Università degli studi di Roma "Tor Vergata"
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Analisi dinamiche agli elementi finiti: guida all'utilizzo del solutore LS-DYNA 3D in ambiente Femap

A.A. 2008-2009

Studente:
Fabrizio
Di Cicco

INDICE

INDICE 2
INTRODUZIONE 3
1. CRUSH DI TUBI IN PARETE SOTTILE 4
1.1 Tubi a sezione circolare 4
1.2 Tubi a sezione quadrata 7
2. MODELLAZIONE FEM 12
2.1 Geometria 12
2.2 Materiali, Property e struttura della mesh 13
2.3 Vincoli e Carichi 15
2.4 Definizione delle proprietà di contatto 16
2.5 Impostazione ed esportazione dell'analisi 19
2.6 Esecuzione dell'analisi 21
3. ANALISI DEI RISULTATI 22
3.1 Importazione dei risultati 22
3.2 Software di elaborazione dati 24
3.3 Risultati ottenuti 27
3.4 Conclusioni 29
BIBLIOGRAFIA 31
INDICE DELLE FIGURE 32

INTRODUZIONE

Il software commerciale LS-DYNA 3D è tra i più potenti e diffusi solutori FEM non lineari, ovvero che permettono le analisi di tensioni e deformazioni in campo plastico, dove vengono meno le ipotesi di linearità delle condizioni elastiche. Tuttavia i software di Pre e Post-processing forniti con il solutore risultano poco intuitivi nell'utilizzo e quindi mediamente difficili da utilizzare. In questo breve tutorial ci si propone di illustrare il metodo con cui realizzare modelli in formato *.dyn (ovvero il formato dell'LS-DYNA 3D) mediante un più pratico e diffuso software FEM, il Femap 10. Tale software verrà utilizzato quindi per il pre e il post processing, lasciando invece al LS-DYNA 3D il compito di eseguire l'analisi.

Per convalidare le metodologie sopra descritte si effettueranno le analisi FEM su modelli semplici (tubi in parete sottile), di cui si conoscono le formule analitiche della forza media di crash (cfr. Capitolo 1); tali formule saranno quindi confrontate con i risultati ottenuti mediante le simulazioni. Inoltre, come vedremo in seguito in questa relazione, le strutture tubolari in parete sottile permettono di immagazzinare un elevata quantità di energia negli impatti, in rapporto al loro peso; pertanto lo studio di queste strutture è di particolare interesse per lo studio e la progettazione di componenti di sicurezza quali assorbitori d'urto.

1. CRUSH DI TUBI IN PARETE SOTTILE

1.1 Tubi a sezione circolare

Le formule analitiche che descrivono il comportamento dei tubi circolari in parete sottile soggetti ad impatto assiale sono dovute agli studi di J. M. Alexander. Il modello sviluppato considera il tubo costituito da un materiale a comportamento elastico perfettamente plastico, in cui la deformazione avviene a causa della generazione di alcune cerniere plastiche; la distanza tra queste ultime è la lunghezza caratteristica **l** delle pieghe (**Figura 1**).

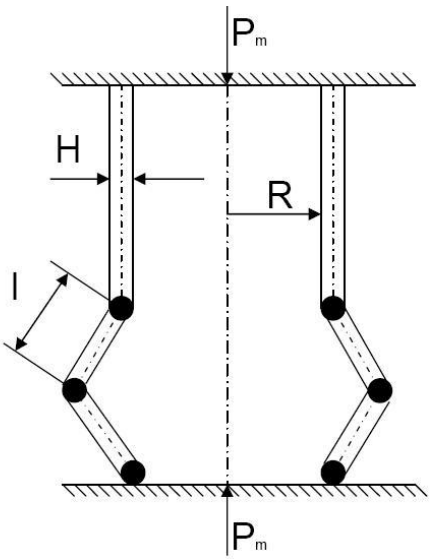


Figura 1: Deformazione della struttura durante il crushing.

La forza media statica che si viene a generare durante il crush del tubo può essere espressa come:

$$\frac{P_m}{M_0} = 4 \cdot (3)^{\frac{1}{4}} \cdot (\pi)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{R}{H}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (1)$$

dove con M_0 si è indicato il momento plastico di collasso nella sezione del tubo, valore che dipende dal valore della tensione di snervamento σ_0:

$$M_0 = \left(\frac{2\sigma_0}{\sqrt{3}}\right) \cdot \frac{H^2}{4} \qquad (2)$$

Sostituendo si ottiene:

$$P_m = \frac{2(\pi H)^{\frac{3}{2}} \cdot (R)^{\frac{1}{2}} \cdot \sigma_0}{3^{\frac{1}{4}}} \tag{3}$$

Tali valori di carico medio si riferiscono però ad un carico assiale in condizioni di applicazione statiche. In realtà l'effetto della sensibilità del materiale alla velocità di deformazione deve essere preso in considerazione, modificando il flusso plastico nel materiale secondo la legge di Cowper-Symonds. Tale legge fornisce per il legame costitutivo del materiale la seguente relazione per la velocità di deformazione:

$$\dot{\varepsilon} = D \cdot \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma_0} - 1\right)^q \tag{4}$$

Avendo indicato con σ'_0 il flusso plastico corrispondente alla velocità di deformazione della (4), con σ_0 il flusso plastico associato e con D e q due costanti che dipendono dal materiale in esame. L'equazione di Cowper-Symonds può essere riscritta nella seguente forma:

$$\frac{\sigma'_0}{\sigma_0} = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{q}} \tag{5}$$

Andando a sostituire σ'_0 al posto di σ_0 nell'espressione del carico medio ottenuto per il caso statico si ricava la seguente:

$$P_{md} = \frac{2(\pi H)^{\frac{3}{2}} \cdot (R)^{\frac{1}{2}} \cdot \sigma_0 \cdot \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{q}}\right]}{3^{\frac{1}{4}}} \tag{6}$$

Una prima approssimazione per il valore della velocità di deformazione può essere ricavata considerando la deformazione circonferenziale in una piega del tubo completamente formata:

$$\dot{\varepsilon}_\theta \cong \frac{l}{2R} \tag{7}$$

mentre la sua variazione rispetto al tempo può essere stimata considerando il tempo T necessario a formare completamente la piega. Assumendo che durante il crash la velocità vari linearmente dal valore iniziale V_0 fino a 0 all'istante finale, si ottiene una decelerazione costante e quindi una forza costante (coerentemente con l'assunzione di una forza media P_m costante). Il tempo medio richiesto per la formazione di una piega, considerando una velocità media costante durante tutto il fenomeno e pari a $V_0/2$, risulta essere:

$$T = \frac{2l}{V_0} \tag{8}$$

Il valore medio della velocità di deformazione risulta quindi essere pari a:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V_0}{4R} \tag{9}$$

Possiamo sostituire l'espressione appena trovata nella formula della forza dinamica media P_{md}, ottenendo:

$$P_{md} = \frac{2(\pi H)^{\frac{3}{2}} \cdot (R)^{\frac{1}{2}} \cdot \sigma_0 \cdot \left[1 + \left(\frac{V_0}{4RD}\right)^{\frac{1}{q}}\right]}{3^{\frac{1}{4}}} \tag{10}$$

Le formule presentate (caso statico e caso dinamico) possono essere corrette andando a considerare una deformata del tubo che si avvicini di più al caso reale (**Figura 2**):

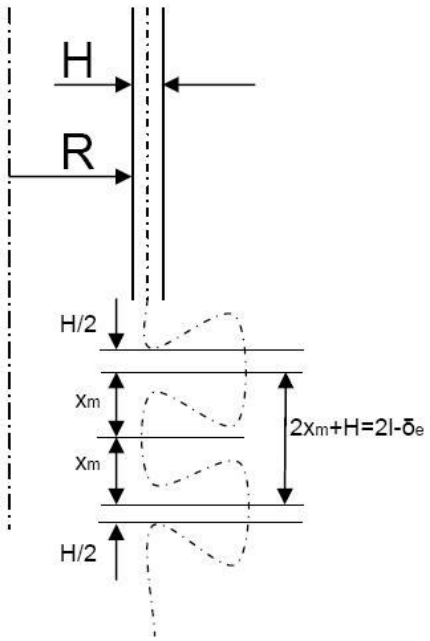


Figura 2: Distanza effettiva tra le pieghe.

Modificando quindi la distanza di crash da 2l a δ_e si ottengono le formule corrette:

$$P_{mc} = \frac{2(\pi H)^{\frac{3}{2}} \cdot (R)^{\frac{1}{2}} \cdot \sigma_0}{3^{\frac{1}{4}} \cdot \left(0.86 - 0.37 \cdot \left(\frac{H}{R}\right)^{\frac{1}{2}}\right)} \tag{11}$$

$$P_{mdc} = \frac{2(\pi H)^{\frac{3}{2}} \cdot (R)^{\frac{1}{2}} \cdot \sigma_0 \cdot \left[1 + \left(\frac{V_0}{4RD}\right)^{\frac{1}{q}}\right]}{3^{\frac{1}{4}} \cdot \left(0.86 - 0.37 \cdot \left(\frac{H}{R}\right)^{\frac{1}{2}}\right)} \tag{12}$$

In **Figura 3** si riporta un grafico proposto dal **[1]** in cui si confrontano dati sperimentali con quelli ottenuti mediante il modello analitico appena descritto; come si può notare il modello descrive in maniera soddisfacente il comportamento del sistema in esame.

