POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

L’USO DI EQUAZIONI DI STATO MULTI-FASE NELLA SIMULAZIONE NUMERICA DI ONDE D’URTO

Original
L’USO DI EQUAZIONI DI STATO MULTI-FASE NELLA SIMULAZIONE NUMERICA DI ONDE D’URTO / Scapin, Martina. - ELETTRONICO. - (2012). (Intervento presentato al convegno 41° Convegno Nazionale Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni tenutosi a Vicenza (Italia) nel 5-8 Settembre 2012).

Availability:
This version is available at: 11583/2643775 since: 2016-06-13T16:36:47Z

Publisher:

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

12 October 2024

AIAS 2012 - 095

L'USO DI EQUAZIONI DI STATO MULTI-FASE NELLA SIMULAZIONE NUMERICA DI ONDE D'URTO

M. Scapin

Politecnico di Torino – Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale, Corso Duca degli Abruzzi, 24, 10129 Torino, e mail: martina.scapin@polito.it

Sommario
Questo lavoro è volto a mettere in evidenza l'importanza dell'utilizzo di Equazioni di Stato (EOS) multi-fase in eventi caratterizzati da onde d'urto. L'obiettivo è la descrizione del comportamento del materiale in seguito alla deposizione di energia derivante dall'impatto con un fascio di particelle subatomiche ad elevata energia. Siccome i tempi di deposizione sono talmente brevi (ns o μs) da essere inferiori al tempo caratteristico di risposta idrodinamica del sistema, nel materiale gli incrementi di energia, e di conseguenza, di temperatura e pressione avvengono con una trasformazione pressoché isocora. Il materiale tende, perciò, ad esplodere dall'interno: una volta che il processo di rarefazione inizia, il materiale, che si trova a monte del fronte di shock, è libero di espandere, e raggiunge valori inferiori di pressione e densità. Al contrario, l'arrivo del fronte di shock nel materiale inizialmente quasi indisturbato, ne causerà l'aumento di pressione e densità.

Abstract
In this work, the attention is focused on the importance of using multi-phase Equation of State (EOS) in case of shockwave phenomena. The main objective is the description of the thermo-dynamic material behavior in case of energy deposition due to the impact against a high energy subatomic particles beam. Due to the fact that the deposition time is shorter (ns o μs) in comparison with the hydro-dynamic characteristic time, the rise in energy, and consequently of temperature and pressure, occur along an isochoric transformation. The phenomenon is similar to an explosion inside the material: when the rarefaction process starts, the material placed behind the front shock can expand, reaching low values of both pressure and density. On the other hand, the front shock arrival in a part of material which was undisturbed, causes the growth in pressure and density.

Parole chiave: EOS, shockwave, Hugoniot, SESAME, deposizione di energia

1. INTRODUZIONE

Nell'usuale trattazione della meccanica del continuo il tensore delle tensioni, che descrive lo stato del materiale, viene suddiviso nella somma di due componenti: un tensore deviatorico e uno idrostatico. Nei materiali metallici la componente deviatorica governa i fenomeni associati alla resistenza del materiale, in particolare per quanto riguarda il comportamento in regime di plasticità e la frattura. Per la descrizione visco-plastica, si definiscono leggi costitutive del materiale in cui la tensione di flusso plastico è definita in funzione delle grandezze di interesse. Solitamente, le variabili indipendenti del problema plastico sono deformazione (plastica e volumica), velocità di deformazione, temperatura e pressione. I vari modelli di materiale possono differire in base alla natura della relazione che esprimono: alcuni utilizzano formulazioni totalmente empiriche, ricavate da interpolazioni di dati sperimentali, altri, invece, basano la loro formulazioni su considerazioni fisiche, spesso legate a teorie microstrutturali e movimento delle dislocazioni. La componente idrostatica della tensione, invece, è

associata alla pressione nel materiale e coincide con la media della traccia del tensore delle tensioni completo, oltre ad essere, anche, una variabile di stato del problema termodinamico. Quest'ultimo viene, solitamente, descritto attraverso la definizione di un'Equazione di Stato (EOS), la quale esprime la relazione tra funzioni termodinamiche (quali ad esempio pressione P, energia interna E ed entropia S), che rappresentano le variabili di stato dipendenti del problema, e variabili di stato indipendenti (quali densità ρ e temperatura T). L'insieme di queste grandezze definisce lo stato termodinamico del sistema.

2. EQUAZIONI DI STATO

Un concetto fondamentale in termodinamica è quello di energia [1,2], che può assumere numerose forme, la cui somma è l'energia totale. In sistemi a regime stazionario, durante una trasformazione, la variazione di energia totale coincide con la variazione dell'energia interna, che rappresenta la somma di tutte le forme di energia microscopiche.
La prima legge della termodinamica stabilisce che l'energia interna E di un sistema si conserva: l'energia può essere trasferita al sistema mediante riscaldamento, compressione o aggiunta di massa, oppure può essere sottratta al sistema mediante raffreddamento, espansione o sottrazione di massa. Facendo riferimento a un variazione infinitesima dello stato del sistema, si ottiene che:

$$dE = \delta Q - \delta W = \delta Q - PdV \tag{1}$$

in cui δQ e δW sono, rispettivamente, gli incrementi infinitesimi di calore fornito al sistema (positivo) e di lavoro compiuto dal sistema (positivo), pari al prodotto fra la pressione P e la variazione di volume dV. L'energia interna E non è univocamente definita, ma dipende da una costante di integrazione, che definisce il riferimento (arbitrario). Alcune definizioni fondamentali per le EOS sono relative alle derivate delle grandezze citate e ai loro campi di esistenza. Per la stabilità termodinamica, il calore specifico, definito dalla relazione

