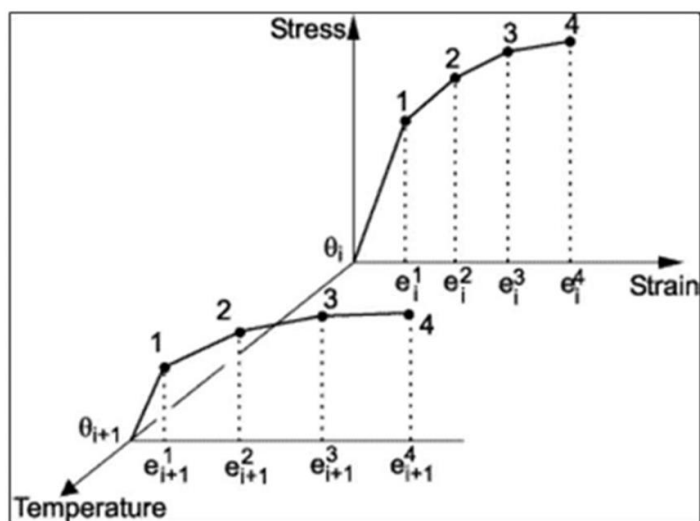


Figura 10 – Definizione di curve Stress-Strain al variare della temperatura.

Come sappiamo, le caratteristiche del materiale non dipendono soltanto dallo stato di sollecitazione ma anche dalla temperatura, che ha l'effetto di rammollire il materiale. Al crescere della temperatura si abbassano sia il modulo di elasticità che la tensione di snervamento.

Nel calcolo è possibile impostare anche la dipendenza delle caratteristiche del materiale dalla temperatura, definendo una curva

Stress-Strain diversa per ogni valore di temperatura. E' il solutore Nastran che si occupa di determinare il valore corretto delle proprietà del materiale in base allo stato di sollecitazione e alla temperatura.

Pertanto è possibile eseguire simulazioni nelle quali si determina lo stato di sollecitazione del materiale soggetto anche ai carichi termici e a distribuzioni di temperatura non omogenee nel materiale.

Incrudimento

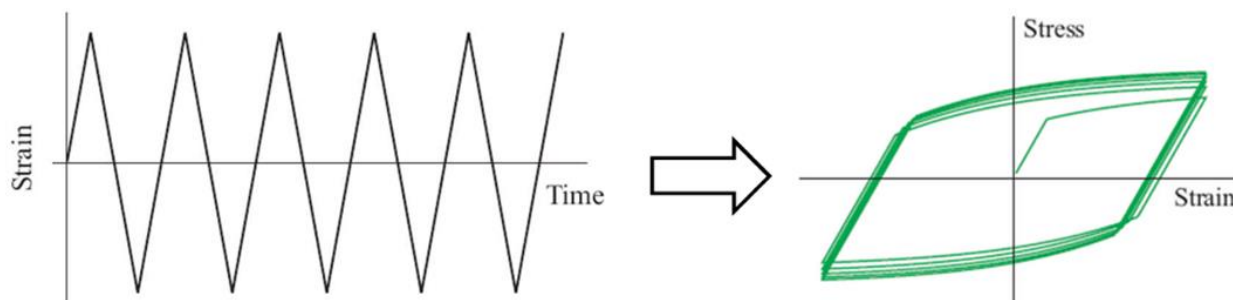


Figura 11 – L'azione di carichi ciclici in campo plastico generano il fenomeno dell'incrudimento e del ratcheting.

Un componente sottoposto a carichi ripetuti che portano alla plasticizzazione ciclica, tendono a modificare il comportamento elasto-plastico del componente. Sperimentalmente si verificano fenomeni come l'isteresi e l'effetto Bauschinger. Per tenerne di conto nel calcolo FEM occorre utilizzare un modello di incrudimento.

Nella SOL 106 di NX Nastran sono supportati 3 modelli di incrudimento:

Isotropo ovvero che aumenta la superficie dello snervamento omoteticamente.

Cinematico, ovvero che trasla la superficie di snervamento senza aumentarla.