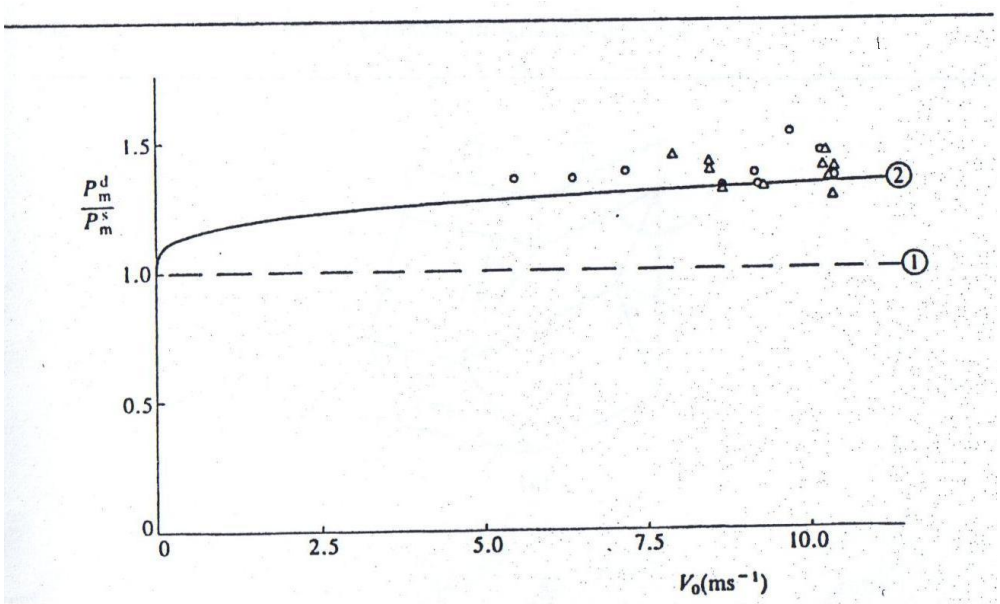


Figura 3: Confronto tra dati sperimentali e valori ottenuti dalle formule analitiche.

1.2 Tubi a sezione quadrata

L'analisi teorica del buckling di tubi in parete sottile a sezione quadrata segue le stesse procedure generali illustrate per quelli a sezione tonda. Per questo tipo di strutture, però, il comportamento durante il crash (sia in condizioni statiche, sia

dinamiche) è più complesso rispetto al caso precedente: l'andamento delle pieghe (**Figura 4**), che si vanno a formare a causa dell'instaurarsi di una instabilità locale e delle conseguenti plastiche, è di gran lunga diverso rispetto al caso dei tubi tondi ed è, come vedremo, funzione di parametri geometrici.

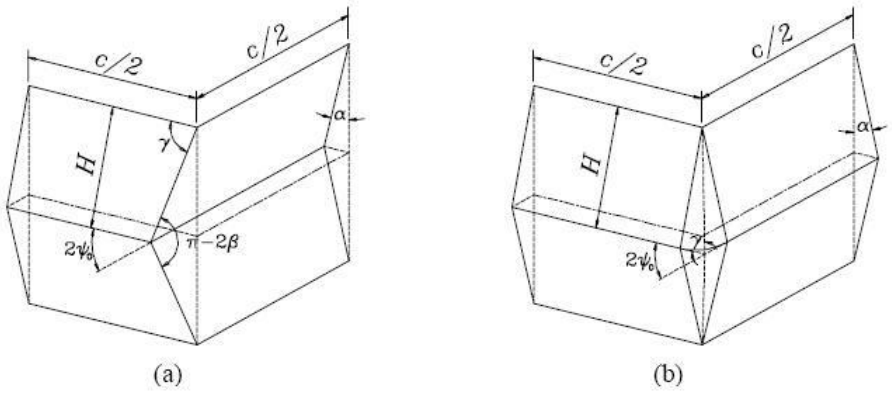


Figura 4: Elementi base di collasso. (a) Tipo I e (b) Tipo II.

Gli studi di T. Wierzbicki e W. Abramowicz su tubi a sezione quadrata con lato medio di lunghezza C e spessore medio H (vedere **Figura 5**) hanno portato all'identificazione delle tre modalità di collasso e le proporzioni geometriche per cui esse si verificano.

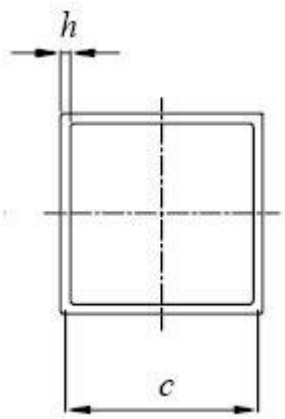


Figura 5: Sezione retta del tubo.

In base al rapporto C/H si avranno diversi tipi di lobi sui lati del tubo. Per un valore di C/H > 40.8 la deformazione prevista è quella illustrata in **Figura 6a** (deformazione simmetrica); per un C/H < 7.5 si avrà invece una deformazione per tutti i lati del tubo come illustrato in **Figura 6b** (deformazione estensionale).

La deformazione a modi misti (un lobo come in **Figura 4a** e uno come in **Figura 4b**) si ottiene invece per un rapporto $7.5 \geq C/H \leq 40.8$ ed è mostrata in **Figura 6c**.

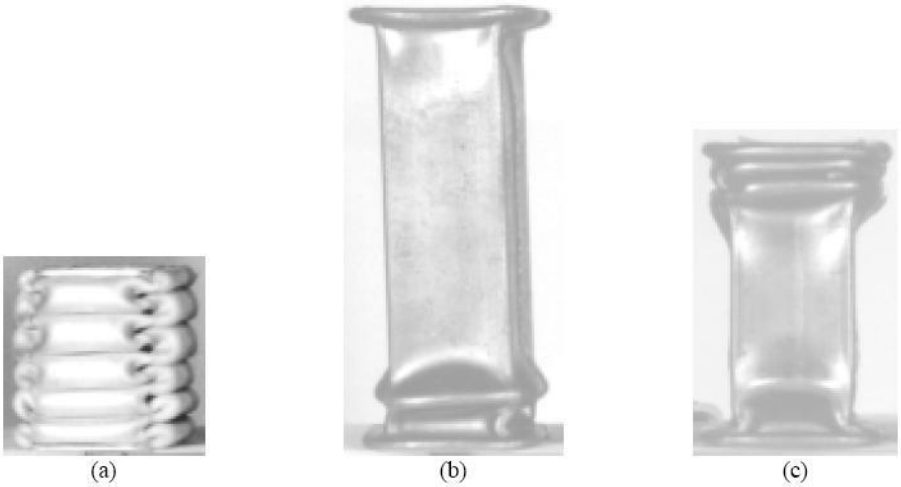


Figura 6: Modi di collasso. (a) Deformazione simmetrica; (b) Deformazione estensionale; (c) Deformazione mista.

Imponendo l'uguaglianza del lavoro delle forze esterne con quello assorbito dalla struttura si può risalire alla forza media di crash in condizioni statiche, la quale può essere scritta come:

$$\frac{P_m}{M_0} = 38.12 \cdot \left(\frac{C}{H}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{13}$$

con:

$$\frac{l}{H} = 0.99 \cdot \left(\frac{C}{H}\right)^{\frac{2}{3}} \tag{14}$$

$$M_0 = \frac{\sigma_0 \cdot H^2}{4} \tag{15}$$

Come per il caso dei tubi a sezione circolare, le pieghe in realtà non si schiacciano completamente durante il crushing, pertanto anche in questo caso è necessario correggere la distanza tra i lobi nella formula, tenendo conto della seguente relazione:

$$\frac{\delta_e}{2l} = 0.73 \tag{16}$$

Sostituendo tale valore la formula per il calcolo della forza media statica diventa:

$$\frac{P_m}{M_0} = 52.22 \cdot \left(\frac{C}{H}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{17}$$

Anche nel caso di tubi a sezione quadrata adotteremo, per lo studio del comportamento dinamico, il modello di Cowper-Symonds; pertanto avremo per la forza dinamica media:

$$\frac{P_m}{M_0} = 52.22 \cdot \left(\frac{C}{H}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D}\right)^{\frac{1}{q}}\right] \tag{18}$$

Determinare con esattezza il valore della velocità di deformazione in tubi a sezione quadrata è un compito piuttosto arduo, vista la complessità delle deformate dei lobi. Tuttavia un valore stimato di $\dot{\varepsilon}$ sufficientemente affidabile è il seguente:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{0.33 \cdot V_0}{C} \tag{19}$$

Sostituendo tale espressione nella (18) si giunge all'espressione finale della forza dinamica media:

$$\frac{P_m}{M_0} = 52.22 \cdot \left(\frac{C}{H}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left[1 + \left(\frac{0.33 \cdot V_0}{C \cdot D}\right)^{\frac{1}{q}}\right] \tag{20}$$

Di seguito si riportano dei grafici (sempre proposti dal **[1]**) nei quali si confrontano i dati sperimentali con quelli analitici: anche in questo caso si può osservare come il modello analitico realizzato sia corretto.

