



Ph.D. COURSE IN INDUSTRIAL ENGINEERING – XXX CYCLE

Student: Venanzio Giannella

Tutor: Roberto Guglielmo Citarella

Abstract of the thesis

To comply with fatigue life requirements, it is often necessary to carry out fracture mechanics assessments of structural components undergoing cyclic loadings. Fatigue growth analyses of cracks is one of the most important aspects of the structural integrity prediction for components (bars, wires, bolts, shafts, etc.) in presence of initial or accumulated in-service damage. Stresses and strains due to mechanical as well as thermal, electromagnetical, etc., loading conditions are typical for the components of engineering structures. The problem of residual fatigue life prediction of such type of structural elements is complex, and a closed form solution is usually not available because the applied loads not rarely lead to mixed-mode conditions.

Frequently, engineering structures are modelled by using the Finite Element Method (FEM) due to the availability of many well-known commercial packages, a widespread use of the method and its well-known flexibility when dealing with complex structures. However, modelling crack-growth with FEM involves complex remeshing processes as the crack propagates, especially when mixed-mode conditions occur. Hence, extended FEMs (XFEMs) and meshless methods have been widely and successfully applied to crack propagation analyses in the last years. These techniques allow a mesh-independent crack representation, and remeshing is not even required to model the crack growth. The drawbacks of such mesh independency consist of high complexity of the finite elements, of material law formulation and solver algorithm.

On the other hand, the Dual Boundary Element Method (DBEM) both simplifies the meshing processes and accurately characterizes the singular stress fields at the crack tips (linear assumption must be verified). Furthermore, it can be easily used in combination with FEM and, such a combination between DBEM and FEM, allows to simulate fracture problems leveraging on the high accuracy of DBEM when working on fracture, and on the versatility of FEM when working on complex structural problems.

Generally, FEM is used to tackle the global complex structural problem, assessing the fields of displacements, strains and stresses; subsequently, such fields are used to obtain the boundary conditions to apply on a DBEM submodel that bounds the region in which the crack is present. In this way, the fracture problem is solved in the DBEM environment allowing to take advantage of its inherently simpler remeshing process. Such FEM-DBEM “classical” approach is generally implemented under fixed either displacements or tractions boundary conditions applied on the DBEM

submodel cut surfaces, without updating of their values during the propagation; such boundary conditions are consequently hypothesized to be insensitive to the submodel stiffness variation due to the crack-growth, with the consequent introduction of an element of approximation. In case of traction boundary conditions the approach provides conservative results in terms of residual life cycles, whereas, non-conservative results are obtained in case of displacements boundary conditions. Interestingly, the proposed alternative approach provides results comprised between the upper and lower bounds given by such two classical approaches.

This work presents an enhanced FEM-DBEM submodelling approach to simulate fracture problems through the adoption of the principle of linear superposition. Theoretical background can be found in the literature, where the J -integral for a thermal-stress crack problem was retrieved by a simple application of a load distribution on the crack faces (as provided by the uncracked problem solution) instead than by application of the inherent displacement or traction condition on the model boundary. This idea has been here widely extended to more complex analyses allowing to solve fracture problems with very high accuracy by means of relatively simple DBEM stress analyses, even when the global analyses present thermal loads, contacts, friction, electromagnetic fields, etc. As a matter of fact, all the complexities are tackled by a global FEM analysis on the uncracked domain, whereas, the objectives of correctly predicting the whole crack-growth are completely demanded to the DBEM. The methodology has been validated comparing the results with those provided by different numerical approaches, like the well-established classical FEM-DBEM approaches or fully FEM based approaches, as available from literature.

Then, some industrial applications have been analysed by means of this new methodology showing that the procedure can also handle problems of higher complexity leading to an accuracy on the results that, in some cases, could not even be obtained with the classical approaches.



CORSO DI DOTTORATO IN INGEGNERIA INDUSTRIALE – XXX CICLO

Studente: Venanzio Giannella
Tutor: Roberto Guglielmo Citarella

Abstract della tesi

Per soddisfare gli odierni requisiti di vita a fatica, è spesso necessario effettuare valutazioni di meccanica della frattura sui componenti strutturali, soprattutto se sottoposti a carichi variabili nel tempo. L'analisi di propagazione di cricche a fatica è uno dei più importanti aspetti per la valutazione dell'integrità strutturale dei componenti (come ad esempio: travi, organi di trasmissione del moto, collegamenti filettati, alberi di trasmissione, ecc.) in presenza di difettosità iniziali o prodotte durante il funzionamento. Il problema della stima della vita a fatica residua di tali tipologie di elementi strutturali è complesso, e una soluzione in forma chiusa e tipicamente non disponibile poiché i carichi applicati non di rado portano a propagazioni in modo misto.