Misto isotropo + cinematico, ovvero una combinazione di entrambi i precedenti.

Nella SOL 601 sono disponibili anche altri modelli di plasticizzazione ciclica più sofisticati, che permettono l'esecuzione di calcoli più raffinati. Lo scopo ultimo, in ogni caso, è comunque quello di riuscire a simulare come evolve la deformazione plastica di un componente soggetto a carichi ciclici, come nel caso del ratcheting.

Le non linearità geometriche e i grandi spostamenti

La terza ipotesi alla base del calcolo lineare è quella dei piccoli spostamenti, secondo la quale il calcolo delle sollecitazioni avviene sulla geometria della configurazione indeformata. Può succedere che questa ipotesi non venga verificata nella realtà e quindi occorre introdurre nel modello gli effetti dei grandi spostamenti. Questo succede nei seguenti casi:

Large Displacements, quando la deformazione sposta il punto di applicazione del carico rispetto alla configurazione indeformata.

Follower Forces, quando la deformazione modifica la direzione del carico rispetto alla configurazione indeformata.

Stress Stiffening & Softening. In generale lo stato di sollecitazione introduce sempre un

effetto di irrigidimento (stress stiffening) o di rammollimento (stress softening). Ad esempio la corda di una chitarra è un caso di stress stiffening in quanto aumenta la sua rigidità flessionale a causa dello stato di trazione. Una analisi FEM non lineare permette di considerare l'incremento o la riduzione di rigidità dovuta allo stato di sollecitazione.

Buckling non lineare. Lo stress softening si può manifestare ad esempio con l'instabilità elastica e il Buckling prodotto da uno stato di compressione. Oltre il collasso della struttura, può darsi che questa comunque riesca a trovare una nuova configurazione di equilibrio in grado di sostenere anche carichi di maggiore intensità. In questo caso i fenomeni prendono vari nomi in base alla storia di carico: in generale si parla di Post Buckling, di Snap-Through, o di Snap-Back, ...