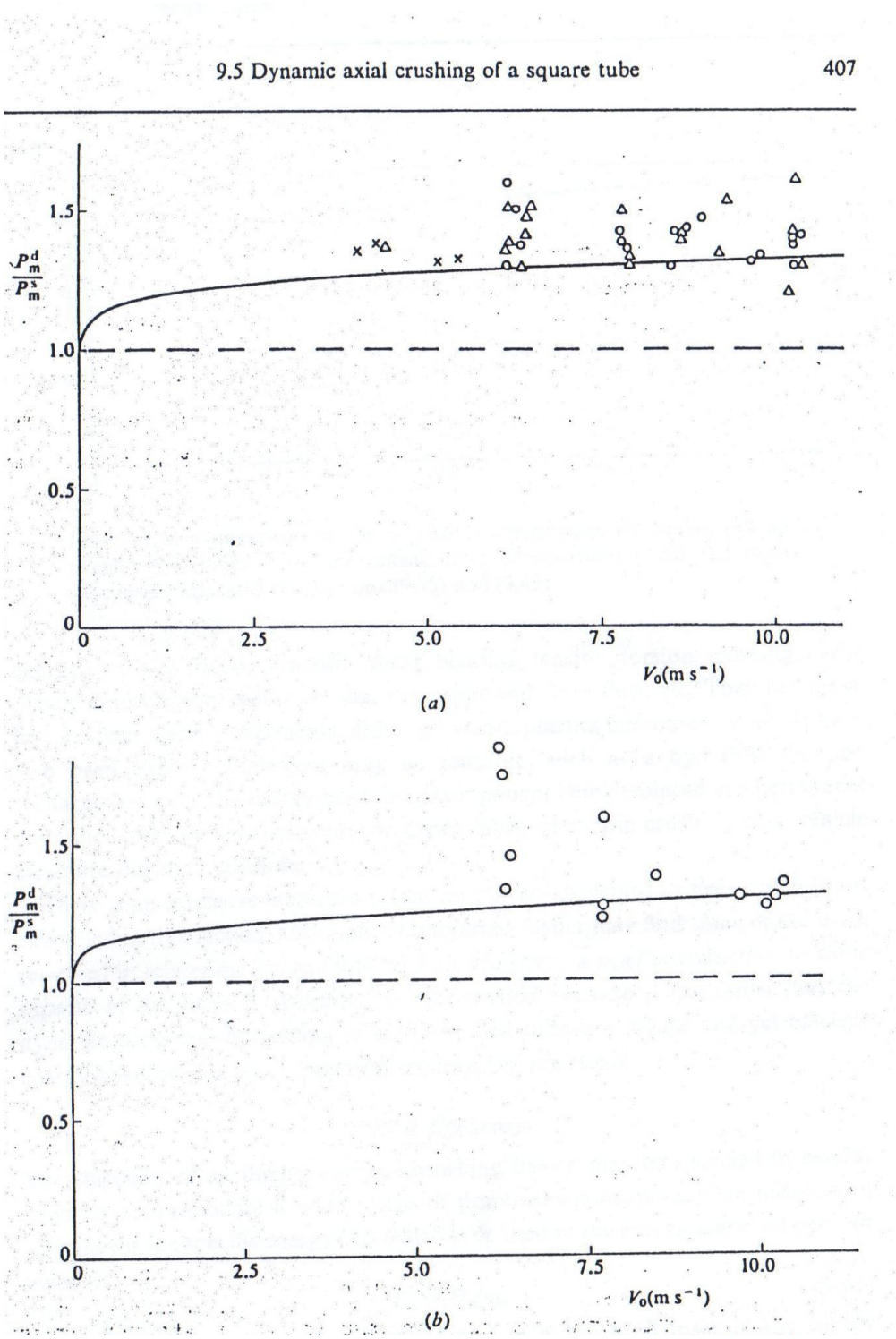


Figura 7: Confronto tra dati sperimentali e analitici. a) Tubo a sezione quadrata con C = 37.07 mm e H = 1.152 mm; b) Tubo a sezione quadrata con C = 49.31 mm e H = 1.63 mm.

2. MODELLAZIONE FEM

Illustreremo ora come realizzare i modelli FEM che ricreino le condizioni sperimentali da cui derivano le formule viste nel capitolo precedente mediante il software FEMAP, che verranno poi esportate in *.dyn. Nell'esempio che segue verrà mostrata la procedura per modellare tubi a sezione quadrata con spessore 2 mm; tale procedura è identica a quella necessaria per tubi a sezione circolare.

2.1 Geometria

Si procede con il disegno della struttura mediante superfici: infatti, essendo i tubi in parete sottile, è lecito modellare in tal modo la struttura, al fine di avere un minor numero di elementi e rendere quindi più rapide le simulazioni per il solutore. E' bene sottolineare che i tubi vengono modellati con spigoli vivi, cosa che nella realtà è ovviamente impossibile da realizzare. Si compie questa approssimazione in quanto non comporta (come vedremo) errori significativi nei risultati ottenuti, ma semplifica notevolmente la modellazione e la velocità delle analisi. Infatti se si dovesse realizzare la geometria con dei raggi di raccordo, essi dovrebbero essere poi modellati con un numero sufficientemente alto di nodi/elementi tale da approssimare correttamente l'arco di circonferenza. Il solutore LS-DYNA 3D, però, adatta il suo tempo di calcolo alla dimensione dell'elemento più piccolo: pertanto con elementi così piccoli si andrebbe a rallentare il tempo delle simulazioni in maniera molto significativa, ottenendo vantaggi in termini di precisione dei risultati non apprezzabili.

Partiamo dunque disegnando un quadrato nel piano XY di lato **0.14 m** ed estrudiamo da esso una superficie di lunghezza **0.512 m** lungo l'asse Z: avremo a questo punto un tubo a sezione quadrata disegnato mediante superfici. Spostiamo il Workplane lungo l'asse Z di **0.06 m** rispetto al bordo superiore del tubo e disegniamo un quadrato di lato **0.2 m** centrato rispetto alla sezione del tubo, dal quale creeremo una superficie planare. Questa operazione è necessaria in quanto così facendo, una volta creato il modello FEM, non si avranno compenetrazioni di materia iniziali tra tubo e massa impattante. Per lo stesso motivo, creiamo la superficie del pavimento con un offset dal bordo inferiore del tubo di **7.5×10^{-4} m** (essendo il pavimento rigido e funzionale solo all'appoggio del tubo, verrà realizzato con uno spessore minimo, cioè 1.5 mm). Il risultato di tali procedure è mostrato nella **Figura 8**.

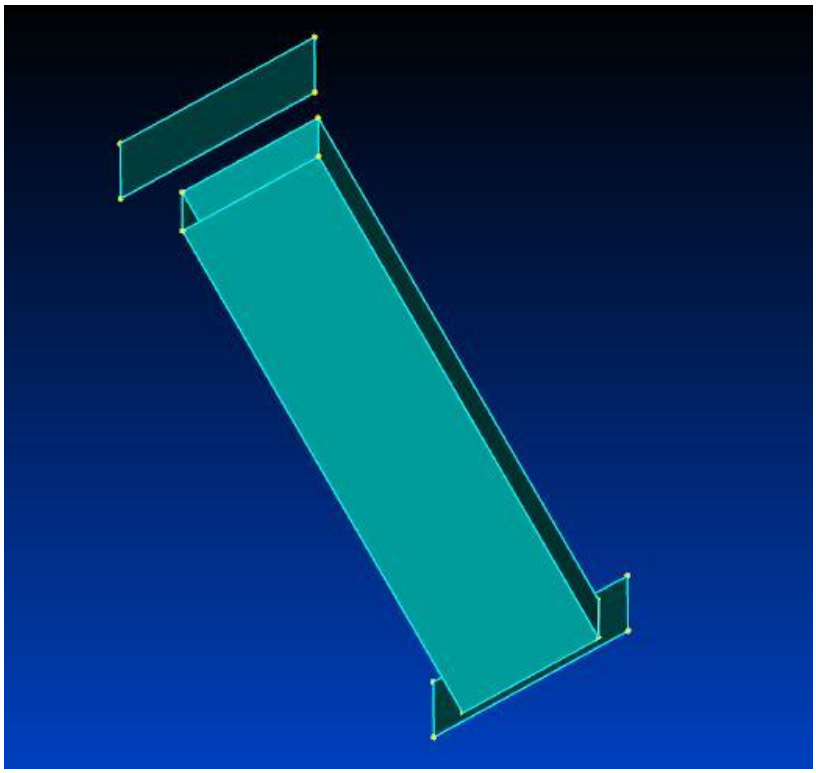


Figura 8: Modello Geometrico.

2.2 Materiali, Property e struttura della mesh

A questo punto andiamo a definire i materiali e le Property. Nella finestra dei materiali selezioniamo "*Type\Other Types"* e quindi andiamo a cercare nell'elenco presente nella finestra in **Figura 9** il materiale *"LS-DYNA 3D Plastic Kinematic Material"*. Quindi impostiamo i valori delle caratteristiche fisiche e meccaniche dell'acciaio che vogliamo inserire (Fe360 nel nostro caso). Il modello di acciaio è elasto-plastico bilineare:

- Densità: 7850 kg/m^3
- Modulo di Young: 206 GPa
- Coefficiente di Poisson: 0.33
- Tensione di snervamento: 240 MPa
- Etan: 480 MPa

Alle voci C e P inseriamo rispettivamente la D e la q della formula di Cowper-Symonds relativi agli acciai (**D= 40.4** e **q=5**), mentre impostiamo il valore nullo per gli altri campi rimasti; clicchiamo quindi su *"Ok"* e creiamo il materiale. Ripetiamo la procedura, selezionando però questa volta il materiale *"LS-DYNA*

3D Rigid" (materiale indeformabile), al quale assegniamo solo densità, modulo di Young e coefficiente di Poisson identici al materiale precedente, fatta eccezione per la densità. Infatti, per non dover disegnare una superficie troppo grande e sproporzionata con il resto del modello, rimane più comodo avere una massa più piccola ma di elevata densità (nell'esempio è stata posta pari a 157000 Kg/m^3). Ovviamente è perfettamente equivalente disegnare una massa impattante più grande adottando una densità minore del materiale. E' importante creare 2 materiali identici di tipo Rigid, uno per il pavimento e l'altro per la massa: se non si effettua tale procedura, il risultato dell'analisi sarà errato. Nel caso di due corpi distinti con stesso materiale e stesso spessore, è necessario definire 2 Property (come nel caso del materiale) affinché il solutore interpreti i due corpi come separati e non uniti.

