

Resumo

Neste trabalho, são apresentadas novas formulações relativas ao desenvolvimento de elementos finitos do tipo "casca" e "sólido-casca". A motivação principal deste estudo consiste na resolução de problemas estruturais não-lineares envolvendo componentes com reduzida espessura, através do Método dos Elementos Finitos. Em termos de aplicabilidade prática, é de realçar a possível utilização dos elementos finitos e procedimentos numéricos propostos e implementados em problemas industriais de conformação plástica em chapas finas.

Nesse sentido, foram desenvolvidos e implementados elementos finitos bilineares (tipo "casca") e trilineares (tipo "sólido-casca"), cujos respectivos funcionais baseiam-se em variáveis de deslocamentos. Do ponto de vista da discretização do meio contínuo por meio de elementos finitos, são utilizados como variáveis primárias campos de deslocamentos nodais. Formulações desse género são reconhecidamente deficientes na análise de estruturas com reduzidos valores de espessura, devido ao aparecimento de fenómenos numéricos de retenção (locking), que se revelam através de uma sobre-estimação dos valores de rigidez associados a determinadas componentes de extensão. Para elementos do tipo "casca", de baixa ordem, surge predominantemente a retenção associada às componentes de extensão fora do plano (transverse shear locking). Para o caso dos elementos do tipo "sólido-casca", também de baixa ordem, surge adicionalmente a retenção associada aos termos de extensão linear (componentes directas do tensor das extensões), caracterizando o que ficou conhecido como retenção volumétrica (volumetric locking). Como resultado global, numa dada malha de elementos finitos, assiste-se a uma completa deterioração dos valores de deslocamentos obtidos como solução pelo método ou, nos casos mais favoráveis, a uma taxa de convergência muito baixa para a solução correcta, mesmo em problemas puramente lineares. Em qualquer desses cenários, uma utilização eficiente do elemento finito em causa torna-se inviável.

Na resolução dos fenómenos de retenção descritos foi utilizado o conceito de "extensões acrescentadas" (enhanced assumed strain method), no qual cada elemento finito é "enriquecido" com variáveis adicionais, sem significado físico, responsáveis por providenciar modos de deformação impossíveis de ser obtidos por uma formulação puramente baseada em deslocamentos nodais. O número de variáveis internas a ser utilizado condiciona o desempenho computacional de um dado elemento, sendo muitas vezes escolhido de acordo com critérios empíricos de tentativa e erro. Neste trabalho, por outro lado, é utilizada uma filosofia de análise das bases dos subspaços de soluções admissíveis, para várias formulações publicadas na literatura especializada. Através dessa análise de bases, caracteriza-se o melhor ou pior comportamento de uma dada formulação e fundamenta-se assim a escolha quer do número de variáveis acrescentadas por elemento, quer das respectivas funções a elas associadas.

O resultado final consiste em uma nova classe de elementos finitos com um número óptimo de variáveis elementares (inferiores ao utilizado em propostas análogas por outros autores) e com bons desempenhos

numa série de testes lineares e não-lineares (plasticidade, instabilidade e contacto). A implementação do método das extensões acrescentadas é feita de forma simplificada comparativamente a outras propostas na literatura, o que torna a tarefa de implementação numérica particularmente simples. A implementação de algoritmos para o tratamento de não-linearidades de material e geométrica é feita adoptando-se uma formulação co-rotacional a cada elemento finito, intuitiva no tratamento de problemas gerais envolvendo grandes (ilimitados) deslocamentos e rotações. Essa formulação co-rotacional permite, adicionalmente, o tratamento matemático objectivo de fenómenos envolvendo grandes deformações, com o aliciante de exigir uma implementação computacional relativamente simples e elegante. Não-linearidades relacionadas com problemas envolvendo situações de contacto, com ou sem atrito, foram resolvidas através da implementação dos elementos finitos propostos no código comercial Abaqus (user-elements implementation).