$$C_v = \left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_v \tag{2}$$

deve essere sempre positivo e tendere all'infinito in corrispondenza delle transizioni di fase, in quanto si ha una variazione di energia a temperatura costante. Un'altra relazione fondamentale, che garantisce la stabilità meccanica del sistema, è legata alla derivata parziale della pressione rispetto alla densità a temperatura costante, la quale deve sempre essere positiva o al limite nulla in corrispondenza delle trasformazioni di fase. Questa grandezza è inoltre correlata al modulo di comprimibilità (o modulo di Bulk) del materiale:

$$K = \rho \frac{dP}{d\rho} \tag{3}$$

Nel caso in cui il sistema termodinamico sia in equilibrio, lo stato del sistema risulta completamente definito note due variabili indipendenti intensive (indipendenti dalle dimensioni del sistema). Tenendo presente che, spesso, in idrodinamica si usa l'energia interna al posto della temperatura come variabile indipendente, l'equazione di stato assume la forma generale:

$$P = P(\rho, E) \tag{4}$$

Una EOS è un insieme di superfici, sulle quali è possibile definire percorsi unidimensionali, che identificano trasformazioni isoterme, isobare, isocore, isentropiche, ecc. Per ottenere la superficie è necessario misurare un gran numero di percorsi che possono essere effettuati su di essa. A titolo di esempio si riportano alcune delle EOS che solitamente sono implementate nei codici FEM commerciali [3,4], distinguendole fra analitiche e tabulari. Esempi di EOS analitiche sono: l'equazione dei gas perfetti, l'equazione di stato lineare, Mie-Grüneisen, GRAY, Puff, Tillotson. Al contrario l'equazione di stato SESAME è un esempio di EOS definita in forma tabulare. A seconda della porzione di superficie P-E-ρ che descrivono, si differenziano per campo di applicazione. Ad esempio,

l'equazione lineare in densità è adatta per la descrizione del comportamento fino a valori limitati di pressione, mentre le tabelle SESAME, coprendo intervalli di temperature e densità molto ampi, permettono la definizione di tutti gli stati della materia e le rispettive zone di transizione.

3. ONDE D'URTO

Nel caso di generazione, all'interno del materiale, di onde d'urto [5] si verificano brusche variazioni nelle caratteristiche del materiale. Il fronte d'onda che ne deriva è sempre caratterizzato da un estremamente rapido aumento di pressione, temperatura e densità. La possibilità di generare onde d'urto deriva dal fatto che la velocità di propagazione nel mezzo aumenta con la pressione. Questo implica che, anche un'onda di pressione con profilo dolce può gradualmente diventare più ripida fino ad arrivare ad assomigliare a uno shock vero e proprio.
La trattazione matematica delle onde d'urto, sviluppata da Rankine e Hugoniot, deriva dalla teoria del continuo e dalla definizione di tre leggi di conservazione: della massa, della quantità di moto e dell'energia. L'applicazione di tali leggi e dei principi della termodinamica si basa sull'ipotesi che la transizione in caso di urto avvenga tra stati in equilibrio.
Per visualizzare il problema si faccia riferimento alla condizione di un fluido comprimibile all'interno di un tubo (fig. 1), aperto a un'estremità e chiuso da un pistone all'altra.

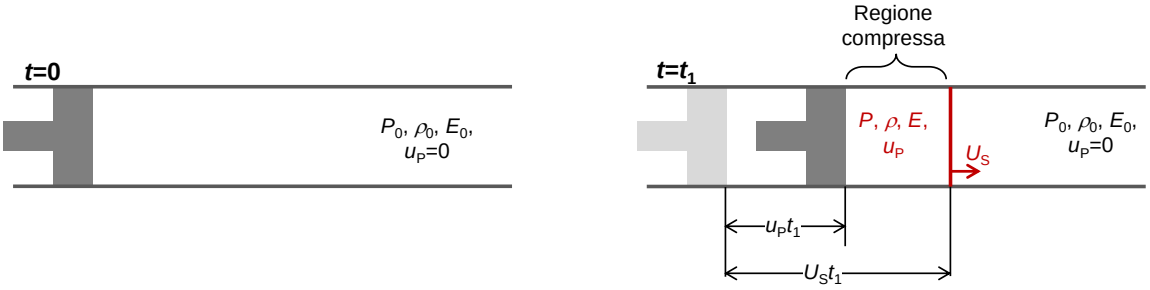

Fig. 1: Fluido comprimibile in cui viene generata un'onda d'urto

Le condizioni iniziali del materiale siano definite da ρ_0, P_0, E_0 e u_P=0. Si supponga che il pistone raggiunga istantaneamente la condizione di moto a velocità u_P. Questo implica la generazione di un'onda d'urto (S), che istantaneamente si crea sulla superficie del pistone stesso e che inizia a propagare nel materiale con velocità U_S>u_P. Il materiale dietro al fronte di shock si trova, quindi, nelle nuove condizioni ρ, P, E e u_P, mentre quello a valle permane nello stato indisturbato. L'andamento della pressione è rappresentato in fig. 2 sia in funzione del tempo che della coordinata spaziale.

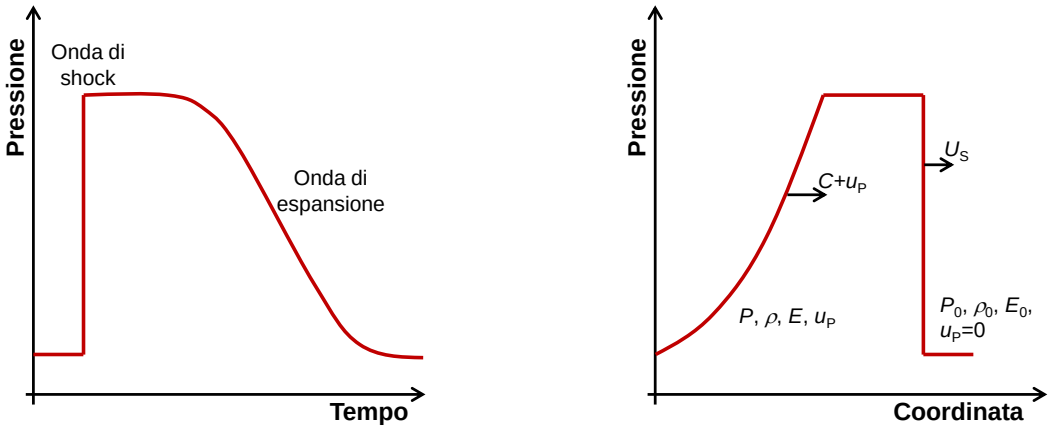

Fig. 2: Andamento della pressione in caso di shock in funzione di tempo e coordinata spaziale