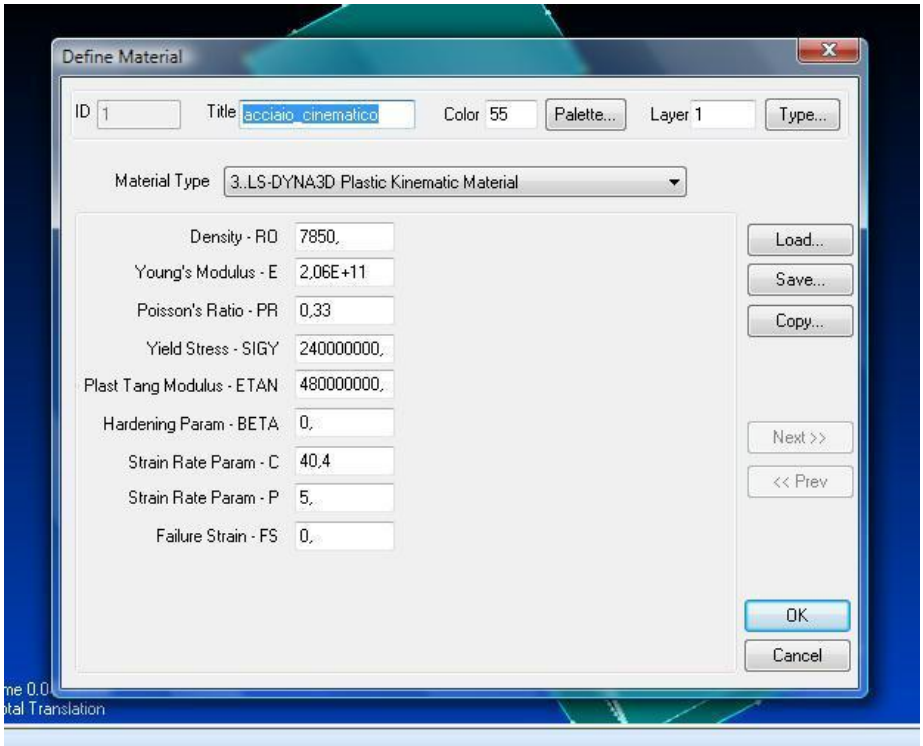


Figura 9: Creazione dei materiali.

Definiamo ora le Properties: assegniamo alla Property 1, che chiameremo *"Tubo"*, il materiale acciaio e uno spessore di 2 x 10^{-3} m; assegniamo invece alla Property 2 il nome *"Massa"*, uno spessore di 0.118 m e il materiale Rigid. Creiamo una ulteriore Property *"Floor"* per modellare il pavimento, anche esso con materiale Rigid ma spessore 1.5 x 10^{-3} m. In questo modo avremo che il tubo sarà a contatto con il pavimento e molto poco distante dalla massa impattante (così da non perdere troppo tempo dell'analisi in istanti precedenti l'impatto).
Selezioniamo ora il comando *"Mesh \ Mesh Control \ Size Along Curve"* e definiamo il numero di nodi da creare sulle curve presenti nella geometria nel seguente modo:

- 5 nodi per ciascun lato della superficie che identifica la massa impattante;
- 5 nodi per ciascun lato del pavimento;
- 20 nodi su bordi superiori e inferiori del tubo;
- 150 nodi sugli spigoli del tubo

Creiamo quindi la Mesh tramite il comando *"Mesh\Geometry\Surface"*, assegnando alle varie superfici le Property corrispondenti. Effettuiamo il check dei nodi coincidenti[1] mediante il comando *"Tools\Check\Coincident Nodes"* e selezioniamo tutti i nodi mediante il comando *"Select all"* e impostiamo l'opzione *"Merge Entities"*.
In questo modo avremo un totale di 12050 elementi, sufficienti a descrivere adeguatamente il comportamento della struttura durante il crush e il suo stato tensionale. La massa impattante sarà pari a 741.04 Kg (valore che andrà impostato nel software di calcolo, cfr. § 3.2) .

2.3 Vincoli e Carichi

Andiamo ora a imporre i vincoli sulla struttura in modo da ricreare le condizioni di laboratorio. Le sperimentazioni sono state effettuate su tubi saldati su di un pavimento molto rigido, i quali venivano colpiti da una massa impattante scorrevole su delle guide. Inoltre vi era un ulteriore elemento metallico scorrevole posto sulla sommità del tubo mediante un apposito invito: tale elemento permetteva al tubo di non flettersi e di procedere il crush assialmente.
Per ricreare tali condizioni andiamo quindi ad imporre dei vincoli di tipo *"Fixed"* sulla superficie del pavimento (Vincoli sulla superficie Floor) e sui bordi inferiori del tubo (vincoli sulle curve), in modo da ricreare l'effetto del pavimento e della saldatura del tubo su di esso. Quindi imponiamo dei vincoli avanzati ("*Advanced Types"*) sul bordo superiore del tubo e sulla massa impattante: in particolare consentiamo la sola traslazione lungo l'asse Z sia per i bordi, sia per la massa, in modo da simulare la presenza di una guida (**Figura 10**).

[1] Questa operazione non è necessaria in quanto in questo caso non sono presenti nodi coincidenti. Tuttavia tale procedura è stata illustrata per completezza, in quanto spesso accade nei modelli FEM di dover effettuare il merging dei nodi sovrapposti.

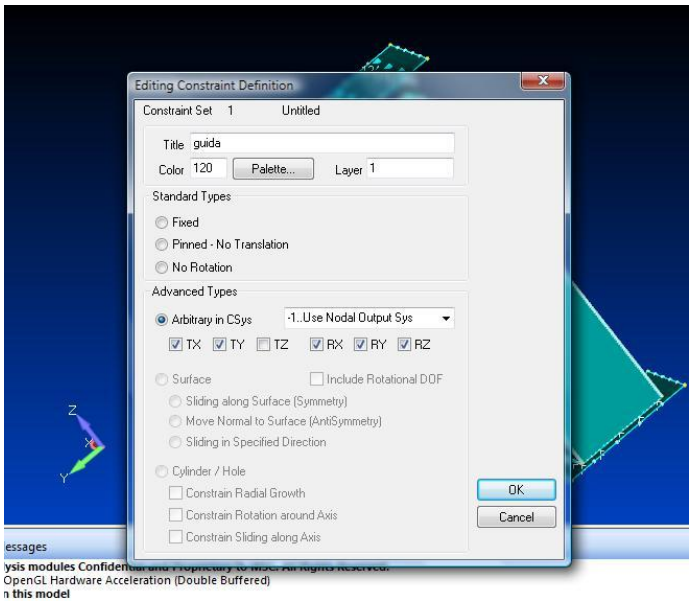


Figura 10: Impostazione di vincoli avanzati per la simulazione di una guida verticale.

Per quanto riguarda i carichi, imponiamo una velocità di 15 m/s alla superficie che identifica la massa impattante. Trascureremo gli effetti dell'accelerazione gravitazionale, in quanto non significativi.

2.4 Definizione delle proprietà di contatto

Andremo ora a definire le regioni di contatto, per fare in modo che avvenga l'impatto tra massa e tubo, senza che si creino compenetrazioni di materia. Per prima cosa creiamo, alla voce *"Connections"* nell'albero delle features, le property necessarie alla definizione dei contatti. E' di estrema importanza, affinché il modello funzioni, che ogni tipo di contatto abbia la propria property: in questo caso si prevedono 4 tipi di contatto (tubo con massa, tubo con pavimento, massa con pavimento e tubo con se stesso. Selezioniamo quindi *"Property\New"* e ci posizioniamo nella scheda "DYNA" come in **Figura 11**. Diamo il nome *"Own"* alla property e impostiamo il tipo di contatto *"Automatic"* (il solutore gestisce i contatti con le impostazioni di default) sotto la voce type. Analogamente creiamo le property *"Floor"*, *"Massa"* e *"Battuta"*.