Large Displacements

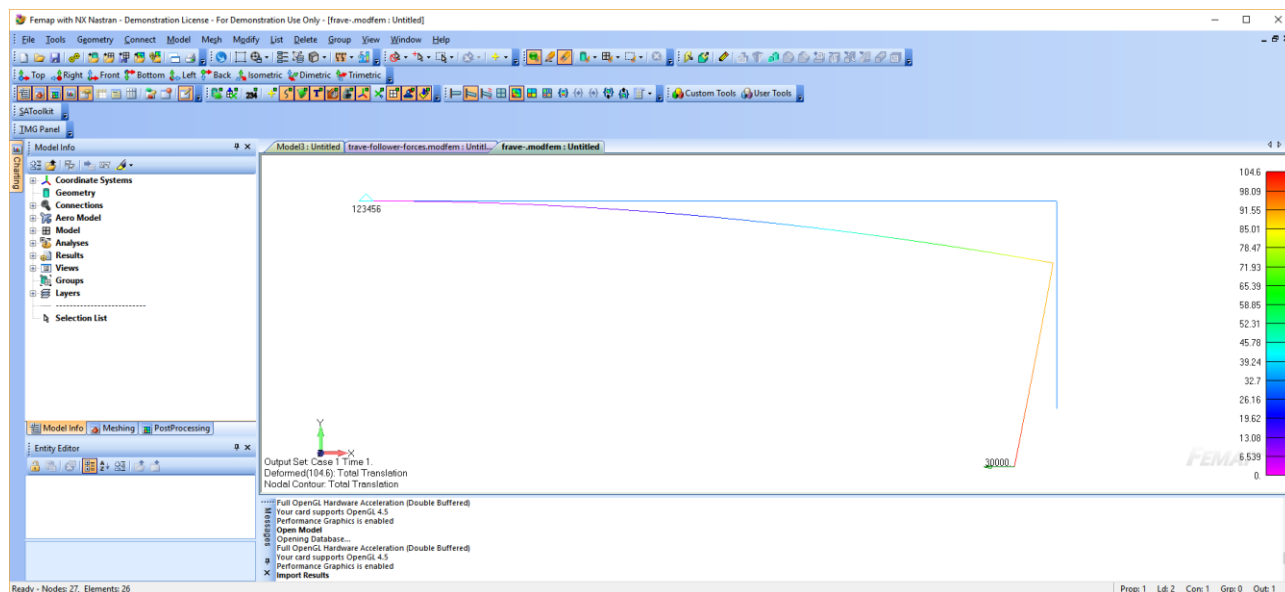


Figura 12 – La trave in figura è soggetta agli effetti non lineari dei large displacements in quanto il punto di applicazione del carico si abbassa, aumentando il momento all'incastro rispetto al calcolo lineare.

Facciamo un caso molto semplice, una trave a mensola con un carico di flessione e compressione all'estremità.

La trave è lunga un metro, il punto di applicazione del carico è spostato di 300mm rispetto all'asse della mensola, la sezione resistente è un tubo quadro 50x50 spessore 5mm, il carico sono 30kN applicati come in figura.

La deformazione è quella in figura. Si apprezza come il punto di applicazione del carico si sia spostato, aumentando braccio del carico rispetto al vincolo di incastro. Se

analizzando la medesima trave con un calcolo non lineare attivando le non linearità geometriche, otteniamo un risultato simile ma quantitativamente diverso.

Lo spostamento del punto di applicazione del carico è maggiore rispetto a quello prodotto dal calcolo lineare passando da 88mm a quasi 105mm (+19%), e le sollecitazioni crescono da circa 765MPa a 971MPa (+27%).

Ci si rende subito conto che, in questo contesto, l'utilizzo di un calcolo lineare porta a sottostimare deformate e sollecitazioni, con implicazioni dolorose sul progetto.

Follower Forces

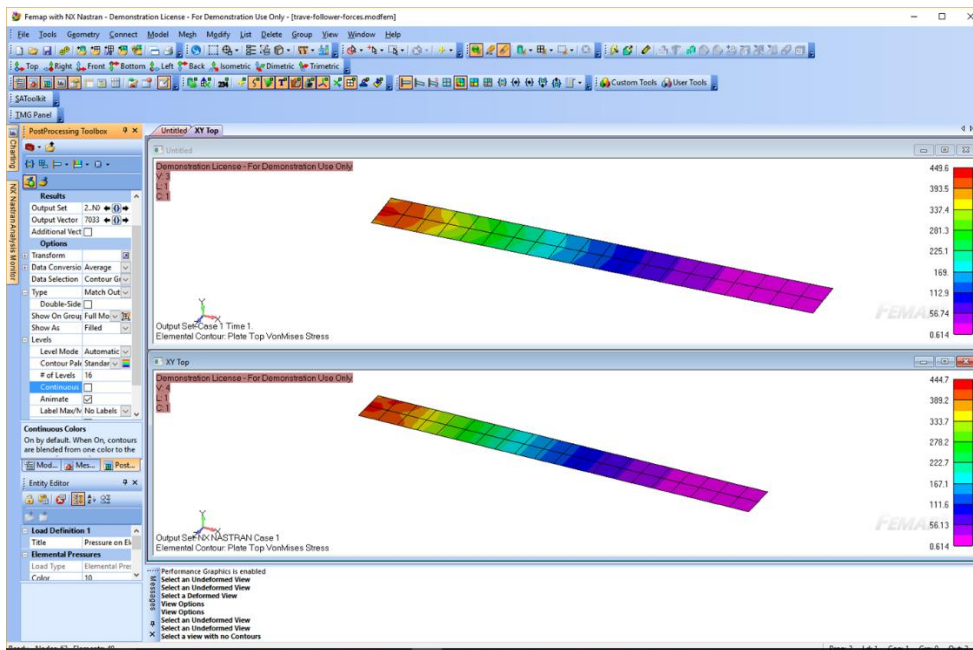


Figura 13 – Trave soggetta a un carico di pressione uniforme che manifesta il fenomeno delle follower forces.

Prendiamo una mensola, stavolta soggetta a un carico di pressione uniforme. Anche in questo caso, il calcolo lineare ci dà una risposta calcolata con l'ipotesi dei piccoli spostamenti.

