CAPITOLO 16
La simulazione del danno

16.1 Introduzione

In alcune circostanze può essere utile vedere cosa succede se una parte di una struttura o di un componente dovesse non solo entrare in campo plastico, come abbiamo visto nel Capitolo 13, ma addirittura raggiungere la rottura. Sono chiaramente situazioni molto particolari, per le quali si può pensare di procedere modellando il comportamento del materiale a rottura.

Si può facilmente intuire che i risultati di queste simulazioni sono fortemente dipendenti dai dati in ingresso che descrivono il meccanismo di innesco del danno nel materiale e della sua evoluzione. Nei prossimi paragrafi vedremo come modellare il danno per i materiali duttili, per i materiali compositi e per l'incollaggio tra parti.

16.2 Il danno nei materiali duttili

Per trattare questo caso riprendiamo l'esempio della figura 13.16 del Capitolo 13; alla trave applichiamo una lavorazione meccanica in mezzeria atta a ridurne la sezione, come riportato nella figura 16.1.

Inoltre, anziché applicare una coppia in direzione z a una delle due estremità, applichiamo una rotazione in modo da avere meno difficoltà di convergenza (si veda anche il Capitolo 11).

Da ultimo utilizziamo un materiale con comportamento elasto-plastico schematizzabile con un modello bilineare, come quello riportato nella figura 16.2.

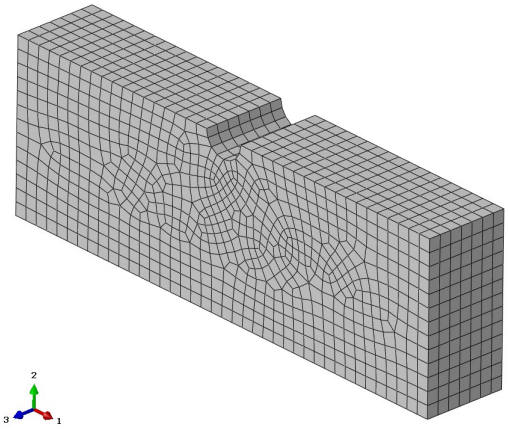

Figura 16.1. Trave modellata con elementi brick a 8 nodi. L'intaglio è stato creato per favorire l'inizio della rottura.

Fino a qui niente di troppo diverso rispetto a quanto abbiamo fatto nel Capitolo 13. Se però vogliamo vedere cosa succede oltre il limite a rottura, dobbiamo anche costruire un modello di materiale atto a descriverne il comportamento dopo la rottura. Si può procedere in diversi modi e alcuni codici mettono già a disposizione dei modelli di comportamento dopo la rottura: chiaramente quello più generale prevede l'inserimento di dati tabulari in arrivo da prove sperimentali.

Il modello più semplice, che qui useremo, prevede un andamento lineare del danno da 0 a 1.

Con riferimento alla figura 16.2 abbiamo supposto che il materiale sia completamente danneggiato (danno pari a 1) dopo un ulteriore allungamento dell'1% oltre il carico di rottura (danno pari a 0).

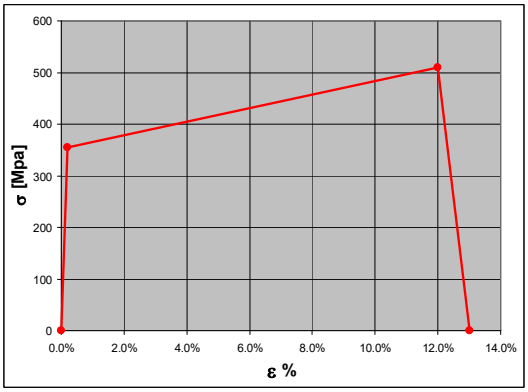

Figura 16.2. Curva stress-strain bilineare per l'acciaio S355. Dopo il carico di rottura si è supposto che il materiale si danneggi completamente per un allungamento ulteriore dell'1%.

Per descrivere questa ulteriore parte ci sono almeno due diversi metodi: uno spostamento limite da imporre nella descrizione del materiale oppure un'energia associata alla rottura; il primo metodo è di più difficile interpretazione e potrebbe essere legato alla dimensione caratteristica degli elementi della mesh, mentre il secondo è più facilmente comprensibile: infatti, se guardiamo alla figura 16.2, possiamo dire che l'energia associata al danno del materiale è data dall'area del triangolo con base pari a 0.01 e altezza pari al carico di rottura, ossia $510 \cdot 0.01 \cdot 0.5 = 2.55$ mJ/mm^3.