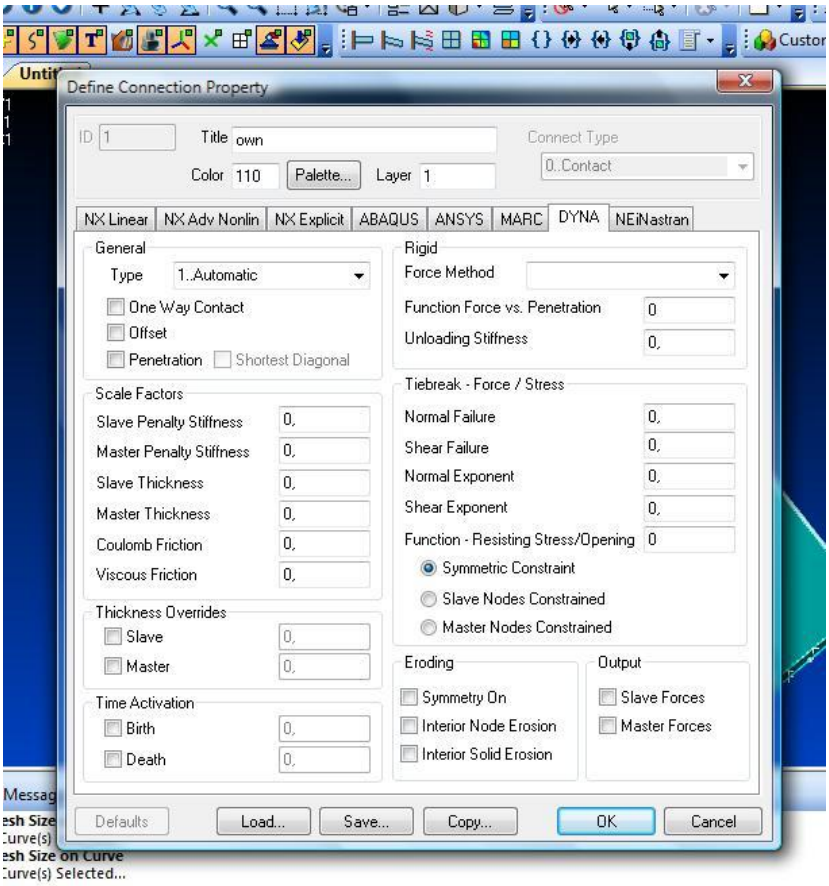


Figura 11: Definizione delle proprietà di connessione.

Sempre nella voce *"Connections"* andiamo a definire le regioni di contatto: selezioniamo le superfici appartenenti alla regione che vogliamo creare, avendo cura di inserire sia il lato positivo, sia quello negativo delle superfici (**Figura 12**). Con tali modalità creiamo dunque le regioni *"own"* (cioè il corpo del tubo), *"floor"* (pavimento) e *"massa"*.

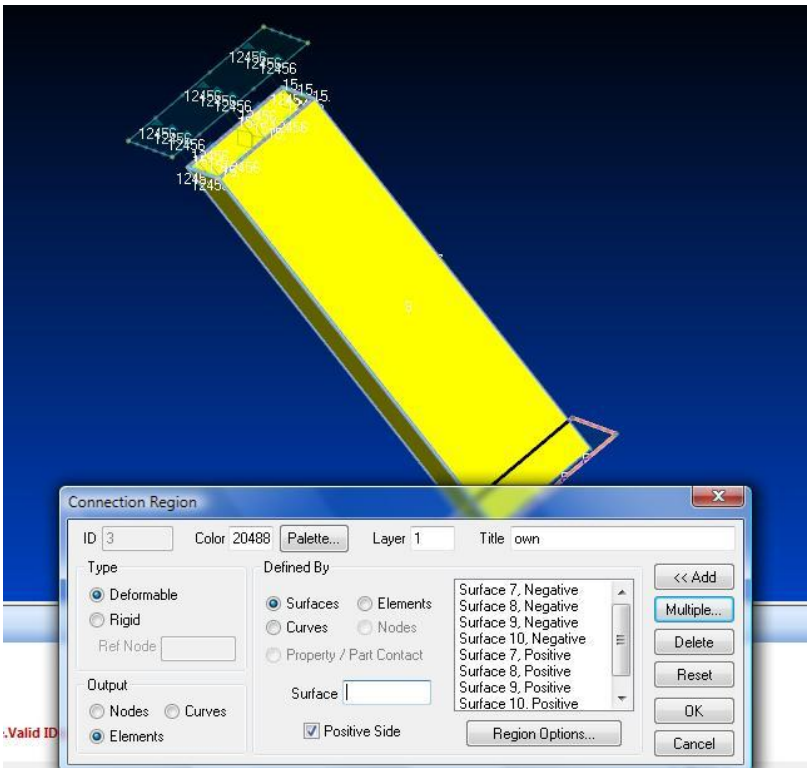


Figura 12: Definizione delle regioni di contatto.

Infine creiamo le Connectors: per la connessione *"Own"* (il contatto del tubo con se stesso), selezioniamo la property omonima e impostiamo come regioni interessate nel contatto, in entrambe le dialog box (master e slave), le regioni *"own"* (**Figura 13**). Analogamente, selezionando di volta in volta la property corrispondente e le regioni interessate, creiamo le connessioni *"top"*, *"battuta"* e *"bot"*. In particolare avremo le seguenti combinazioni:[2]

- Contatto mattone-tubo (*"top"*): selezionare la property *"massa"* e impostare come regioni di contatto *"massa"* e *"own"*.
- Contatto tubo-pavimento (*"bot"*): selezionare la property *"floor"* e impostare come regioni di contatto *"floor"* e *"own"*.
- Contatto massa-pavimento (*"battuta"*): selezionare la property *"battuta"* e impostare come regioni di contatto *"massa"* e *"floor"*.

[2] E' indifferente ai fini della simulazione quale regione viene definita "Master" e quale "Slave".

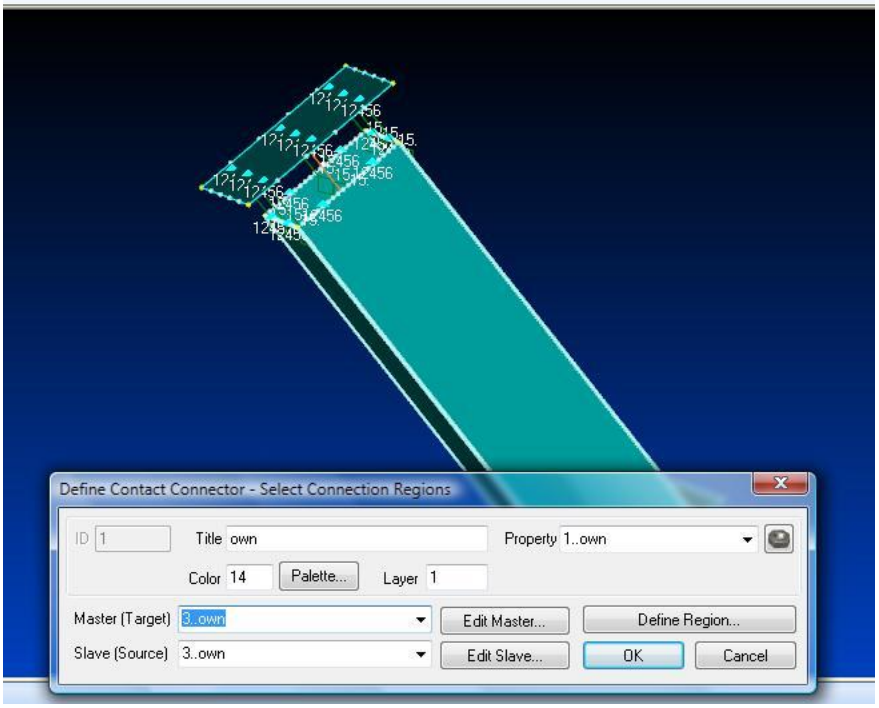


Figura 13: Definizione dei contatti.

2.5 Impostazione ed esportazione dell'analisi

A questo punto impostiamo l'analisi da esportare in *.dyn. Creiamo un'analisi (*"Model\Analysis"*), selezionando come tipo *"LS-DYNA 3D"* e clicchiamo su *"Next"*. Saltiamo le due successive schermate cliccando nuovamente *"Next"* (le finestre saltate sono dedicate a opzioni che non interessano la presente trattazione, quali l'esclusione di informazioni da esportare o l'impostazione di comandi rapidi per il richiamo dell'analisi). Nella schermata di controllo dell'analisi (**Figura 14**) impostiamo il tempo di durata dell'analisi a 0.03 secondi (sotto la voce *"Termination time"*); nella stessa schermata, definiamo lo step di calcolo (*"Output time interval"*) pari a 5 x 10^{-4} secondi (sperimentalmente un tempo ottimale per l'esecuzione dell'analisi). Alla voce *"Plate Integration Points"*, ovvero il numero di "strati" in cui si calcola lo stato tensionale, impostiamo il valore 5 (sperimentalmente adeguato). Ignoriamo i campi restanti e clicchiamo nuovamente su *"Next"* per accedere alla finestra successiva.

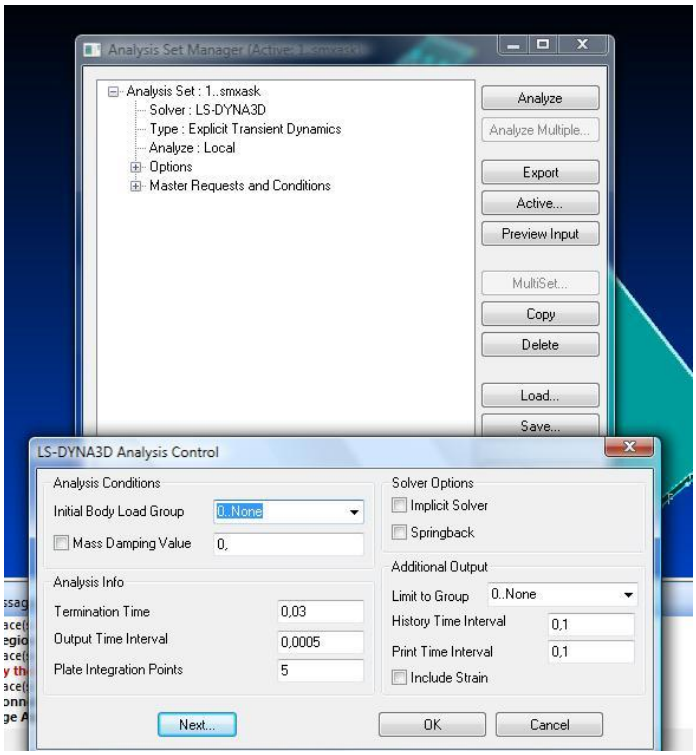


Figura 14: Impostazione dell'analisi.