Nella realtà, siccome la pressione è un carico ortogonale alla superficie, se la superficie si deforma cambia anche la direzione delle forze locali e, in definitiva, le forze risultanti sul sistema.

Infatti se andiamo a vedere la deformata, per prima cosa ci accorgiamo che il calcolo lineare non considera un effetto del second'ordine come lo spostamento dell'estremità della

mensola in direzione assiale, che è invece catturato dal calcolo non lineare.

Inoltre la rotazione degli elementi all'estremità comporta una rotazione delle forze che agiscono su questi elementi, modificando il momento risultante all'incastro, determinando uno stato di sollecitazione leggermente più basso.

In questo caso specifico è meno evidente l'impatto delle follower forces, in quanto le variazioni rispetto al caso lineare sono minime. L'esempio ci ha comunque aiutato a inquadrare il fenomeno.

Buckling non lineare

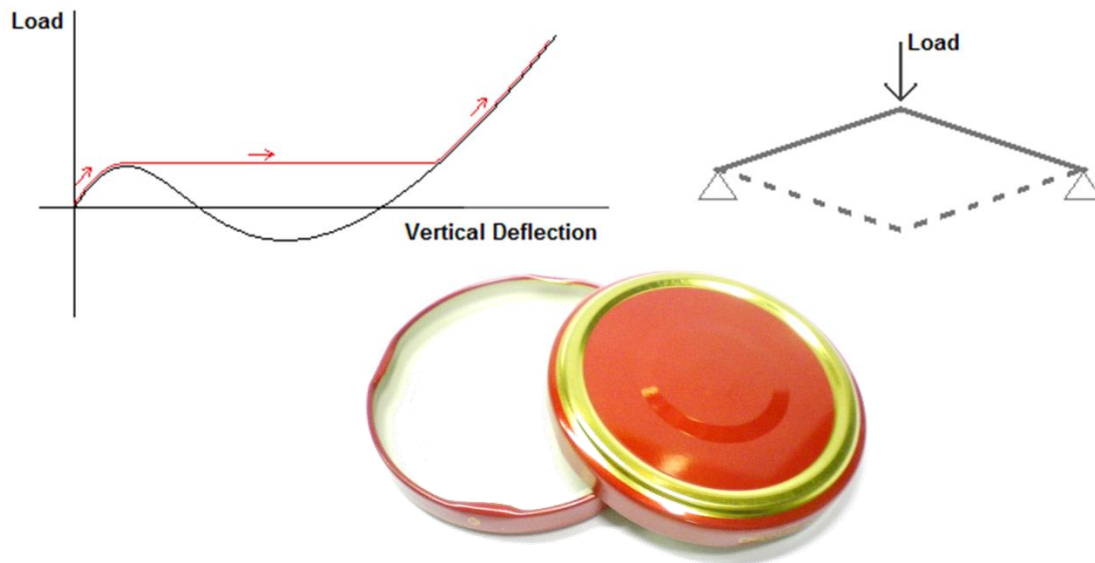


Figura 14 – Andamento della curva carico-spostamento per un sistema che manifesta il fenomeno dello snap-thru.

Il terzo fenomeno (o per meglio dire classe di fenomeni) di non linearità geometriche sono quelli che contemplano l'instabilità elastica del sistema.

Questa instabilità può essere sia di tipo catastrofico, come nel caso del carico di punta. Nel carico di punta di una trave, dopo aver superato il carico limite di instabilità, la struttura non è più in grado di sostenere incrementi di carico e collassa.

Esistono però anche altri casi in cui, dopo aver superato il limite, il sistema raggiunge una nuova configurazione di equilibrio stabile. Si parla in questo caso di simulare i fenomeni che avvengono durante e dopo il buckling. L'etichetta che appiccichiamo al fenomeno è Post Buckling.

All'interno del Post Buckling poi ci sono varie categorie.