Una volta forniti questi dati proviamo a eseguire il calcolo, ottenendo i risultati della figura 16.3.

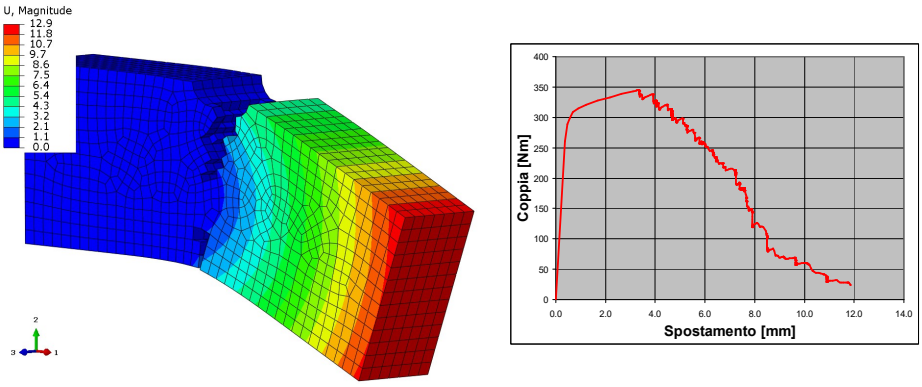

Figura 16.3. Risultati del calcolo con danno del materiale: cancellazione degli elementi che hanno danno pari a 1 (a sinistra) e andamento della coppia applicata in funzione dello spostamento del punto di applicazione (a destra).

Come si può vedere il codice di calcolo cancella gli elementi il cui danno è pari a 1 e, chiaramente, anche nel calcolo non vengono più considerati. In questo modo la coppia tenderà ovviamente a zero quando tutti gli elementi della sezione avranno danno pari a 1.

Vediamo ad esempio cosa succede se tiriamo la piastra della figura 16.4, imponendo uno spostamento pari a 5 mm all'estremità di destra. Il materiale impiegato e il modello di danno sono i medesimi usati per l'esempio precedente.

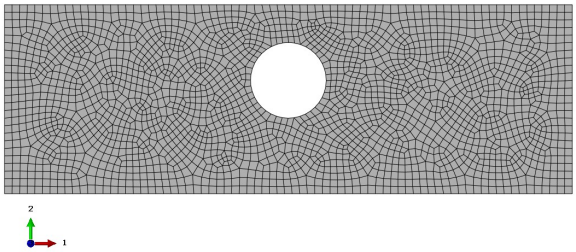

Figura 16.4. Piastra forata: lunghezza = 60 mm, altezza = 20 mm, spessore = 2 mm, diametro foro = 8 mm; il centro del foro è disassato di 2 mm per facilitare l'innesco della rottura.

In questo caso il codice riesce a convergere fino alla fine e produce i risultati della figura 16.5, dove, come si vede, la forza crolla a zero una volta che si arriva alla rottura completa della sezione.

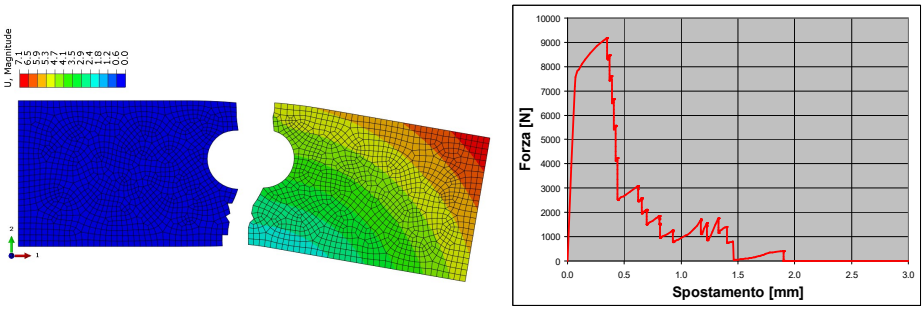

Figura 16.5. Risultati del calcolo con danno del materiale: cancellazione degli elementi che hanno danno pari a 1 (a sinistra) e andamento della forza applicata in funzione dello spostamento del punto di applicazione (a destra).

