

**ÉCOLE DOCTORALE
SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR
DE L'UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL**

THÈSE

présentée

pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITÉ
Spécialité : Matériaux, Structures, Fiabilité

par

António Manuel BAPTISTA
Ingénieur Civil de l'Université Technique de LISBONNE

**MODÈLE NON LINÉAIRE GÉOMÉTRIQUE ET MATÉRIEL FONDÉ SUR
L'ANALYSE
DES DÉFORMATIONS GLOBALES DES SECTIONS
APPLICATION A L'ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES DÉFAUTS
DES PROFILÉS DE CONSTRUCTION MÉTALLIQUE**

Soutenue publiquement à Lisbonne, le 25 novembre 1994 devant le jury :

Président : A. VERGNE

Rapporteurs : B. CHABROLIN
R. MAQUOI
A. REIS

Membres : E. R. ARANTES E OLIVEIRA
M. CASTANHETA
J. P. MUZEAU

Doctorat Européen préparé au Laboratoire de Génie Civil de l'Université Blaise Pascal
et au Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Lisbonne,
dans le cadre de la Convention entre les établissements

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué, pour partie, au sein du Laboratoire de Génie Civil de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand et, pour partie, au sein du Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Lisbonne, dans le cadre de la convention entre les établissements.

Avant de commencer sa présentation nous désirons exprimer notre profonde gratitude à Monsieur le Professeur Jean-Pierre MUZEAU, Responsable du Département Génie Civil du CUST et directeur de la recherche. Il nous a fait profiter de sa haute compétence dans l'encadrement scientifique de cette thèse, dès la définition du sujet pour lequel il nous a laissé une assez grande liberté, pendant le suivi des travaux et lors de la relecture critique du présent ouvrage. Son soutien personnel, ses conseils et encouragements ont été essentiels pour la bonne concrétisation de ce travail.

Monsieur Bruno CHABROLIN, Directeur Scientifique du Centre Technique Industriel de la Construction Métallique (CTICM), a accepté d'être rapporteur et membre du jury. Nous lui en sommes extrêmement reconnaissant.

Monsieur le Professeur René MAQUOI de l'Institut du Génie Civil de l'Université de Liège nous a fait l'honneur d'être rapporteur et de participer au jury. Nous le remercions très profondément.

Monsieur le Professeur António REIS de l'Université Technique de Lisbonne nous a enseigné les bases de la Résistance des Matériaux pendant nos études dans ce même établissement. En acceptant de rapporter ce travail et de faire partie du jury d'examen, il nous fait l'honneur de s'intéresser de nouveau à nos activités. Qu'il trouve ici l'assurance de notre respectueuse gratitude.

Monsieur le Professeur Eduardo R. ARANTES E OLIVEIRA, Directeur du LNEC, nous a toujours encouragé dans la poursuite de ces travaux de recherche. Nous sommes très honoré de sa participation au jury. Que le LNEC qui m'a donné la possibilité et les facilités pour mener à bien cette recherche, soit assuré de mes remerciements les plus sincères.

Monsieur Mário CASTANHETA, Directeur de Recherche et Chef de Division au LNEC, a assuré l'orientation scientifique de mes travaux de thèse au LNEC et participé au jury. Qu'il soit ici très sincèrement remercié.

Monsieur le Professeur Alain VERGNE, Directeur du Laboratoire de Génie Civil de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, nous a accueilli à différentes reprises dans son laboratoire et a bien voulu participer au jury. Qu'il trouve ici l'assurance de notre chaleureuse gratitude.

Monsieur Maurice LEMAIRE, Professeur à l'Institut Français de Mécanique Avancée, Responsable du Laboratoire de Recherche et Applications en Mécanique Avancée et Responsable de la Formation Doctorale "Mécanique, Structure, Fiabilité" de l'Université Blaise PASCAL, nous a fait part, à de nombreuses reprises, de ses avis éclairés. Qu'il en soit vivement remercié.

Monsieur Vítor MONTEIRO, Chef du Département des Structures du LNEC et Monsieur Silvino POMPEU SANTOS, Chef de la Division de Comportement des Structures de ce Département, nous ont donné les conditions de travail indispensables au bon achèvement de cette thèse. Nous les remercions très sincèrement pour leurs nombreux encouragements.