In Figura 14 si vede un esempio di Snap-Thru. La struttura è costituita da due aste, incernierate al vertice e soggette a un carico verticale. La curva nera rappresenta l'andamento del legame tra carico e spostamento del punto di applicazione della forza, con deformazione imposta. Si apprezza

che, all'aumentare della deflessione, la curva presenta tratti con pendenza (rigidezza) negativa.

La curva rossa invece rappresenta il comportamento effettivo della struttura all'aumentare del carico.

Quando il carico raggiunge il limite di elasticità, il punto di applicazione del carico si sposta di scatto su un nuovo tratto a rigidezza positiva (che si trova al di sotto dei vincoli) e di lì riesce a sopportare ulteriori incrementi di carico. Questo fenomeno prende appunto il nome di Snap-Thru. La nuova configurazione geometrica è un punto di equilibrio stabile, in quanto se rimuovo il carico, il punto rimane in quiete.

Un altro caso, che conosciamo tutti, è quello della capsula delle conserve. Se premiamo il pulsante sulla capsula, si crea una situazione simile alla precedente: per un carico molto basso si sente il click dello Snap-Thru e il raggiungimento di una nuova condizione di equilibrio. Stavolta però, rimuovendo il carico, il sistema di forze interne tende a riportare nella posizione iniziale il pulsante e si parla di Snap-Back.

Conclusioni

In questo documento abbiamo provato a fare un po' di chiarezza sulle principali sfide offerte dalla modellazione non lineare dei fenomeni strutturali.

Abbiamo visto come la linea di demarcazione tra fenomeni lineari e non lineari sia molto sottile e come spesso il progettista debba decidere autonomamente quale dei due approcci utilizzare nella realizzazione di un modello ad elementi finiti.

In prima battuta, la soluzione più immediata sarebbe quella di eseguire sia la verifica lineare che quella non lineare, e comparare i risultati. Questo non solo aiuta a comprendere meglio il comportamento dei componenti, ma può servire a rivelare delle non linearità che non erano state inizialmente previste e che possono condurre ad una soluzione costruttiva più sicura ed ottimizzata. Spesso,

però questo approccio risulta troppo oneroso in termini di tempi di calcolo e si preferisce eseguire un calcolo non lineare soltanto quando è effettivamente necessario.

Nelle analisi agli elementi finiti è stato definito un insieme di criteri standardizzati con i quali è possibile comprendere se gli effetti di non linearità debbano essere considerati per un particolare modello. Quando uno o più di questi criteri è verificato, diventa necessaria un'analisi non lineare per simulare accuratamente il comportamento reale del progetto.

Si è visto che gli effetti delle non linearità possono essere raggruppati in tre diverse sottocategorie: problemi di contatto, effetti dovuti alle non linearità del materiale, fenomeni dovuti ai grandi spostamenti.

Tips & Tricks

In questo capitolo abbiamo raccolto una serie di domande che ci hanno sottoposto nel corso degli anni i nostri clienti e che pensiamo possano esserti di aiuto nel definire la migliore strategia di modellazione FEM per il calcolo non lineare.

Che differenza c'è tra contatto lineare e contatto non-lineare?

Il contatto lineare o linearizzato è una procedura che viene eseguita dal solutore lineare, per identificare l'effettiva «impronta» delle superfici a contatto. Esegue delle iterazioni nelle quali viene verificata l'attivazione degli elementi di contatto (localmente le mesh si aprono o si chiudono). Una volta stabilizzata l'impronta, viene restituito lo stato di deformazione, gli stress e gli altri risultati. Nel contatto lineare un prerequisito è quello di avere i corpi in contatto fino dall'inizio della simulazione.

Il contatto non-lineare in realtà è una vera e propria procedura non-lineare che verifica oltre all'attivazione delle forze di contatto, la convergenza del lavoro, delle forze interne e del campo di spostamenti del modello, risultando molto più robusta da un punto di vista numerico. Inoltre nell'analisi non-lineare, posso introdurre altri effetti che possono influenzare la risposta, anche nella zona del contatto. Nel contatto non lineare non è necessario che i corpi siano inizialmente a contatto, ma possono entrare in contatto nel corso della simulazione.

Che modelli di attrito si possono utilizzare?