Osservazioni

Non capita di frequente di dover ricorrere ad analisi che vadano oltre il campo plastico di un materiale duttile; tuttavia a volte è necessario esplorare le condizioni che si presentano quando ampie parti di una struttura hanno raggiunto il collasso; in genere questo tipo di analisi è riservato alla simulazione del crash, che però avviene ad alta velocità ed è solitamente territorio dei codici espliciti (cfr. Capitolo 14).

L'accuratezza dei risultati che si ottengono è fortemente dipendente dai dati inseriti per modellare il comportamento del danno; chiaramente fornire energie più alte comporterà una "vita" più lunga per gli elementi che in seguito verranno cancellati.

Dal punto di vista numerico, poi, va tenuto presente che si tratta di calcoli decisamente complessi, che richiedono molte iterazioni con incrementi decisamente piccoli: occorre introdurre una stabilizzazione della soluzione (e in genere i codici hanno già un valore di default che va bene nella maggioranza delle situazioni) e magari prevedere che il codice "sia pronto" a gestire una matrice di rigidezza che può, nei modelli di

materiale che prevedono il danno, diventare non simmetrica (ricordiamo per inciso che anche il contatto con attrito rende la matrice non simmetrica).

16.3 Il danno nei materiali compositi

Rispetto al caso dei materiali duttili, il danno nei materiali compositi ha un maggior interesse in quanto, avendo i compositi in generale un comportamento fragile, potrebbe essere utile andare oltre il criterio della "first ply failure" (cfr. § 10.4), con l'intento di ridurre ulteriormente la massa in gioco, tollerando di avere magari delle rotture parziali per tutte le condizioni di carico eccezionali generate da eventi a seguito dei quali l'ispezione e l'eventuale sostituzione del pezzo sono richieste. Rispetto ai materiali duttili, i dati da fornire per poter simulare il danno sono molteplici, in quanto riguardano il comportamento a compressione e trazione nella direzione delle fibre e in quella trasversale e il comportamento a taglio. Molti codici mettono a disposizione il criterio di Hashin, valido per i teli unidirezionali, ma estendibile ai teli tessuti con le dovute cautele; i dati da fornire sono, oltre ai soliti valori limite di rottura, le energie per i vari modi di rottura. Se risulta necessario utilizzare criteri diversi, allora non rimane altro da fare che crearsi un modello di danno del materiale all'interno del codice in uso, cosa che richiede un minimo di capacità di programmazione.

Nel seguito vedremo nel dettaglio un esempio in cui si sfrutta il criterio di Hashin.

In figura 16.6 riportiamo il modello di una piastra vincolata lungo tutti i lati nelle tre traslazioni (rotazioni libere) caricata con una pressione di 0.25 MPa e con il laminato riportato nella stessa figura. Il materiale è uno solo, un telo unidirezionale, le cui caratteristiche meccaniche sono riportate nelle tabelle 16.1 e 16.2.

Se però avessimo una condizione di pressione eccezionale per cui vogliamo che la piastra non collassi completamente, pur tollerando delle rotture e delle deformazioni residue, possiamo provare a modellare l'innesco del danno e la sua evoluzione per vedere cosa accade. Sottolineiamo che non riportiamo qui i valori delle energie che portano alla rottura nelle diverse direzioni per il materiale impiegato, in quanto sono stati ipotizzati e non hanno un effettivo riscontro con prove sperimentali.

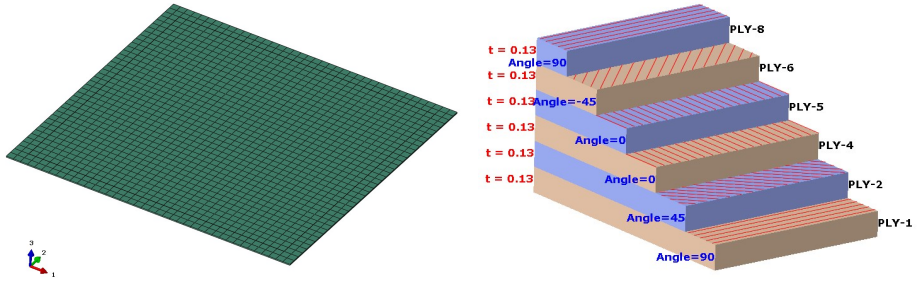

Figura 16.6. Piastra (200 x 200 mm) vincolata lungo i quattro lati nelle tre traslazioni (a sinistra). A destra si riporta il laminato: il telo numero 1 (ply-1) è quello che si trova sotto nella vista 3D del modello e lo spessore totale è di 0.78 mm (0.13 mm per ogni telo).