Dietro al fronte d'onda si genera un'onda di rarefazione che si muove alla velocità del suono nel mezzo C. Per un osservatore esterno, dato che il materiale dietro al fronte è in movimento, la velocità vera dell'onda di rarefazione è C+ u_P, che risulta essere maggiore di U_S. Ne deriva che esiste un tempo

in cui l'onda di rarefazione raggiunge il fronte d'onda e l'onda d'urto decade. Le equazioni che derivano dalle leggi di conservazione sono, rispettivamente:

$$1-\frac{\rho_0}{\rho}=\frac{u_P}{U_S}, \qquad P=P_0+\rho_0 U_S u_P, \qquad E=E_0+\frac{u_P^2}{2} \tag{5}$$

e valgono nel caso di propagazioni stazionarie (U_S costante) unidimensionali. Il sistema di equazioni (5) è indipendente dal materiale e, siccome, presenta cinque incognite (u_P, U_S, ρ, P e E) in tre equazioni è indeterminato. Eliminando le velocità U_S e u_P, le leggi di conservazione si riducono a una equazione, che risulta essere funzione solo delle variabili di stato P, ρ ed E:

$$E=E_0+\frac{(P+P_0)(\rho-\rho_0)}{2\rho_0\rho} \tag{6}$$

L'eq. 6 viene, solitamente, chiamata *Equazione di Hugoniot* ed è fondamentale nella teoria delle onde d'urto. Per definire completamente lo stato finale in cui si porta il materiale investito dal fronte d'onda e per poter diagrammare la curva di Hugoniot è necessario aggiungere una relazione. A partire dall'eq. 6 e nota la EOS del materiale (ovvero, nota la relazione espressa in forma generale dall'eq. 4), si definisce il legame fra pressione e densità (o analogamente volume). Ovviamente, è richiesta la conoscenza della condizione iniziale (pedice 0). La curva di Hugoniot non rappresenta un vero e proprio percorso idrodinamico sull'equazione di stato, ma rappresenta il luogo dei punti che definiscono lo stato del sistema dietro al fronte d'onda e descrive solamente la condizione del materiale in compressione. È importante sottolineare che quando la pressione aumenta in seguito a uno shock il materiale non segue la curva di Hugoniot. Piuttosto, la pressione cambia in maniera discontinua dal valore iniziale a quello finale, in base alla pendenza della linea di Rayleigh.
Un percorso sulla EOS, che, invece, risulta di particolare importanza, quando si verifica la propagazione di onde d'urto, è la trasformazione adiabatica, che definisce il rilascio, ovvero lo scarico del materiale a partire dalla condizione a cui è arrivato in seguito al passaggio dell'onda d'urto.

3.1. Generazione di onde d'urto

Esempi comuni di casi in cui si ottiene e si sfrutta la generazione di onde d'urto sono: impatti ad elevata velocità, *flyer impact test*, *shocktubes* ed esplosioni.
L'ultimo esempio, che si vuole riportare riguarda, in generale, i casi in cui si abbia la deposizione, in tempi brevi, di un'elevata quantità di energia. Il materiale viene rapidamente portato in una nuova condizione di energia e pressione, rispettando l'equazione di stato. Nel caso in cui la fonte dell'energia deposta sia un laser a luce pulsata ad elevata potenza, viene scaldato solo un sottile strato di materiale sulla superficie. Siccome il processo è abbastanza veloce, qualsiasi fenomeno di diffusione termica viene impedito e il materiale scaldato vaporizza. Il vapore raggiunge temperature molto elevate arrivando alla condizione di plasma, il quale continua ad assorbire energia fino a fine deposizione, generando un'onda d'urto in seguito alla sua espansione. Un'altra fonte di energia esterna che può essere depositata sul materiale arriva dall'impatto con un fascio di particelle (ad esempio protoni) ad elevata energia [6,7]. A seconda delle condizioni di impatto, si possono verificare situazioni, simili a quelle ottenute in caso di deposizione tramite laser (se l'impatto è radente a una superficie) o in caso di esplosione o *shocktubes* (se l'impatto è perpendicolare alla superficie). Quest'ultimo caso verrà discusso nei paragrafi successivi.

4. EOS E CODICI FEM

In questo paragrafo, l'equazione di stato viene descritta in riferimento alla formulazione che solitamente è utilizzata nei codici agli elementi finiti commerciali. In particolare, si farà riferimento alle definizioni e/o relazioni utilizzate in LS-DYNA [3].
Qui di seguito vengono riportate alcune delle grandezze di interesse per la definizione del problema termodinamico. Il volume specifico di riferimento ($v_0=1/\rho_0$) identifica la condizione nominale, in cui il materiale è in stato di tensione o deformazione nulla. Rappresenta una condizione unica, rispetto alla

quale viene computata la pressione nel materiale. Il volume relativo iniziale ($v_{r,t=0}=\rho_0/\rho|_{t=0}$), invece, definisce lo stato del materiale al tempo t=0, per cui permette di definire una condizione iniziale del sistema diversa da quella nominale di riferimento.
Il parametro volumetrico $\eta=\rho/\rho_0$ assume valori maggiori di 1 nel caso in cui il materiale sia compresso ($\rho > \rho_0$), minori di 1 se il materiale è in espansione ($\rho < \rho_0$) e nulli se al materiale non sono applicati carichi. Analogamente, il parametro volumetrico $\mu=\eta-1$ assume valori positivi se il materiale è compresso e negativi se il materiale sta espandendo.
In LS-DYNA, così come in molti altri codici FEM (come ad esempio Autodyn), le equazioni di stato implementate assumono, in generale, la forma espressa dalla prima delle eq. 4. Le variabili indipendenti risultano essere la densità e l'energia interna. Occorre specificare, però, a che tipologia di energia interna si fa riferimento, in base alla quale l' eq. 4 può assumere una delle seguenti forme:

$$P = P(v,e) = P(v_r, e_v) = P(\mu, e_{v_0}) \tag{7}$$

in cui e è l'energia interna specifica per unità di massa, e_v l'energia interna specifica per unità di volume corrente e e_{v0} l'energia interna per unità di volume di riferimento. In particolare, in LS-DYNA viene utilizzata l'ultima formulazione e la pressione viene calcolata come la somma di due componenti:

$$P = P_C(\mu) + P_T(\mu, e_{v_0}) = A(\mu) + B(\mu)e_{v_0} \tag{8}$$

Il primo termine, detto *cold curve*, è funzione solo della densità ed è ipoteticamente valutato lungo l'isoterma a 0 K. Il secondo termine esprime la dipendenza da densità ed energia interna. In maggior dettaglio, nelle EOS implementate la pressione è descritta tramite una generica funzione della densità, ma dipende linearmente dall'energia interna (eq. 8).
Nella meccanica del continuo, la densità è nota conoscendo la deformazione volumica:

$$\varepsilon_v = \ln\frac{\rho_0}{\rho} \tag{9}$$

In un codice FEM, l'energia è ottenuta tramite l'equazione di bilancio energetico, che in LS-DYNA è gestito direttamente dalla routine della EOS, per cui

$$\begin{aligned} e_{v0,\mathrm{NEW}} &= e_{v0,\mathrm{OLD}} + \Delta e_{v0} \\ \Delta e_{v0} &= \Delta e_{v0,\mathrm{dev}} + \Delta e_{v0,\mathrm{hydro}} + \Delta e_{v0,\mathrm{ext}} \end{aligned} \tag{10}$$

Questo significa, che ad ogni passo di integrazione, l'energia interna risulta essere pari alla somma dell'energia precedente e dell'incremento subito nel lasso di tempo tra due passi successivi. Tale incremento, a sua volta, è la somma del lavoro meccanico interno del sistema (sia deviatorico, cioè derivante dal lavoro plastico, che idrostatico, pari al lavoro reversibile) e della quantità di energia inserita nel sistema dall'esterno. Il conseguente incremento di temperatura è valutato in base a quanto espresso dall'eq. 2 e risulta corretto solo per la fase solida (C_v costante).

5. IMPATTO DI FASCI DI PARTICELLE AD ELEVATA ENERGIA

In questo paragrafo si riporta un esempio di modellazione numerica della propagazione di onde di shock all'interno del materiale. Il caso in esame riguarda, in particolare, le conseguenze relative all'impatto di un fascio di particelle ad elevata energia del Large Hadron Collider (LHC) con un componente metallico inizialmente solido.
LHC [8] è il principale progetto a cui il CERN (Centro Europeo per la Ricerca Nucleare) di Ginevra si affida per lo studio della fisica alle alte energie. È il più potente acceleratore di particelle mai costruito, in cui circolano, in senso opposto, due fasci di protoni, ognuno dei quali è formato da 2808 pacchetti (*bunches*), per un totale di 3.14×10^{14} protoni a 7 TeV (condizione di progetto). Il singolo pacchetto è lungo 0.5 ns e il tempo di attesa fra due pacchetti succhessivi è di 25 ns, quindi la durata complessiva del fascio è di 72 μs.

I componenti meccanici dell'acceleratore possono, sistematicamente o occasionalmente, interagire con il fascio. Le particelle ad alta energia, interagendo con i nuclei dei materiali, perdono la loro energia, che viene depositata sulla struttura colpita. Nel caso in cui, una grande quantità di energia sia depositata nel materiale, si ha la generazione di onde d'urto, la cui velocità di propagazione è superiore a quella del suono nel mezzo, rendendo rilevanti fenomeni di trasporto di massa.
Da qui in avanti si farà riferimento al caso di deposizione di energia estremamente veloce su un componente cilindrico in tungsteno (lunghezza 1 m, raggio 10 mm), colpito frontalmente al centro di una delle due basi (fig. 3) da 8 pacchetti di protoni (ognuno contenente 1.15×10^{11} protoni) a 7 TeV. Il problema che si sta affrontando è, come si vedrà meglio nel seguito, molto simile a un'esplosione, in cui il centro del componente è caricato e pronto ad esplodere.

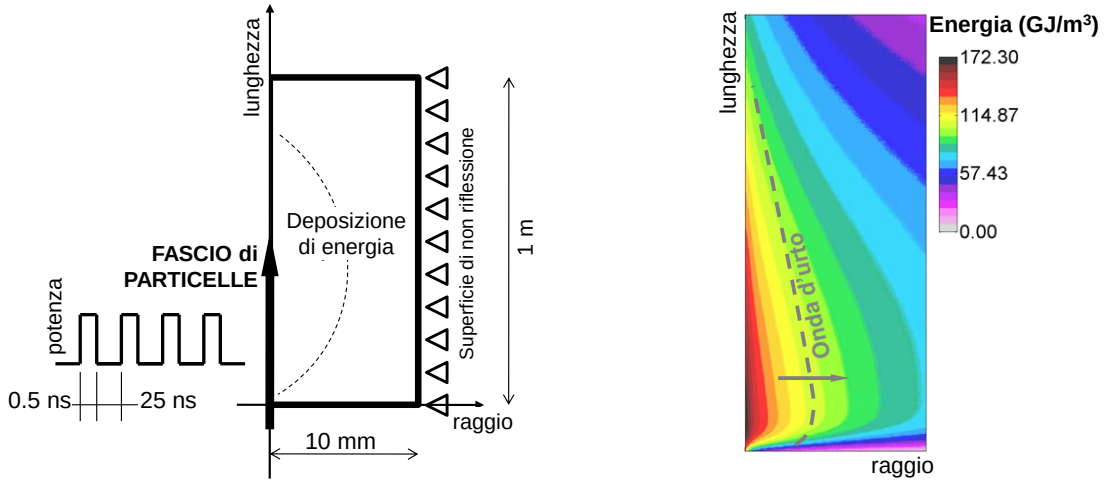

Fig. 3: schema del caso in esame (sinistra); deposizione di energia sul componente in esame (destra)