Nel contatto linearizzato è possibile utilizzare soltanto un coefficiente di attrito Coulombiano, che introduce una forza ortogonale all'interfaccia, opposta alla direzione del carico tangenziale. Questo valore è costante e non prevede il distacco tra le parti.

Nel calcolo non-lineare è possibile utilizzare modelli più sofisticati, che prevedano ad esempio coefficienti diversi per condizioni statiche (attrito di primo distacco) e dinamiche (attrito in funzione della velocità relativa tra le due superfici).

Se si usa l'incollaggio, i risultati sono accurati?

Come abbiamo visto, l'incollaggio potrebbe portare a stime errate della distribuzione di stress locali e nella valutazione della cedevolezza del giunto. Se sei confidente di riuscire a realizzare un collegamento perfetto tra le due parti, l'incollaggio allora è una approssimazione accettabile.

Se però esiste il fondato sospetto che la deformabilità locale della flangia non debba essere trascurata, allora conviene effettuare una verifica con il contatto.

So che nel contatto si parla di «master» e «slave». Cosa si intende? C'è un criterio per scegliere?

Nella definizione del contatto è prevista la creazione di un legame tra due superfici. Una chiamata Master (o Target) che fornisce i nodi degli elementi affacciati, e l'altra chiamata Slave (o Source) che fornisce le facce degli elementi che non devono essere compenetrati. L'algoritmo verifica che i nodi del Master non compenetrino le facce dello Slave. Nel contatto linearizzato, l'algoritmo crea un contatto di tipo simmetrico (ovvero le due superfici sono contemporaneamente

Master e Slave). Nel contatto non-lineare l'algoritmo crea un legame di tipo asimmetrico (ovvero viene verificata la compenetrazione soltanto di una superficie attraverso l'altra). Per creare un contatto simmetrico è sufficiente creare una seconda relazione di contatto, invertendo Master e Slave. Non è indispensabile farlo, in quanto generalmente i risultati sono accurati anche con il contatto asimmetrico.

So che i problemi di contatto possono dare difficoltà di convergenza. Come si comporta NX Nastran? Ci sono dei parametri per gestire queste cose?

E' vero, se il modello non è creato bene (mesh grossolana, configurazione geometrica che crea instabilità, ...) può essere difficile ottenere il risultato. Fortunatamente sia per il contatto linearizzato che per quello non-lineare ci sono dei parametri che permettono di aiutare il solutore a convergere. Un parametro del contatto linearizzato è il numero di iterazioni massimo con cui il solutore «congela» l'impronta del contatto. Se la soluzione è instabile, posso forzare il solver a

congelare l'impronta dopo poche iterazioni per vedere che cosa sta succedendo. Nella soluzione non-lineare si hanno a disposizione più controlli, come la possibilità di applicare il carico gradualmente, alzare la soglia di convergenza per il contatto, o introdurre nel modello una rigidità molto piccola per eliminare eventuali labilità nelle primissime iterazioni di applicazione del carico, rigidità che progressivamente viene rimossa mano a mano che il carico viene incrementato.

Si può utilizzare il contatto anche per simulare casi di forzamento (interferenza)?

Sì, il contatto può essere utilizzato anche per simulare il forzamento. Ci sono varie tecniche per farlo, giocando con la dilatazione termica tra le due mesh, o utilizzando il parametro di

offset delle superfici di contatto per introdurre il forzamento, o creando le due parti nella dimensione nominale (quindi con la compenetrazione geometrica delle due mesh).

Come si introduce il precarico dei bulloni nel FEM?

Con Femap e NX Nastran è una procedura molto semplice in tre passi. Per prima cosa si creano degli elementi di tipo BEAM con la sezione resistente della vite. Successivamente questi elementi vengono raggruppati come Connector di tipo BOLT. Infine nel subcase di analisi si definisce un carico di tipo BOLT PRELOAD con il valore del precarico da applicare.

Quando si lancia l'analisi, il solutore (sia lineare che non-lineare) esegue un primo STEP 0 di analisi per calibrare lo stato di trazione delle viti e, nel caso, determinare l'impronta del contatto sotto precarico. Su questo STEP 0 viene successivamente applicato il carico ed eseguita l'analisi.