Frequentemente, le strutture ingegneristiche sono modellate con il metodo agli elementi finiti FEM grazie alla disponibilità di molti pacchetti software commerciali, all'ampio utilizzo del metodo ed alla sua ben nota flessibilità nel gestire analisi complesse. Ad ogni modo, modellare propagazioni di cricche con il FEM implica processi di remeshing via via più complessi con l'avanzare della cricca, specialmente quando si verificano condizioni di propagazione di modo misto. A tal proposito, l'eXtended FEM ed i metodi meshless sono stati ampiamente utilizzati con successo per analizzare propagazione di cricche negli ultimi anni. Tali tecniche permettono una rappresentazione della cricca indipendente dalla mesh e la fase di remeshing non è nemmeno richiesta per modellare tale propagazione. Ad ogni modo, ci sono svantaggi nell'avere tale indipendenza dalla mesh, ovvero: alta complessità degli elementi finiti, della formulazione delle leggi di materiale e degli algoritmi per la loro risoluzione.

Analogamente, il metodo duale agli elementi di contorno DBEM permette di semplificare sia il processo di remeshing e sia di caratterizzare accuratamente i campi tensionali singolari all'apice dei difetti (l'ipotesi di linearità dev'essere verificata). Inoltre, il DBEM può essere facilmente utilizzato in combinazione con il FEM e, tale accoppiamento tra DBEM e FEM, permette di simulare problemi di frattura sfruttando sia l'alta accuratezza del DBEM, quando si lavora sulla frattura, che la versatilità del FEM, quando si lavora su problemi strutturali complessi.

Generalmente, il FEM è utilizzato per risolvere il complesso problema strutturale, valutando i campi di spostamento, deformazione e tensione; consecutivamente, tali campi sono utilizzati per ottenere le condizioni al contorno da applicare ad un sottomodulo DBEM che contiene la regione in cui la cricca è presente. In tal modo, il problema di frattura è risolto nell'ambiente DBEM avvantaggiandosi quindi

del relativo processo di remeshing intrinsecamente migliore. Tale approccio classico FEM-DBEM è generalmente implementato con l'ipotesi di condizioni al contorno agli spostamenti o alle trazioni fisse applicate sulle superfici di ritaglio del sottomodello DBEM, senza quindi aggiornare tali valori durante la propagazione della cricca; conseguentemente, si assume che tali condizioni al contorno siano insensibili alla variazione della rigidità del sottomodello dovuta alla propagazione della cricca, con la conseguente perdita di accuratezza. Nel caso di condizioni al contorno alle trazioni, il relativo approccio FEM-DBEM produce risultati conservativi in termini di cicli di vita residui, mentre, nel caso di condizioni al contorno agli spostamenti, si ottengono risultati non conservativi. È quindi interessante notare che l'approccio alternativo qui proposto fornisce risultati più accurati compresi tra i limiti superiore ed inferiore forniti dai due approcci classici.

Questo lavoro di tesi presenta un approccio di sottomodellazione FEM-DBEM avanzato per la simulazione di problemi di frattura sfruttando il principio di sovrapposizione degli effetti. Alcuni richiami di teoria possono essere trovati in letteratura, dove il J -integral nel caso di analisi termomeccaniche poteva essere calcolato mediante la sola applicazione di un carico distribuito sulle facce della cricca (carico fornito dalla soluzione di un problema senza cricca), invece che dall'applicazione di condizioni al contorno agli spostamenti o alle trazioni sul contorno del modello. Tale idea è stata qui ampiamente estesa ad analisi più complesse permettendo quindi di risolvere problemi di frattura con elevata accuratezza mediante più semplici analisi meccaniche DBEM, anche quando le analisi globali presentano carichi termici, contatti con attrito, campi elettromagnetici, ecc. Infatti, tutte le complessità delle analisi sono considerate da analisi FEM globali sul modello non criccato, mentre, gli obiettivi di calcolare correttamente la propagazione dei difetti sono affidate al DBEM. Tale metodologia è stata validata confrontando i risultati con quelli forniti da diversi approcci numerici, come approcci classici FEM-DBEM, solo DBEM o anche approcci totalmente FEM.

Infine, alcune applicazioni industriali sono state analizzate mediante questa nuova metodologia, mostrando quindi che la procedura proposta può gestire anche problemi di più alta complessità fornendo una accuratezza dei risultati che, in alcuni casi, non poteva nemmeno essere ottenuta con gli approcci classici.