Il punto di partenza per questo tipo di simulazioni, è la distribuzione di energia depositata nel materiale da 1 *bunch* (fig. 3), ricavata dal gruppo FLUKA del CERN, mediante il codice statistico FLUKA [9,10], basato sul metodo Monte-Carlo. FLUKA restituisce la mappa in termini di energia (GeV/cm^3) in funzione delle coordinate spaziali del componente investito dal fascio. A tal proposito, è necessario suddividere il componente in esame in *bin*, su ognuno dei quali viene restituito il valore di energia corrispondente a 1 protone. Le variazioni di energia in funzione della coordinata spaziale sono molto più accentuate in funzione della coordinata radiale rispetto a quella assiale. In base a questa considerazione, è ragionevole aspettarsi la generazione di un'onda che propaghi radialmente (onda d'urto assialsimmetrica).

5.1. EOS tabulare del tungsteno

Nel codice FEM LS-DYNA, sono implementate diverse equazioni di stato, ma, in generale, sono adatte per la descrizione del comportamento del materiale relativamente a ristrette zone sulla superficie $P=f(\rho,E)$. Per il caso in esame, data l'elevata quantità di energia e l'ampiezza dell'onda d'urto generata, è necessario modellare correttamente un ampio intervallo di stati della materia al variare di densità ed energia. Per questo motivo è stata utilizzata una EOS tabulare muti-fasica [11]. In fig. 4 si riportano gli andamenti delle due variabili dipendenti in funzione della densità e al variare della temperatura. Purtroppo in LS-DYNA non è possibile definire direttamente una EOS di questo tipo. Si è deciso, quindi, di sfruttare la formulazione polinomiale:

$$\begin{aligned} P &= C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + \left(C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2\right)E \qquad (\mu > 0) \\ P &= C_0 + C_1\mu + C_3\mu^3 + \left(C_4 + C_5\mu\right)E \qquad (\mu < 0) \end{aligned} \tag{11}$$

definendo in maniera opportuna i coefficienti. Per questa tipologia di EOS, in LS-DYNA, è possibile definire sia il valore di energia iniziale, corrispondente al tempo t=0, che una curva in termini di potenza in funzione del tempo. Per poter spiegare la logica utilizzata per la determinazione dei coefficienti, è necessario prima descrivere il modello numerico (fig. 3). Il modello realizzato è un

modello bidimensionale assialsimmetrico, in cui la dimensione degli elementi (a singolo punto di integrazione) coincide con quella dei *bin* del modello FLUKA. La superficie esterna del cilindro è stata modellata come superficie di non-riflessione, in modo da simulare la presenza di altro materiale (non interessato dalla deposizione di energia). Nota la quantità di energia da depositare in ogni *bin*/elemento e la durata di ogni singolo bunch, è stata calcolata la potenza corrispondente. In LS-DYNA, l'unico modo per assegnare a elementi diversi energie (o potenze) termiche diverse è definire una EOS per ogni livello energetico. La simulazione della deposizione di 8 pacchetti di protoni (5 ns di deposizione effettiva e 25 ns di vuoto per ognuno, per un totale di 204 ns) e della successiva fase di espansione (fino a 1 μs) è stata suddivisa in nove simulazioni sequenziali, gestite attraverso una routine esterna sviluppata in MATLAB: le simulazioni sono state interrotte prima dell'arrivo di ogni nuovo *bunch*, per essere riprese mediante inizializzazione delle grandezze. Per ogni elemento (o livello di energia) sono stati ricavati i coefficienti della EOS polinomiale sulla base dell'interpolazione di una limitata porzione di EOS tabulare centrata nell'intorno del punto (E_i,ρ_i) corrispondente allo stato in cui si troverà ogni singolo elemento dopo l'arrivo del pacchetto di protoni. L'identificazione di tale punto viene effettuata conoscendo il livello di energia al quale viene portato l'elemento (dopo la deposizione) e supponendo che la deposizione avvenga in maniera isocora, ovvero sulla base della densità alla quale si trova il materiale inizialmente (prima della deposizione). Il fatto di interrompere la simulazione, permette di poter cambiare, tra una simulazione e l'altra, i coefficienti delle EOS. I questo modo è stato possibile definire semplici EOS polinomiali, che però fossero rappresentative di una EOS multi-fasica.

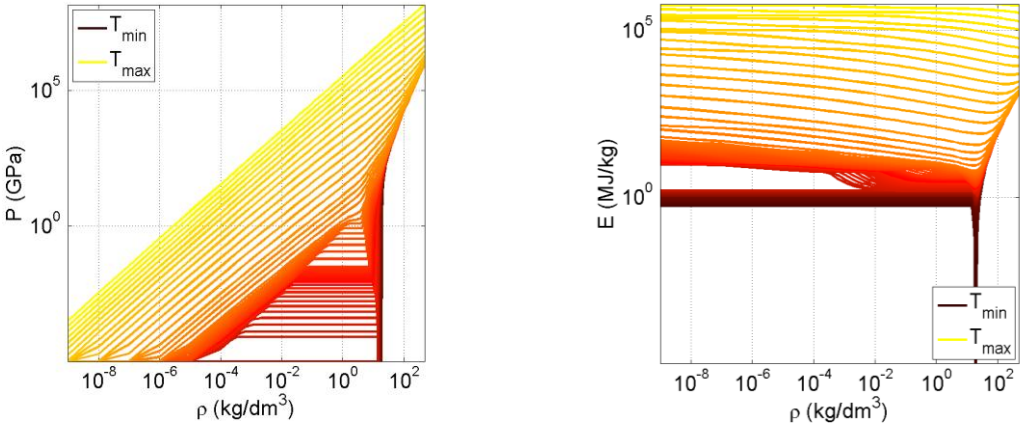

Fig. 4: EOS tabulare per il tungsteno [11]: pressione ed energia interna in funzione della densità al variare della temperatura.