Nella finestra di impostazione delle condizioni al contorno selezioniamo per i vincoli e per le condizioni iniziali i set di vincoli e carichi precedentemente creati; inoltre disattiviamo i carichi nella dialog box *"Loads"* (**Figura 15**). Clicchiamo su *"Next"* e l'impostazione dell'analisi è conclusa.

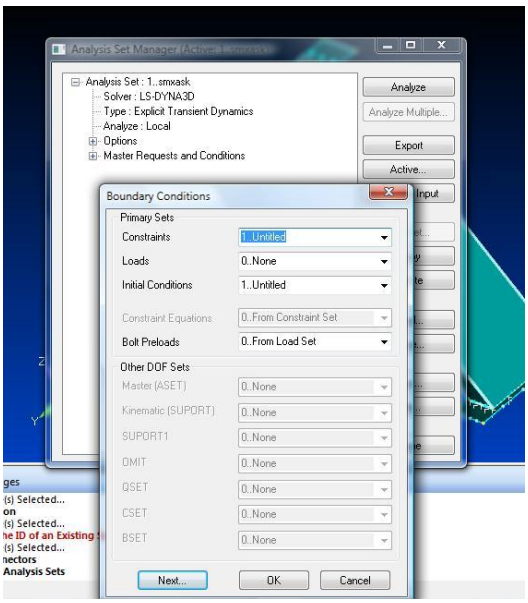


Figura 15: Impostazione delle condizioni al contorno ed iniziali.

Adesso dobbiamo esportare l'analisi in un file *.dyn. Andiamo in *"Model\Analysis"*, selezioniamo l'analisi appena creata e clicchiamo su *"Export"*. A questo punto il programma chiederà quali vincoli avanzati espandere, dato che ne sono stati impostati alcuni in precedenza (cfr. § 2.3): clicchiamo su *"Ok"* e selezioniamo tutti i vincoli mediante il comando *"Select all"*. Quindi salviamo un file *"square.dyn"* nella directory in cui è presente il file *.exe dell' LS-DYNA 3D.

2.6 Esecuzione dell'analisi

Apriamo il file *.exe del solutore e ci troveremo di fronte una schermata come in **Figura 16**.

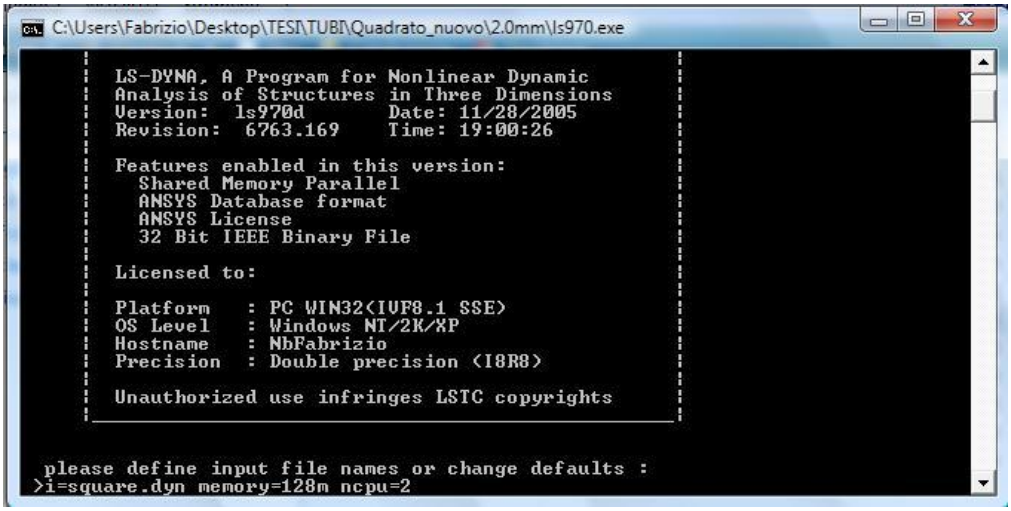


Figura 16: Schermata del solutore LS-DYNA 3D.

Digitiamo in sequenza:

- i=square.dyn (individua il file di input per la simulazione)
- memory=128m (definisce la memoria da allocare per l'analisi. Il massimo consentito è 128 Mb: se si imposta un valore superiore il programma va in crash)
- ncpu=2 (imposta il numero di cpu da utilizzare in computer con più processori)

Spingiamo il tasto *"Enter"* sulla tastiera e facciamo partire l'analisi.

3. ANALISI DEI RISULTATI

3.1 Importazione dei risultati

Una volta terminata l'analisi, torniamo all'interno del Femap e clicchiamo *"File\Import\Analysis Results"*. Selezioniamo il formato LS-DYNA 3D e importiamo il file *"d3plot"*; clicchiamo nell'ordine *"Yes"* e *"Ok"* nelle finestre che compariranno e attendiamo che vengano caricati tutti gli output. Quindi attiviamo, alla voce *"View Style"*, la funzione *"Thickness/Cross Section"* per visualizzare gli spessori delle piastre. Poi impostiamo in *"Post Options"* le funzioni *"Actual Deformation"*, *"Animation - Positive Only"* e disattiviamo *"Animation – Load and Unload"*: in questo modo potremo visualizzare correttamente le animazioni. Infatti il file *"d3plot"* importato precedentemente contiene un output per ogni step di calcolo. Impostando quindi nella finestra *"View Select\Animate Multi-Set"* il set di partenza (**Set 0**) e quello finale (**Set 62**) è possibile visualizzare in sequenza i vari step, dando vita quindi ad un'animazione del crushing.

Adesso selezioniamo il comando *"List\Model\Node"* e controlliamo il numero ID di un nodo a caso sulla superficie della massa impattante. Quindi selezioniamo *"View Select\XY vs Set Value"* (**Figura 17**): impostiamo come ID il numero del nodo appena visualizzato, come *"Output Set"* (cioè il set iniziale) il **Set 0** e come *"Output Vector"* la posizione lungo l'asse Z (*"T3 Translation"*).

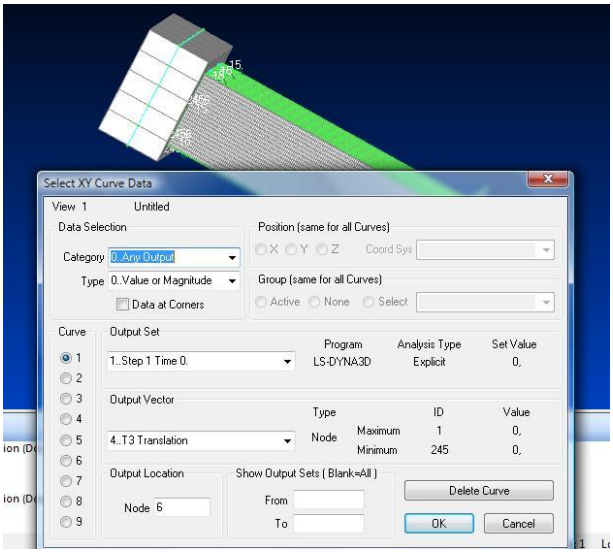


Figura 17: Impostazione del grafico Posizione-Tempo.

A questo punto comparirà un grafico Posizione-Tempo come in **Figura 18.**

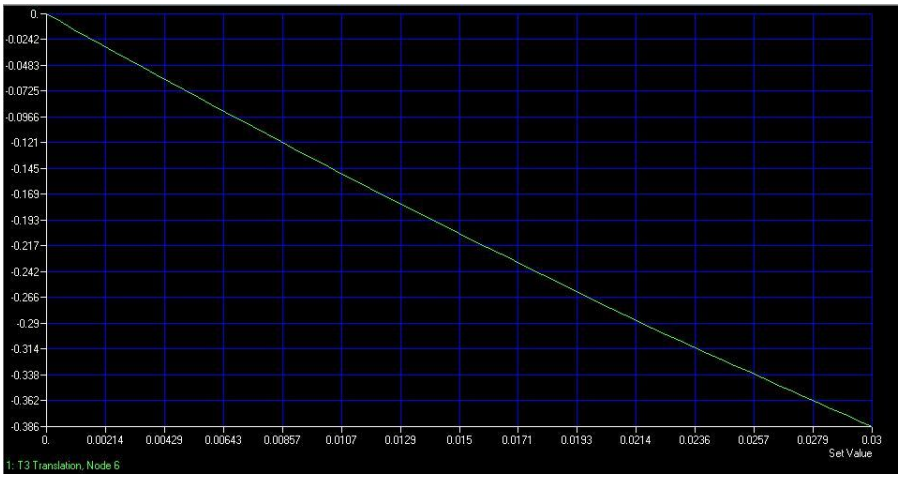
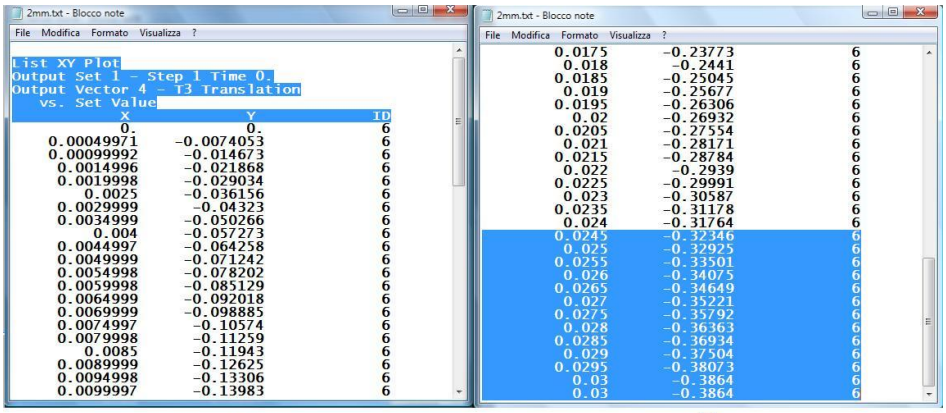


Figura 18: Grafico Posizione-Tempo della massa impattante.

