

Capitolo 5

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi si è occupato dello studio sul comportamento non lineare dei materiali compositi con microstruttura eterogenea e periodica.

In particolare, nella prima parte è stato trattato il problema della previsione dei meccanismi di danneggiamento indotti da fenomeni di instabilità strutturali, per i materiali compositi con microstruttura periodica, nell'ambito delle deformazioni finite. Tale aspetto è di grande importanza poiché un'accurata analisi di stabilità, che tenga in considerazione una precisa descrizione della microstruttura del materiale composito, coinvolge diverse complicazioni dovute alla complessità della configurazione micro strutturale ed all'evoluzione delle proprietà costitutive e geometriche nell'ambito delle deformazioni finite. Criteri basati sulle proprietà costitutive omogeneizzate potrebbero non essere in grado di fornire una stima conservativa dei fenomeni di instabilità microscopica. La condizione macroscopica fondamentale introdotta in letteratura, corrispondente alla condizione di ellitticità forte del tensore dei moduli tangenti omogeneizzati, è capace di fornire una stima esatta del carico critico di instabilità microscopica solo quando il modo di instabilità microscopico è di natura globale. Al contrario, si ottiene una stima non conservativa quando il modo di instabilità è di natura locale.

A tal proposito un'analisi di stabilità sia macroscopica che microscopica è stata proposta per materiali con un comportamento incrementalmente lineare. Inoltre sono state introdotte misure alternative di stabilità macroscopica, basate sulla definizione di positività del tensore dei moduli omogeneizzati associato a diverse misure coniugate di tensione-deformazione, studiandone a tal riguardo la loro abilità di ottenere una stima conservativa del carico di instabilità primaria per la microstruttura.

È stata sviluppata una procedura, utilizzando il codice commerciale agli elementi finiti COMSOL MULTIPHYSICSTM, al fine di risolvere in modo sequenziale il problema di equilibrio della cella unitaria, i problemi incrementali di equilibrio che forniscono i moduli tangenti omogeneizzati e il problema di stabilità agli autovalori lungo un percorso di macrodeformazione assegnato. La metodologia sviluppata è stata applicata a due tipi di microstrutture, di cui la prima di tipo poroso e la seconda rappresentativa dei materiali che presentino all'interno una inclusione la quale può essere più o meno rigida. A tali microstrutture sono state associate due energie di deformazione iperelastiche adottando un materiale tipo Gent e Neo-Hookean compressibile.

Le applicazioni numeriche hanno evidenziato che la sequenza delle instabilità dipende sia dalla natura del percorso di carico che dal tipo di microstruttura. Di conseguenza, una previsione conservativa del carico di instabilità microstrutturale può essere ottenuto utilizzando un appropriato criterio di stabilità macroscopico. I risultati evidenziano inoltre che per quanto riguarda la trazione, una previsione conservativa della regione di stabilità microscopica può essere ottenuta utilizzando la definizione di positività per il tensore dei moduli omogeneizzati collegato alle misure coniugate di deformazione di *Biot* o di *Eulero-Lagrange*. D'altra parte, una previsione conservativa in compressione può essere ottenuta utilizzando le misure basate sul tensore dei moduli omogeneizzati caratterizzati dall'avere una curvatura della funzione di scala di Hill negativa, più piccola della misura di deformazione logaritmica (la misura di deformazione di *Almansi-Hamel*, per esempio).

Nella seconda parte, nell'ambito delle deformazioni infinitesime, sono stati trattati i fenomeni di non-linearità dovuti alla presenza di microfratture nella microstruttura. A tale proposito, al fine di stimare l'accuratezza del modello micro-meccanico presentato nel terzo capitolo, è stato effettuato un confronto, per una configurazione fissata del danneggiamento, in termini di energia di rilascio tra un'analisi diretta (che tiene conto esplicitamente dalla microstruttura), e l'analisi omogeneizzata.

Nell'analisi diretta di una struttura composita 2D costituita da un arrangiamento regolare di 5x5 celle unitarie, è stata sottoposta a due diverse condizioni di carico. In particolare nel primo caso viene imposto uno spostamento in direzione perpendicolare alle microfratture, vincolando con un incastro il lato opposto. Pertanto in questo primo

caso non si ha la presenza del contatto tra le facce delle microfratture. Contrariamente nella seconda condizione di carico, si impone lo spostamento in direzione parallela alle microfratture, introducendo pertanto la presenza del contatto.

Al fine di ricavare i valori dell'energia di rilascio ad ogni tip delle microfratture nell'analisi omogeneizzata è stata proposta una procedura computazionale, la quale risulta molto semplice in assenza di contatto mentre si complica in presenza del contatto risulta molto complessa. Tale complessità deriva dal fatto che bisogna prendere in considerazione, nell'analisi omogeneizzata, la dipendenza dalla direzione della macro-deformazione, la quale può variare da cella a cella.

I risultati delle analisi numeriche hanno evidenziato che in assenza del contatto i valori più accurati dell'energia di rilascio si ottengono quando si impongono le condizioni al contorno di fluttuazioni periodiche nell'analisi omogeneizzata. In particolare trascurando il contorno, la percentuale di errore risulta pari al 3.32%. Contrariamente includendo anche il bordo la percentuale di errore aumenta attestandosi sul 14.8%. Pertanto la condizione al contorno di fluttuazioni periodiche è capace di rappresentare in modo accurato i risultati dell'analisi diretta.

D'altra parte, quando si prende in considerazione il contatto tra le facce delle microfratture gli errori, in termini di energia di rilascio tra l'analisi diretta e l'analisi omogeneizzata, aumentano sensibilmente. Tali percentuali di errori così elevati sono da imputarsi alla presenza del contatto ed inoltre all'effetto di gradienti macroscopici nell'analisi.

Al fine di isolare gli effetti dovuti ai gradienti macroscopici è stata analizzata un'altra condizione di carico sostituendo il vincolo incastro con un vincolo rullo. In questo caso, nonostante la presenza del contatto, gli errori diventano accettabili soprattutto per quanto riguarda la condizione al contorno di fluttuazioni periodiche, con un valore massimo, trascurando gli effetti di bordo, pari a 31.53%.