5.2. Risultati

I risultati in termini di pressione e densità, relativi a quattro tempi della simulazione (uno a circa metà e uno alla fine della deposizione e due in fase di rilascio), sono riportati in fig. 5 e 6.

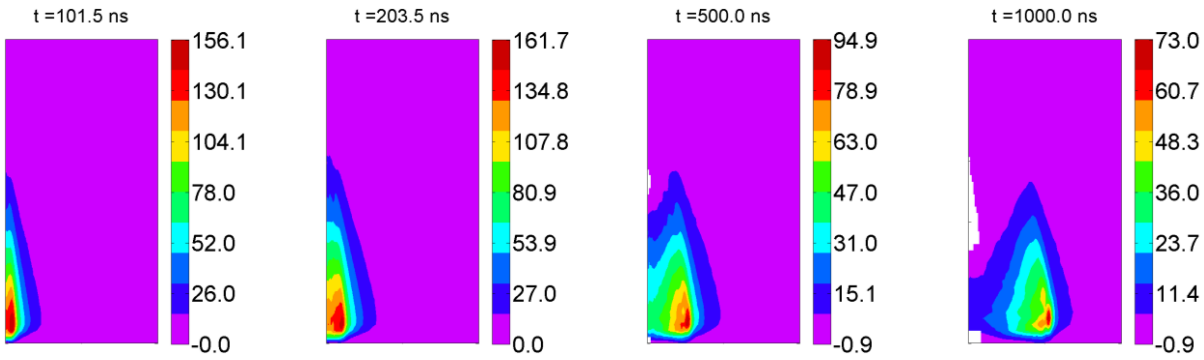

Fig. 5: Andamento della pressione (GPa): raggio 0÷10 mm (→), lunghezza 0÷1 m

La crescita di pressione che si verifica al centro del componente, giustifica la supposizione che l'evoluzione che ne deriva sia simile a quello che capita in seguito a un'esplosione. Durante la successiva fase di espansione si verifica la propagazione di un'onda d'urto che si muove radialmente dal centro del componente. Si fa notare che è stato definito un modello di cancellazione degli elementi (parti bianche) per evitare eccessive distorsioni della mesh lagrangiana in elementi che raggiungono valori di densità molto bassi. Inoltre, in questo modo si esclude che questi elementi possano essere soggetti a pressioni negative (condizione che fisicamente può essere sopportata solo dal materiale in fase solida).

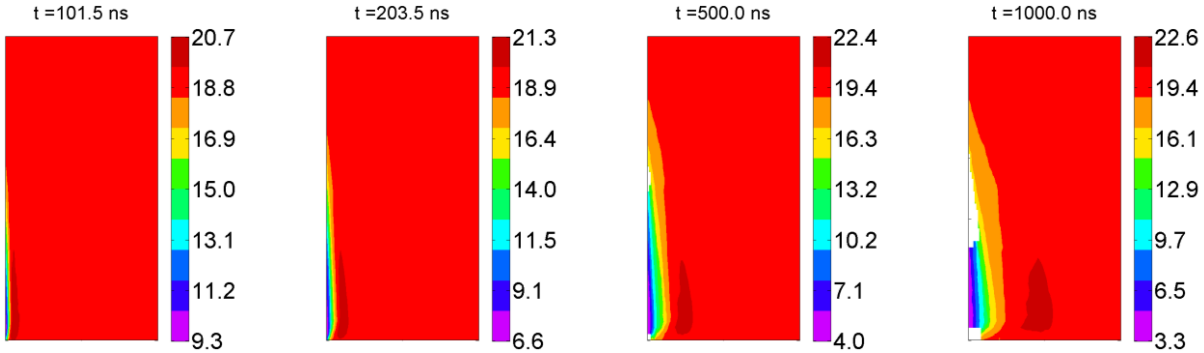

Fig. 6: Andamento della densità (kg/dm^3): raggio 0÷10 mm (→), lunghezza 0÷1 m

In fig. 7 sono riportati gli andamenti temporali della pressione sia per elementi che si trovano nel cuore della deposizione che per elementi a una certa distanza radiale, i quali vengono successivamente investiti dal fronte d'onda che propaga nel materiale. L'andamento è ben in accordo con quanto riportato in fig. 2: osservando quello che capita al variare del tempo in un punto, si nota che il passaggio del fronte d'onda provoca un aumento della pressione, che successivamente decade a causa del rilascio. In fig. 8 è, invece, riportato l'andamento della pressione in funzione della coordinata radiale fissato il tempo e per diverse coordinate longitudinali. Questi diagrammi mettono ben in evidenza il movimento e il percorso del fronte d'onda. Al tempo iniziale il profilo di pressione ricopia (a meno di un fattore di scala) l'andamento dell'energia. Con l'avanzare del tempo, si muove radialmente riducendo l'intensità, in seguito al fatto che investe una porzione di materiale sempre maggiore. Anche in questo caso, l'andamento è paragonabile a quello atteso illustrato in fig. 2: fissato il tempo e identificata la posizione del fronte d'onda, si nota come il materiale dietro al fronte sia in fase di rilascio (la pressione scende rispetto al tempo precedente), mentre il materiale oltre al fronte d'onda permane nella condizione indistrurbata fino all'arrivo dell'onda.