Quanto è influente la mesh nel calcolo elasto-plastico?

La mesh influenza molto il risultato della simulazione con materiale elasto-plastico. Partiamo dal presupposto che lo stato di plasticizzazione è un attributo di elemento. Pertanto la forma della mesh, la sua densità, la sua regolarità nella zona in cui si manifestano i picchi di sollecitazione influenzano e non poco la risposta del

modello. Per assurdo, se l'elemento ha un volume troppo grande rispetto alla zona del picco dello stress, potrei non riuscire a catturare fedelmente lo stato di plasticizzazione. Pertanto una mesh regolare, con la giusta discretizzazione nella zona di plasticizzazione è fondamentale per ottenere una risposta accurata.

Riesco a effettuare una simulazione di stampaggio lamiera con Femap e NX Nastran?

Premesso che le simulazioni di processo sono molto complesse, ed esistono software di simulazione specifici per questo tipo di analisi, la risposta è affermativa, a patto di utilizzare il modulo Advanced Non Linear. Se il processo avviene a bassa velocità e gli effetti dinamici possono essere trascurati (es. velocità di

deformazione) allora posso utilizzare il solutore implicito e la SOL 601 per una simulazione statica non-lineare. Se invece gli effetti dinamici sono preponderanti (ad esempio uno stampaggio ad alta velocità) devo utilizzare il solutore esplicito e la SOL 701.

Nel materiale bilineare posso ipotizzare un materiale perfettamente plastico?

Nel modello di materiale bilineare posso ipotizzare un modulo di elasticità tangenziale

molto basso, quasi nullo, in maniera da schematizzare un materiale perfettamente

plastico. In questo caso, l'elemento snervato non è in grado di sostenere carichi ulteriori in quanto il suo grafico stress-strain è praticamente piatto. Tutte le forze si ridistribuiscono sugli elementi adiacenti, che potrebbero snervarsi a loro volta. Pertanto, se si può passare il termine, questo è un approccio «cautelativo» in quanto trascura il fatto che il materiale ha comunque un comportamento elastico oltre lo snervamento.

Questo porta a sovrastimare la zona plasticizzata. Usando un modulo di elasticità tangenziale post-snervamento o utilizzando una curva stress-strain, implica che gli elementi possano sostenere una sollecitazione maggiore dello snervamento, seguendo appunto la curva (una retta in un caso, una serie di spezzate nell'altro) e quindi porta a contenere la zona di plasticizzazione.

Quale modello di incrudimento conviene utilizzare?

Il tipo di formulazione dipende dal tipo di problema da studiare. Quello che capita di utilizzare più frequentemente è quello isotropo in quanto nei modelli capita di dover gestire soltanto una fase di plasticizzazione sotto carico ed eventualmente lo scarico successivo.

Nel caso in cui debba essere modellata la plasticizzazione di un componente sottoposto a carichi ciclici, conviene effettuare uno studio di convergenza utilizzando alternativamente due diversi modelli di incrudimento per determinare quello più «cautelativo» per la verifica, e poi utilizzare quello.

Posso utilizzare tutti gli elementi di Nastran per le analisi con i large displacements?

La risposta è NO! Non tutti gli elementi della libreria di Nastran supportano le analisi geometricamente non-lineari. Ci sono elementi come le BAR, oppure gli elementi cinematici come gli RBE2 e RBE3 che non adattano la propria matrice durante l'analisi, pertanto possono portare a errori perché Nastran comunque esegue il calcolo, utilizzando l'elemento lineare per quei gradi di libertà. Se quell'RBE2 è utilizzato per

applicare il carico o uno spostamento imposto nell'analisi geometricamente non lineare, si commette un errore. Occorre sostituire gli elementi RBE con degli elementi non lineari (come ad esempio le BEAM) a cui si assegna una caratteristica molto rigida per svolgere il compito. A parte queste eccezioni, gli altri elementi strutturali quali BEAM, SHELL e SOLIDI e anche gli elementi BUSH supportano i large displacements.