Mes collègues António Paulo SILVEIRA et Alfredo CAMPOS COSTA nous ont fait profiter de leur expérience concernant les logiciels utilisés pour la mise en forme ce rapport bien qu'ils soient eux aussi surchargés par leur propre thèse. Qu'ils soient assurés de mon amicale sympathie.

Si cette thèse possède le Label Européen, c'est grâce au Service Culturel, Scientifique et de Coopération de l'Ambassade de France à Lisbonne qui a financé plusieurs missions entre la France et le Portugal. Nous tenons ici à exprimer notre profonde gratitude.

Enfin, Monsieur Júlio FERRY-BORGES, m'a incité à me rendre une première fois à Clermont-Ferrand au printemps 1988. C'est donc grâce à lui si tout a commencé. Plus tard, il a encouragé mes recherches et a contribué fortement à la définition du contexte européen de cette thèse. C'est avec une très grande reconnaissance que nous souhaitons associer sa mémoire à ce travail.

RESUME

L'évaluation de la fiabilité des structures dépend fortement de la modélisation retenue pour appréhender leur comportement et notamment des hypothèses simplificatrices adoptées dans la formulation de la réponse des différentes parties de la structure aux sollicitations imposées.

L'objectif principal de ce travail est l'élaboration d'un modèle non linéaire géométrique et matériel d'analyse des structures métalliques planes à barres. Il permet de tenir compte des principaux facteurs physiques affectant leur comportement non linéaire : évolution progressive de la plasticité suivant les sections transversales et le long des éléments, influence des contraintes résiduelles et effets de l'écroutissage.

Ce modèle est fondé sur une formulation analytique des efforts et des termes de rigidité des sections transversales en fonction de leurs déformations globales. Cette formulation est développée pour deux types de relations constitutives, élastique non linéaire et élastoplastique.

Les potentialités de cette formulation analytique sont illustrées à travers une étude théorique du flambement par bifurcation des poteaux en régime élastoplastique. Les domaines d'application des théories d'Euler, du module tangent et du module réduit, sont définis pour le cas d'un poteau rectangulaire élastoplastique en fonction de l'évolution de ses déformations axiale et transversale.

L'application des modèles de section est illustrée également par l'étude des effets de la forme de la section, de la modélisation de la loi constitutive, de l'interaction des déformations globales et des phénomènes d'instabilité locale sur l'évaluation du comportement des sections des profilés industriels.

Les relations incrémentales de la structure entière sont établies à l'aide d'une description Lagrangienne actualisée des champs de variables mécaniques et cinématiques. La prise en compte de la géométrie déformée des barres est fondée sur la théorie de Marguerre.

Le comportement non linéaire des assemblages est modélisé par des lois moment-rotation choisies par l'utilisateur. La détermination de la réponse non linéaire de la structure est gouvernée automatiquement à travers un pilotage en sphère appliqué à la méthode de Newton-Raphson.

Plusieurs exemples d'application sont étudiés, afin d'illustrer les caractéristiques spécifiques du modèle et de valider ses résultats. En particulier, leur comparaison avec les résultats expérimentaux d'autres auteurs permet de mettre en évidence sa capacité de simuler le comportement réel des structures.

Finalement une étude d'un très grand nombre de structures différentes, à noeuds fixes et à noeuds déplaçables, est présentée. Elle montre une application pratique du modèle pour l'évaluation de l'influence des règles de calcul de la longueur de flambement des poteaux, spécifiées par l'Eurocode 3, sur la détermination de leur charge maximale.

Enfin, la vitesse de calcul résultant de la formulation analytique du comportement non linéaire des sections, elle rend ce modèle particulièrement bien adapté pour être utilisé dans des codes de calcul fiabilistes de structures métalliques.

RESUMO

A avaliação da fiabilidade das estruturas é afectada pela modelação do seu comportamento, devido às hipóteses simplificadoras adoptadas durante a formulação da resposta das diferentes componentes da estrutura às solicitações que lhes são impostas.

O objectivo principal do presente trabalho é a elaboração de um modelo de análise física e geométrica não linear de estruturas metálicas reticuladas planas. Este modelo permite considerar os principais factores físicos que condicionam o seu comportamento não linear, tais como a evolução progressiva da plasticidade ao longo das secções transversais e do comprimento dos elementos estruturais, a influência das tensões residuais e os efeitos do endurecimento dos aços.