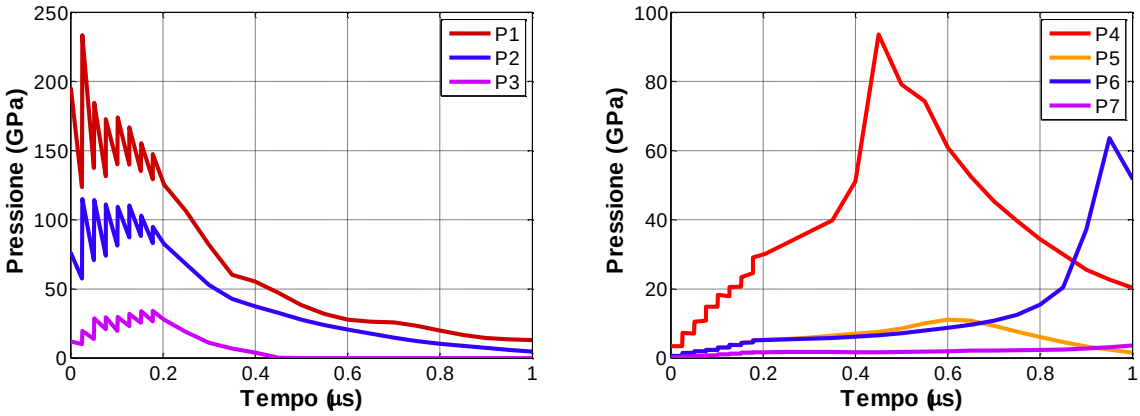

Fig. 7: Andamento della pressione in funzione del tempo fissato il punto di osservazione: a sinistra, P1: r=0 mm e L=6 cm; P2: r=0 mm e L=25 cm; P3: r=0 mm e L=50 cm (elementi situati nella zona di massima deposizione); a destra P4: r=2.5 mm and L=6 cm; P5: r=2.5 mm and L=50 cm; P6: r=5 mm and L=6 cm; P7: r=2.5 mm and L=50 cm (elementi situati nella periferia della zona di massima deposizione)

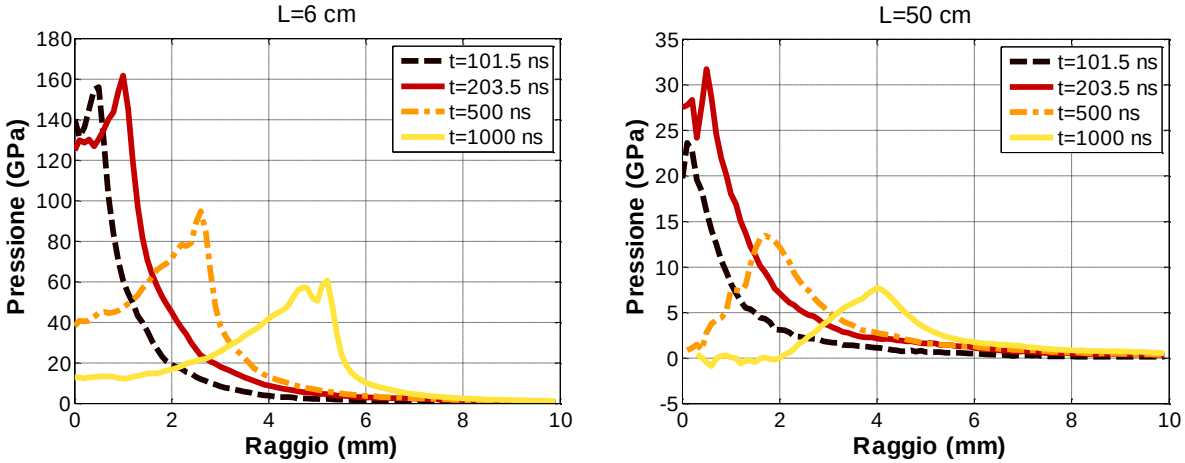

Fig. 8: Andamento della pressione in funzione della coordinata radiale al variare del tempo per due diversi valori della coordinata longitudinale

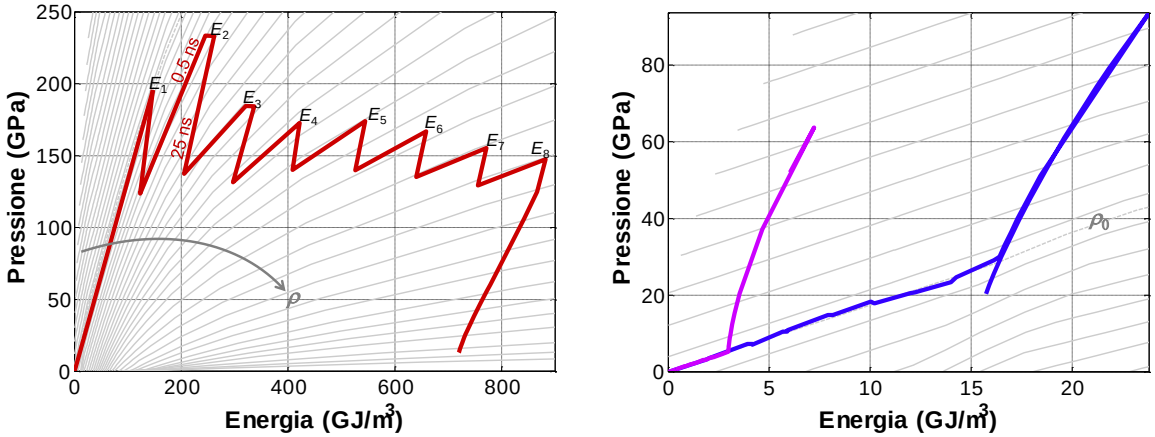

Fig. 9: Percorso (ottenuto dalla simulazione a fronte della definizione di EOS polinomiali) sulla EOS tabulare originale (linee sottili chiare) per l'elemento in cui è stato deposto il livello massimo di energia (sinistra), per un elemento esterno alla zona di massima deposizione (destra, blu) e per un elemento sulla superficie esterna (destra, magenta)