No fim do trabalho, é apresentada uma série de benchmarks numéricos, lineares e não-lineares, comumente adoptadas na literatura. Adicionalmente, é efectuado um estudo sobre um componente industrial (S-Rail benchmark), envolvendo plasticidade, grandes deformações e contacto com atrito, por forma a demonstrar a fiabilidade dos procedimentos implementados em problemas industriais. Os resultados obtidos atestam acerca robustez dos elementos finitos propostos, bem como dos algoritmos numéricos implementados.

Abstract

In the present work, new formulations for shell and solid-shell finite elements are developed. The main goal of the present study is the correct numerical and computational analysis of nonlinear structural problems, involving components with reduced thickness values, and employing the Finite Element Method. In practical terms, it is interest to highlight the direct application of the proposed and implemented finite elements and numerical procedures to industrial sheet metal forming problems.

Within this scope, new bilinear shell type and trilinear solid-shell type finite elements were formulated and implemented, based on displacement variables. Going from the continuum media to the discretized finite element space, nodal displacement variables were taken into account. Displacement-based formulations are known to be affected by locking effects, characterized by an overestimation of determined stiffness. For the bilinear displacement-based shell elements, locking appearance is triggered mainly by the numerical treatment of low thickness values in the structure (transverse shear locking). For the specific case of low-order solid-shell displacement-based finite elements, and besides the locking referred before, volumetric locking is also prone to appear. The latter involves the direct components of the strain tensor, and is related to the numerical inability of a given formulation to automatically reproduce isochoric deformation

paths. As a global result for a general finite element mesh, and for a deficient formulation, deterioration of displacement values numerically obtained occurs. In the most favorable case, the correct response might be obtained by the finite element model, but to the expense of a low convergence rate, even for fully linear behaviors.

In the treatment of locking, and now related to the line of research adopted in the present work, the Enhanced Assumed Strain Method was adopted, in the way that each finite element is improved by means of the use of internal variables, without physical meaning, and responsible for providing strain modes impossible to be obtained by a conventional formulation. The number of internal variables to be used per element influences the computational performance of the whole algorithm, and is a matter of crucial importance in the formulation. Sometimes their number is chosen according to specific problems to be solved, in a somewhat kind of "trial-and-error" basis. The present work, on the other side, intends to present a systematic and rational approach for the choice of the enhanced variables and functions, based on an analysis of the subspace bases for suitable solutions avoiding each specific class of locking patterns. The subspace bases study for well-established formulations in the literature turns clear the requirements that a fully displacement-based formulation might have, in order to overcome the transverse shear as well as the volumetric locking problems. As a result, an optimized number of internal variables are introduced into the formulation, when compared to similar proposals already published.

The final result is a new class of shell and solid-shell finite elements with improved results in a range of linear and nonlinear demanding benchmarks. The implementation of the Enhanced Assumed Strain Method is carried out in a simplified manner when compared with published proposals in the field, turning the coding effort straightforward. The implementation of algorithms for the modelling of geometric and material nonlinearities is carried out with the aid of a corotational approach, intuitive in the treatment of large displacement, rotations and deformations of shell structures. The use of a corotational formulation, furthermore, avoids considerations about the lack of objectivity in the rate type constitutive update of stress tensors. Nonlinearities involving contact and friction effects were dealt with by means of implementation of the proposed finite elements into the commercial package Abaqus.

Finally, and as a closure for the present research work, a set of numerical benchmarks is presented, involving demanding linear and nonlinear problems in the shell finite elements technology field. Additionally, it is taken into account an industrial problem involving the modelling and simulation of an automotive structural component (S-Rail benchmark), involving plasticity with large deformations, large displacements and rotations and frictional contact nonlinearities. The obtained results, in the general

sense and for both the shell and solid-shell finite elements, infer about the reliability and accuracy of the new formulations and numerical algorithms implemented.