Clicchiamo su *"List\Output\XY Plot"* : nella command window comparirà un elenco con 3 colonne di numeri (tempo, posizione, ID del nodo). Copiamo i dati e salviamoli su di un file di testo "2mm.txt" (**Figura 19**) nella stessa directory del programma Matlab (cfr. § 3.2), avendo cura di eliminare il testo all'inizio dei dati. Inoltre è necessario eliminare le ultime righe del file, in quanto corrispondono a una situazione in cui non è più solamente la resistenza elasto-plastica della struttura a determinare la decelerazione della massa, ma anche la presenza stessa di materiale che ne ostacola l'avanzamento. Poiché lo scopo di questo studio è determinare la forza media necessaria a portare avanti il collasso della struttura, considerare tale effetto decelerante porterebbe a risultati inesatti. Pertanto verranno eliminati gli ultimi 20 cm del crushing, che si estenderà quindi per 32 cm circa.[3]

[3] Difatti le prove sperimentali da cui derivano le formule analitiche sono state condotte su tubi di 50 cm circa, portando avanti il crush per soli 20 cm. Tuttavia l'autore ha riscontrato che è possibile portare avanti la simulazione fino a 30-33 cm senza pregiudicare l'esattezza dell'analisi.



2mm.txt - Blocco note

File Modifica Formato Visualizza ?

```
List XY Plot
Output Set 1 - Step 1 Time 0.
Output Vector 4 - T3 Translation
  vs. Set Value
          X              Y              ID
         0.             0.               6
 0.00049971     -0.0074053               6
 0.00099992      -0.014673               6
  0.0014996      -0.021868               6
  0.0019998      -0.029034               6
     0.0025      -0.036156               6
  0.0029999       -0.04323               6
  0.0034999      -0.050266               6
      0.004      -0.057273               6
  0.0044997      -0.064258               6
  0.0049999      -0.071242               6
  0.0054998      -0.078202               6
  0.0059998      -0.085129               6
  0.0064999      -0.092018               6
  0.0069999      -0.098885               6
  0.0074997       -0.10574               6
  0.0079998       -0.11259               6
     0.0085       -0.11943               6
  0.0089999       -0.12625               6
  0.0094998       -0.13306               6
  0.0099997       -0.13983               6
```

(a)

2mm.txt - Blocco note

File Modifica Formato Visualizza ?

```
     0.0175      -0.23773               6
      0.018       -0.2441               6
     0.0185      -0.25045               6
      0.019      -0.25677               6
     0.0195      -0.26306               6
       0.02      -0.26932               6
     0.0205      -0.27554               6
      0.021      -0.28171               6
     0.0215      -0.28784               6
      0.022       -0.2939               6
     0.0225      -0.29991               6
      0.023      -0.30587               6
     0.0235      -0.31178               6
      0.024      -0.31764               6
     0.0245      -0.32346               6
      0.025      -0.32925               6
     0.0255      -0.33501               6
      0.026      -0.34075               6
     0.0265      -0.34649               6
      0.027      -0.35221               6
     0.0275      -0.35792               6
      0.028      -0.36363               6
     0.0285      -0.36934               6
      0.029      -0.37504               6
     0.0295      -0.38073               6
       0.03       -0.3864               6
       0.03       -0.3864               6
```

(b)

Figura 19: Copia dei dati su file di testo. (a) Testo da eliminare all'inizio del file; (b) Steps da eliminare poichè non utili all'analisi.

3.2 Software di elaborazione dati

Per un più agevole confronto e trattamento dei risultati si è deciso di realizzare un semplice programma in linguaggio Matlab. Tale programma legge da file *.txt la posizione della massa impattante per ogni step di calcolo (valori importati dal Femap, cfr. § 3.1); quindi calcola le caratteristiche cinematiche della massa impattante durante il crash, l'andamento della forza e la forza media applicata ad essa e confronta ali valori con i risultati teorici. Di seguito si riporta il listato del programma[4].

```
clear all;
close all;
clc;
%%%%%%%%%%%%%%%%  METODO ANALITICO %%%%%%%%%%%%%%%%%%
%  Forza media impatto tubo quadrato %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all;
close all;
clc;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
larg=0.14; %lato tubo (valore medio!!)
C=larg; %grandezza caratteristica
V_in=15; %velocità iniziale
D=40.4; %costante materiale
q=5; %costante materiale
H=2e-3; %spessore tubo
sigma_0=240e6; %snervamento
M_0=sigma_0*(H/2)^2; %momento cerniere plastiche
eps_p=0.33*V_in/C; %velocità deformazione
cor=(eps_p/D)^(1/q); %fattore dinamico
prod=(C/H)^(1/3);

Pm=M_0*52.22*prod*(1+cor);

disp('C/H:')
disp(C/H)
disp('Forza dinamica media metodo ANALITICO: ')
disp(Pm)

%%%%%%%%%%%%%%%%  METODO FEM  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

dati=fopen('imp_quad.txt','r');
A=fscanf(dati,'%f %f %f',[3 inf]);
fclose(dati);

A(3,:)=[];
B=A;
B(2,:)=[];
A(1,:)=[];
tempo=B;
spost=A;
clear A;
clear B;

%calcolo velocità
passo=5e-4;
```

```
%spost(1)=0;
for i=1:length(tempo)-1
   vel(i)=(spost(i+1)-spost(i))/passo;
end

vel(1)=-V_in;
tempo2=tempo;
tempo2(:,i)=[];

%calcolo accelerazione

for j=1:length(tempo2)-1
  acc(j)=(vel(j+1)-vel(j))/passo;
end
tempo3=tempo2;
tempo3(:,j)=[];

%%calcolo forza
forza=m_imp*acc;

%calcolo forza media con variazione energia cinetica
pp=length(spost);
forzamedia = 0.5*m_imp*(V_in^2-vel(i)^2)/(abs(spost(pp)));
disp('Forza dinamica media metodo FEM: ')
disp(forzamedia)

%%plotto
figure('Name','Impatto tubo a SEZIONE QUADRATA'),
%%%

subplot(2,2,1)
plot(tempo,spost),xlabel('Tempo [s]'), ylabel('Spostamento [m]');
title(['SPOSTAMENTO'])

subplot(2,2,2)
plot(tempo2,vel),xlabel('Tempo [s]'), ylabel('Velocità [m/s]');
title(['VELOCITA'"])
```

```
subplot(2,2,3)
plot(tempo3,acc),xlabel('Tempo [s]'), ylabel('Accelerazione [m/s^2]');
title(['ACCELERAZIONE'])

subplot(2,2,4)
plot(tempo3,forza),xlabel('Tempo [s]'), ylabel('Forza [N]');
title(['FORZA'])

for y=1:length(tempo3)
   fm1(y)=Pm;
   fm2(y)=forzamedia;
end

figure('Name', 'Forza media crash tubo a SEZIONE QUADRATA')
plot(tempo3,fm1,tempo3,fm2),xlabel('Tempo [s]'), ylabel('Forza media [N]'),
text(tempo3(y),fm1(y),[' F = ', num2str(fm1(y))]),text(tempo3(y),fm2(y),[' F = ',
num2str(fm2(y))]),legend('Analitica','FEM',2);

%%%%%%%%%%%%%%%% Confronto %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

scarto=abs((abs(forzamedia)-abs(Pm))/Pm);
disp('Scarto tra i due metodi in % : ')
disp(scarto*100)

%forza e spostamento
cont=length(spost);
s_new=spost*1000;
s_new(:,cont)=[];
s_new(:,i)=[];

figure('Name', 'Forza e Spostamento')
plot(abs(s_new),forza),xlabel('Spostamento [mm]'), ylabel('Forza [N]'),
```

3.3 Risultati ottenuti

Date le grandezze geometriche e i materiali impiegati per la modellazione del tubo, applicando la (20) si ottiene il seguente valore della forza dinamica media:

$$P_{mdc}^{an} = 101.94\ KN$$

L'andamento delle caratteristiche cinematiche e della forza media calcolate dal programma Matlab sono illustrate in **Figura 20**.