Posso combinare le non linearità geometriche con altri tipi di non linearità?

La risposta è sì, per il solutore NX Nastran, l'analisi non-lineare comprende tutte le non linearità. Dipende poi da come è stato creato il modello a determinare quali non linearità sono presenti.

Se abbiamo inserito nel modello degli elementi di contatto, questi si attiveranno per la determinazione delle forze di interazione tra i corpi.

Se viene definita una curva di materiale elastico non lineare o elasto-plastico, la simulazione varierà le proprietà degli elementi seguendo la curva imposta.

Se nel modello ci sono parti geometricamente non lineari, il calcolo ne terrà conto... a meno che non dica di escludere proprio i large displacements attraverso il parametro LGDISP.

Chi è SmartCAE



SmartCAE nasce nel 2002 con l'obiettivo di fornire nel mercato italiano "soluzioni" CAE, intese come combinazione di prodotti software allo stato dell'arte, formazione e servizi di consulenza. Fin dall'inizio l'obiettivo di SmartCAE è stato quello di offrire ai propri clienti soluzioni ingegneristiche di eccellenza, ovvero una combinazione tra software allo stato dell'arte, formazione e servizi di consulenza svolti da personale qualificato. Questa scelta improntata sull'innovazione e sulla qualità si è rivelata vincente. Al giorno d'oggi SmartCAE ha svolto oltre 1000 progetti

per oltre 150 clienti in Italia e nel Mondo, mettendo a loro disposizione oltre 60 anni-uomo di esperienza nel campo della simulazione e un portafoglio di software di indiscusso valore. Per questi motivi SmartCAE è diventata il fornitore di tecnologia CAE di Aziende Leader, nei principali settori industriali. Le aree di competenza comprendono calcolo FEM, analisi dinamica multi-corpo, ottimizzazione strutturale, correlazione CAE-test, con significative applicazioni nei settori automotive, marino, aeronautico, difesa, industriale.

Certificazioni

Per garantire il miglior servizio possibile ai propri clienti, SmartCAE ha ottenuto dal prestigioso DNV-GL la certificazione di qualità ISO 9001:2008 con il seguente oggetto di attività: "Erogazione di Servizi di Sperimentazione Virtuale Applicata all'Ingegneria (CAE)". La politica di gestione per la qualità costituisce una ulteriore garanzia dell'orientamento di SmartCAE alla soddisfazione dei propri clienti, ed al miglioramento continuo.



Ulteriori risorse

Webinar

Visita la nostra raccolta di webinar gratuiti sulla modellazione ad elementi finiti e la simulazione CAE.

www.smartcae.com/webinar

Corsi

Visita la nostra pagina dei corsi, scopri la nostra proposta formativa

www.smartcae.com/corsi-di-formazione

Servizi

Scopri le nostre competenze nell'ambito della simulazione assistita al calcolatore.

www.smartcae.com/servizi

Per maggiori informazioni...

Contattaci direttamente per parlare con i nostri esperti.

SmartCAE srl

via Ottorino Respighi 4/A
50018 Scandicci (FI)
Tel. 055 975 1000
Fax. 055 975 1004
info@smartcae.com
www.smartcae.com

Prova Gratis Femap per 45 giorni

Desideri sperimentare i vantaggi delle analisi non lineari con il tuo progetto?

Scarica adesso la versione di valutazione gratuita di Femap da installare sul tuo PC!

La versione di prova abilita le funzionalità di base per il calcolo non lineare tra cui:

- Contatto linearizzato
- Bulloni precaricati
- Materiale elasto-plastico
- Grandi spostamenti

La versione di prova di Femap non ha limiti imposti nella dimensione del modello e può importare la geometria creata con qualsiasi modellatore CAD 3D.

Durante la valutazione di Femap potrai accedere all'assistenza tecnica offerta gratuitamente da SmartCAE. Personale esperto con oltre 20 anni di esperienza nella modellazione agli elementi finiti è a tua disposizione per aiutarti nell'utilizzo del programma.

Che cosa aspetti? Richiedi adesso la tua valutazione di Femap!

[>> Scarica Femap Adesso!](#)