In fig. 9 sono riportati i percorsi effettuati nel piano *P-E-ρ* da tre elementi, uno situato in corrispondenza del punto di massima deposizione e due a una certa distanza radiale. Nel primo caso si può notare come ogni singola deposizione avvenga lungo un'isocora e sia seguita da una successiva fase di espansione durante i 25 ns che separano due bunch successivi. Il fatto che la deposizione avvenga a densità costante giustifica la metodologia applicata per l'identificazione dei coefficienti dell'interpolazione polinomiale: il tempo di deposizione è talmente breve da essere inferiore al tempo caratteristico di risposta idrodinamica del sistema, per cui la trasformazione è isocora. Per l'elemento in cui è stata deposta una grande quantità di energia, dopo l'arrivo di 8 *bunch*, inizia la fase di rilascio, che perdura fino a fine simulazione. Al contrario, un elemento situato lontano dalla zona di massima deposizione permane abbastanza indisturbato durante la fase di deposizione (basso livello di energia), ma subisce un significativo aumento della pressione al passaggio del fronte d'onda.Sulla base dei differenti comportamenti riportati in fig. 9, si vuole porre l'attenzione sul fatto che in questa tipologia di problemi, la pressione raggiunge livelli molto elevati solo nella zona in cui si depone una grande quantità di energia. Questo, comporta un significativo aumento della temperatura, che, quindi, implica il passaggio di stato del materiale. Al contrario, in uno shock meccanico classico (derivante, per esempio, da un impatto fra due componenti) la pressione raggiunge livelli elevati, ma con un modesto incremento della temperatura. La corretta riproduzione di generazione e propagazione dell'onda di shock è vincolata a una corretta modellazione del comportamento termodinamico del materiale, per cui è fondamentale essere in grado di portare ogna porzione di materiale a lavore nella corretta zona del piano *P-E-ρ*. Nel caso in cui si utilizzasse una EOS senza il termine energetico, in un problema di

questo tipo, sarebbe necessario portare il materiale nelle corrette condizioni, definendo lo stato del sistema mediante P e ρ.

6. CONCLUSIONI

In questo lavoro è stata messa in evidenza l'importanza di utilizzare una equazione di stato multi-fasica nella simulazione numerica di propagazione di onde di shock, generate in seguito all'impatto di un fascio di protoni a 7 TeV del Large Hadron Collider (LHC) con un cilindro in tungsteno, colpito perpendicolarmente al centro di una delle due basi. Date l'elevata quantità di energia e l'ampiezza dell'onda d'urto generata, è necessario modellare correttamente un ampio intervallo di stati della materia al variare di densità ed energia.
Le particelle ad alta energia, interagendo con i nuclei dei materiali, perdono la loro energia, che viene depositata sulla struttura colpita. Nel caso in cui, una grande quantità di energia sia depositata nel materiale in un tempo molto breve, si ha la generazione di onde d'urto. Al centro del componente si verifica un repentino e significativo aumento di pressione, per cui il fenomeno risulta essere simile a un'esplosione o ad uno *shocktube*. A fine deposizione, inizia la fase di rarefazione, in cui il fronte d'onda propaga radialmente, investendo aree sempre maggiori. Il materiale che si trova a monte del fronte d'onda è, in questa fase, soggetto a diminuzioni in termini sia di pressione che di densità. Al contrario, il materiale che inizialmente si trova a una certa distanza dalla zona di massima deposizione, permane nel suo stato indisturbato, fino all'arrivo del fronte d'onda, che lo comprime. In questi fenomeni lo shock è conseguente al fatto che lo stato del materiale viene portato in una nuova condizione di pressione in seguito ad un repentino aumento della sua energia interna. Da questo deriva che la corretta modellazione di generazione e propagazione dell'onda di shock sia vincolata a una corretta descrizione del comportamento termodinamico del materiale, per cui è fondamentale essere in grado di portare ogni porzione di materiale a lavore nella corretta zona della sua equazione di stato.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato svolto nell'ambito del WP 8 "Colmat" del progetto europeo EUCARD (VII Programma Quadro). Si ringraziano per la collaborazione il FLUKA Team e il gruppo EN/MME del CERN e J. Kerley.

BIBLIOGRAFIA

[1] Adkins, C.J., "Equilibrium thermodynamics", Cambridge University Press (Cambridge Cambridgeshire and New York) ISBN 0521254450 (1983)
[2] Eliezer S., Ghatak A. K., Hora H., "Fundamentals of Equations of State", World Scientific Pub Co Inc. (2002)
[3] Gladman B et al., "LS-DYNA® Keyword User's Manual – Vol. I – Version 971", LSTC (2007)
[4] "ANSYS AUTODYN User's Manual – Release 2010", ANSYS Inc. (2010)
[5] Meyers M. A., "Dynamic behavior of materials", John Wiley & Sons, Inc. (1994)
[6] Scapin M., Peroni L., Dallocchio A., "Effects induced by LHC high energy beam in copper structures", Journal of Nuclear Materials, 420, pp. 463-472 (2012)
[7] Tahir N.A., Goddard B., Kain V. et al., "Impact of 7-TeV/c large hadron collider proton beam on a copper target", Appl. Phys. 97 (2005)
[8] Petterson T.S., Lefèvre P., "The Large Hadron Collider: conceptual design", CERN Desktop Publishing Service, Geneve (1995)
[9] Battistoni G., Muraro S., Sala P.R., Cerutti F., Ferrari A., Roesler S., Fasso` A., Ranft J., "The FLUKA code: Description and benchmarking", Proceedings of the Hadronic Shower Simulation Workshop (2006), M. Albrow, R. Raja eds., AIP Conference Proceeding 896, 31-49, (2007)
[10] Fasso A., Ferrari A., Ranft J. and Sala P.R., "FLUKA: A Multi-Particle Transport Code", CERN-2005-10, INFN/TC_05/11, SLAC-R-773 (2005)
[11] Kerley G.I., "Equations of State for Be, Ni, W, and AU", SAND2003-3784 (2003)