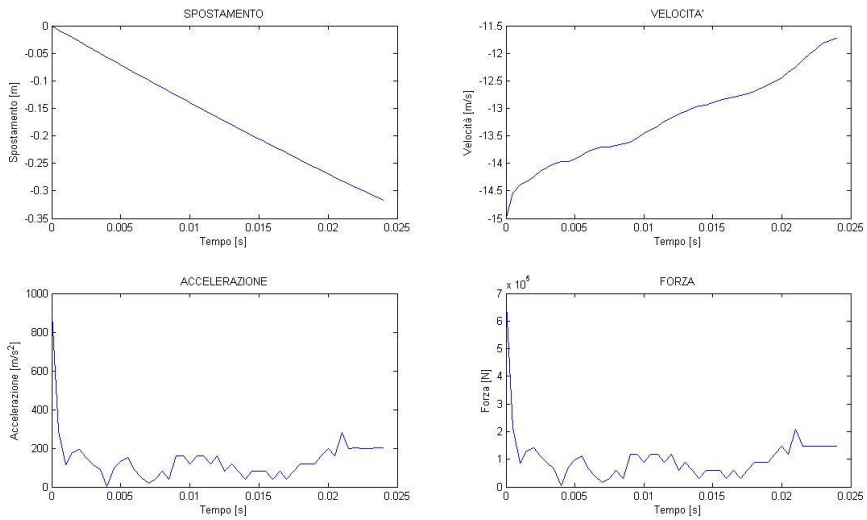


Figura 20: Risultati ottenuti per tubo a sezione quadrata con C = 0.14 m e H = 2 mm.

Il valore della forza media calcolata dal programma è pari a:

$$P_{mdc}^{FEM} = 102.23\ KN$$

Per completezza si riportano i risultati ottenuti da ulteriori analisi su tubi di spessore 1.5 mm, di cui non si illustrano i procedimenti per la modellazione in quanto identici a quelli mostrati nell'esempio.

SEZIONE RETTA	FORZA ANALITICA	FORZA FEM
Quadrata (C = 0.14 m; H = 2 mm)	101.94 KN	102.23 KN
Quadrata (C = 0.14 m; H = 1.5 mm)	63.114 KN	62.695 KN

Tabella 1: Confronto tra i risultati analitici e quelli ottenuti mediante simulazione FEM.

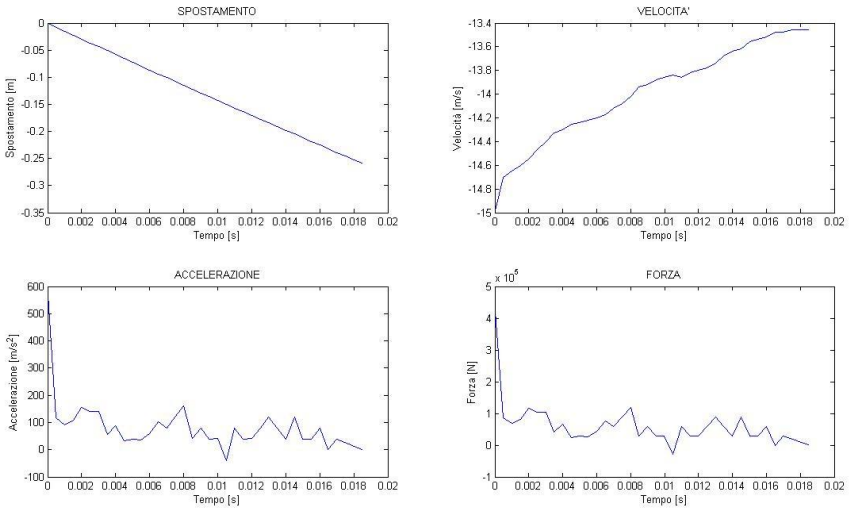


Figura 21: Risultati ottenuti per tubo a sezione quadrata con C = 0.14 m e H = 1.5 mm.

3.4 Conclusioni

Come si può facilmente notare, i risultati ottenuti mediante le simulazioni sono estremamente fedeli a quelli ottenuti mediante le formule analitiche. Infatti, come mostrato nella seguente tabella, l'errore percentuale che si commette con il metodo FEM è più che accettabile. Si può notare inoltre in **Figura 22**, come ulteriore validazione dell'analisi, che la deformazione del tubo coincide con quella della **Figura 6b** (deformazione estensionale), essendoci infatti posti nel caso di C/H = 70 > 40.8.

TIPO	SCARTO Δ %
Quadrato 2 mm	0.2831 %
Quadrato 1.5 mm	0.6641 %

Tabella 2: Scarto percentuale tra metodo analitico e metodo FEM.

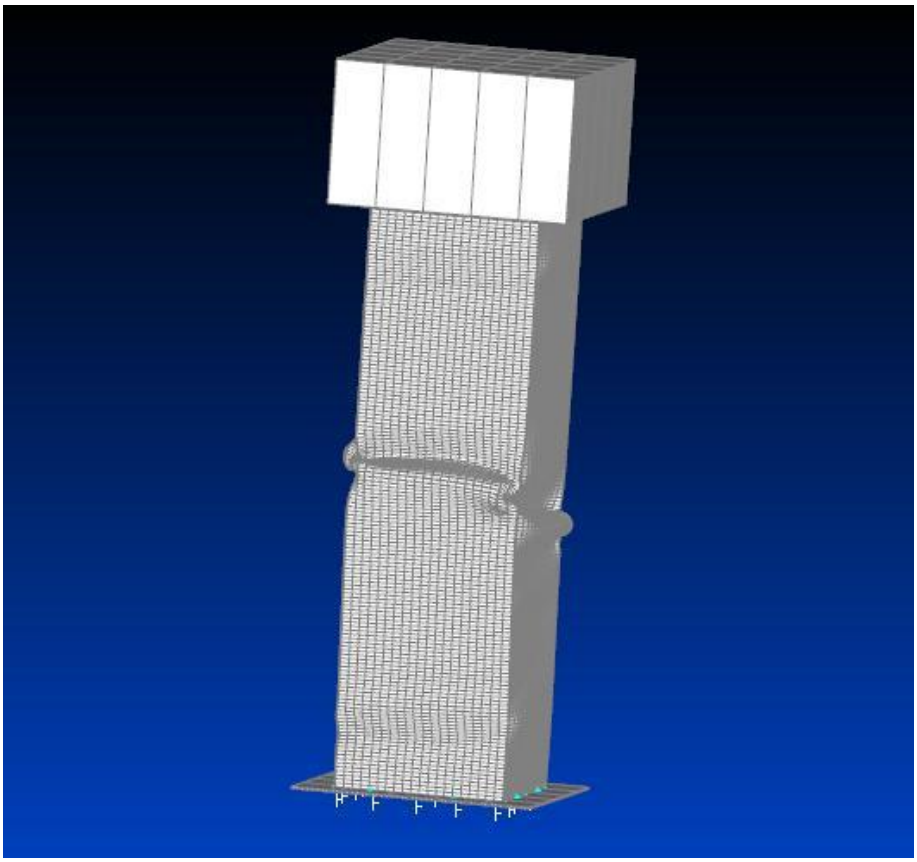


Figura 22: Deformazione del tubo durante la simulazione.

Le procedure qui illustrate sono quindi da ritenersi valide e possono essere tranquillamente applicate a strutture con geometrie più complesse. L'analisi condotta ha inoltre messo in evidenza l'elevata capacità delle strutture tubolari in parete sottile di assorbire energia quando sono deformate assialmente. Infatti il formarsi di un elevato numero di cerniere plastiche permette l'immagazzinamento di un elevato quantitativo di energia di deformazione (a testimoniare ciò è l'elevata forza necessaria per portare avanti il crushing e quindi la significativa decelerazione avvertita dalla massa impattante). Questa caratteristica, unita alla semplicità e all'economicità di realizzazione, rende tali strutture particolarmente adatte ad applicazioni di sicurezza passiva quali assorbitori d'urto su mezzi di trasporto.

BIBLIOGRAFIA

[1] N. Jones, "Structural Impact", Cambridge University Press, 1989.

[2] Chih-Cheng Yang, "Dynamic Progressive Buckling of Square Tubes", Kao Yuan Institute of Technology (Taiwan, Republic of China), 2003.

[3] B.W. Williams, D.A. Oliveira, C.H.M. Simha, M.J. Worswick, R. Mayer, Crashworthiness of straight section hydroformed aluminium tubes", Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo (Waterloo, Ont., Canada), 2006.

[4] Manuale Femap

[5] Manuale LS-DYNA 3D

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Deformazione della struttura durante il crushing. 4
Figura 2: Distanza effettiva tra le pieghe. 6
Figura 3: Confronto tra dati sperimentali e valori ottenuti dalle formule analitiche. 7
Figura 4: Elementi base di collasso. 8
Figura 5: Sezione retta del tubo. 8
Figura 6: Modi di collasso.. 9
Figura 7: Confronto tra dati sperimentali e analitici.. 11
Figura 8: Modello Geometrico. 13
Figura 9: Creazione dei materiali. 14
Figura 10: Impostazione di vincoli avanzati per la simulazione di una guida verticale. 16
Figura 11: Definizione delle proprietà di connessione. 17
Figura 12: Definizione delle regioni di contatto. 18
Figura 13: Definizione dei contatti. 19
Figura 14: Impostazione dell'analisi. 20
Figura 15: Impostazione delle condizioni al contorno ed iniziali. 20
Figura 16: Schermata del solutore LS-DYNA 3D. 21
Figura 17: Impostazione del grafico Posizione-Tempo. 22
Figura 18: Grafico Posizione-Tempo della massa impattante. 23
Figura 19: Copia dei dati su file di testo. 24
Figura 20: Risultati ottenuti per tubo a sezione quadrata con C = 0.14 m e H = 2 mm. 28
Figura 21: Risultati ottenuti per tubo a sezione quadrata con C = 0.14 m e H = 1.5 mm. 29
Figura 22: Deformazione del tubo durante la simulazione. 30