A elaboração do modelo baseia-se na formulação analítica dos esforços e dos termos de rigidez das secções transversais, em função das respectivas deformações globais. Esta formulação é desenvolvida para dois tipos de relações constitutivas, elástica não linear e elastoplástica.

As potencialidades desta formulação analítica são ilustradas através de um estudo teórico da encurvadura de pilares por bifurcação em regime elastoplástico. Os domínios de aplicação das teorias de Euler, do módulo tangente e do módulo reduzido são definidos para um pilar elastoplástico de secção rectangular, em função da evolução das suas deformações axial e transversal.

A aplicação dos modelos de secção é ainda ilustrada por uma série de estudos sobre a influência da forma das secções, da modelização da lei constitutiva, da interacção das deformações globais e dos fenómenos de instabilidade local sobre os resultados da análise de secções de perfis industriais.

As relações incrementais da estrutura global são estabelecidas através uma descrição Lagrangiana actualizada dos campos de variáveis físicas e cinemáticas. A introdução da geometria deformada das barras é baseada na teoria de Marguerre.

O comportamento não linear das ligações é modelizado através de leis momento-rotação seleccionadas pelo utilizador. A determinação da resposta não linear da estrutura é controlada automaticamente, através da técnica de iteração em esfera aplicada ao método de Newton-Raphson.

São estudados vários exemplos de aplicação, de modo a revelar as características específicas do modelo e a validar os seus resultados. Em particular, a comparação destes resultados com os obtidos por outros autores por via experimental permite evidenciar a capacidade do modelo de simular o comportamento real das estruturas metálicas.

Finalmente, é apresentado um estudo de mais de duzentas estruturas diferentes, de nós fixos e de nós móveis. Este estudo representa uma aplicação prática do modelo à avaliação da influência das regras de cálculo do comprimento de encurvadura dos pilares, especificadas no Eurocódigo 3, sobre a determinação da carga máxima respectiva.

Em conclusão realça-se o facto de a rapidez de cálculo, conseguida através da formulação analítica do comportamento não linear das secções, conferir a este modelo uma aptidão particular para ser integrado em programas de análise fiabilista das estruturas metálicas.

ABSTRACT

The evaluation of the structure's reliability is affected by model uncertainties resulting from the simplifying hypothesis adopted for the formulation of its component's behaviour.

The aim of this work concerns the elaboration of a physical and geometrically non linear model for the analysis of plane reticulated steel structures. This model allows to take in account the main mechanical factors affecting the non linearity of their behaviour, such as the progressive evolution of yielding along the cross sections and the length of the structural members, the influence of residual stresses and the effects of strain-hardening.

This model is based upon an analytical formulation of the cross-section's efforts and stiffness, as a function of its global deformations. This formulation is developed for two types of constitutive relations, non linear elastic and elastic-plastic.

The potential applications of this analytical formulation are illustrated by its application to the theoretical study of the elastic-plastic buckling of columns by bifurcation. The domains of application for the Euler's, tangent modulus and reduced modulus theories are defined for an elastic-plastic rectangular column, as a function of its axial and transversal deformations.

The application of these models is also exemplified through the study of the effects of the cross section's shape, stress-strain law, global deformations interaction and local buckling on the evaluation of the industrial profile' cross-section behaviour.

The incremental relations for the global structure are based on an actualised Lagrangian description of the physical and kinematical variables' fields. The deformed shape of the members is taken into account using Marguerre's theory.

The non linear behaviour of the connections is modeled by moment-rotation laws, chosen by the program's user. The evolution of the structure's non linear response is automatically controlled by the use of a sphere iteration technique, applied to the Newton-Raphson's method .

Several examples are studied in order to show the specific characteristics of the model and to validate its results. The comparison of these results with those obtained by other authors through experimental tests, allow the verification of the model's ability to simulate the real behaviour of this kind of steel structures.

Finally, a study of a huge number of braced and unbraced different structures is presented. It represents a practical application of the model to the evaluation of the influence of the Eurocode 3 rules for the determination of the column's buckling length, on the calculation of the structures maximum load.

In conclusion, the speed of calculation allowed by this model, resulting from the analytical formulation of the cross sections' non linear behaviour, makes it specially suitable for the use on reliability analysis of steel structures.