

ΣΤΕΦΑΝΟΥ Σ. ΚΟΖΑΝΗ
ΑΓΡ. ΤΟΠΟΓΡΑΦΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ Ε.Μ.Π.

*«ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ, ΘΕΩΡΟΥΜΕΝΗΣ ΩΣ
ΜΕΣΟΥ ΜΕ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ – ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ, ΜΕ ΤΗ
ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ. ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ
ΕΡΓΑ»*

ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΤΙΤΛΟ ΤΟΥ ΔΙΔΑΚΤΟΡΟΣ ΤΟΥ Ε.Μ.Π.
ΥΠΟΒΛΗΘΕΙΣΑ ΣΤΗ ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΥ Ε.Μ.ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ

ΑΘΗΝΑ 2002

«Η έγκρισις διδακτορικής διατριβής υπό της Ανωτάτης Σχολής Αγρονόμων
και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, δεν
υποδηλοί αποδοχήν των γνώμων του συγγραφέως».

(Ν. 5343 / 1932, άρθρον 202)

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

κ. Μ.Γ. ΣΑΚΕΛΛΑΡΙΟΥ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

κ. Μ. ΚΑΒΒΑΔΑΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

κ. Ε. Γ. ΜΑΡΚΕΤΟΣ
ΟΜΟΤΙΜΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

κ. Π. ΜΑΡΙΝΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

κ. Μ. ΠΑΠΑΔΡΑΚΑΚΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

κ. Β. Ι. ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

κ. Μ. ΚΑΒΒΑΔΑΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

κ. Μ. ΣΑΚΕΛΛΑΡΙΟΥ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

κ. Χ. ΓΙΟΥΝΗΣ
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

κ. Μ. ΚΑΤΤΗΣ
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ, ΘΕΩΡΟΥΜΕΝΗΣ ΩΣ
ΜΕΣΟΥ ΜΕ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ – ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ, ΜΕ
ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ. ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΑ
ΥΠΟΓΕΙΑ ΕΡΓΑ

ΣΤΕΦΑΝΟΥ Σ. ΚΟΖΑΝΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΥ ΑΓΡ. ΤΟΠΟΓΡΑΦΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ Ε.Μ.Π.
ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΥ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ Ε.Μ.Π.
«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η Διατριβή αυτή αναφέρεται στην διερεύνηση μή-γραμμικών προβλημάτων της γεωτεχνικής μηχανικής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το αντικείμενο που εξετάζεται ειδικότερα είναι η ανισοτροπία της βραχομάζας, η διερεύνηση καταστατικών μοντέλων ανισότροπης ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς καθώς και η ανάλυση τέτοιων προβλημάτων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Εκπονήθηκε στο χρονικό διάστημα μεταξύ Νοεμβρίου 1996 και Φεβρουαρίου 2002 στο Εργαστήριο Δομικής Μηχανικής και Στοιχείων Τεχνικών Έργων του Τομέα Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και υπεβλήθη στην εν λόγω Σχολή αμέσως μετά.

Επιθυμώ να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες μου στο Δάσκαλό μου, Αναπληρωτή Καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Μ. Σακελλαρίου για τη συνεχή καθοδήγηση και αμέριστη συμπαράσταση που μου παρείχε σε όλα τα στάδια της εκπόνησης της Διατριβής μου. Η συμβολή του ήταν καθοριστική και καταλυτική τόσο στο επιστημονικό μέρος της εργασίας όσο και στην αντιμετώπιση των υπολοίπων δυσκολιών που παρουσιάστηκαν και παρουσιάζονται συνήθως, σε μία τέτοια εργασία. Το καλό κλίμα συνεργασίας που αναπτύχθηκε ήταν συνέπεια των άριστων ανθρώπινων σχέσεων που είχα με τον κ. Σακελλαρίου, αισθάνομαι, δε, ιδιαίτερα τυχερός που συνεργάστηκα και μαθήτευσα δίπλα του τα τελευταία χρόνια, δηλαδή από το 1992, το δεύτερο έτος της φοίτησής μου στο Ε.Μ.Π.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Μ. Καββαδά για τις πολύτιμες υποδείξεις του και κατευθύνσεις που μου πρόσφερε, ειδικά στο γνωστικό αντικείμενο της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων καθώς και στην αντιμετώπιση των μή-γραμμικών προβλημάτων με αριθμητικές μεθόδους.

Επιθυμώ επίσης, να ευχαριστήσω τον Ομότιμο Καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Ε. Μαρκέτο για την υποστήριξη που μου παρείχε ως Διευθυντής του Εργαστηρίου Δομικής Μηχανικής έως το ακαδημαϊκό έτος 1997-1998. Ακόμη, για τις συμβουλές που μου έδωσε σε ειδικά θέματα της τεχνικής μηχανικής καθώς και στα θέματα συγκρότησης και συγγραφής της διατριβής.

Ευχαριστώ τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κκ. Καθηγητές του Ε.Μ.Π. Π. Μαρίνο, Μ. Παπαδρακάκη και Β. Παπαζόγλου καθώς και τους κκ. Επίκουρους Καθηγητές του Ε.Μ.Π. Χ. Γιούνη και Μ. Καττή για το άριστο πνεύμα συνεργασίας καθώς και για τη συμβολή τους στην άρτια διεξαγωγή της εξεταστικής διαδικασίας.

Επιπλέον, ευχαριστώ το Ευγενίδιο Ίδρυμα για την παροχή υποτροφίας κατά το ακαδημαϊκό έτος 1996-1997 καθώς και το Ε.Π.Ι.Σ.Ε.Υ. (Ερευνητικό Πανεπιστημιακό Ινστιτούτο Συστημάτων Επικοινωνιών και Υπολογιστών) για την παροχή υποτροφίας – χρηματοδότησης κατά το έτος 2000.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τους μηχανικούς του Ε.Μ.Π. κκ. Γ. Γαβούρα και Α. Χριστοφίδη και ιδιαίτερα δε τον μηχανικό Ε.Μ.Π. και βαθύφωνο Β. Κωστόπουλο για τη συμβολή τους στην άρτια παρουσίαση της Διατριβής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διατριβή αυτή, αναφέρεται στην διερεύνηση μή-γραμμικών προβλημάτων της γεωτεχνικής μηχανικής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το πρόβλημα που εξετάζεται ειδικότερα, είναι η ανισοτροπία της βραχομάζας, η διερεύνηση καταστατικών μοντέλων ανισότροπης μή-γραμμικής συμπεριφοράς και η ανάλυση τέτοιων προβλημάτων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η διατριβή χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος της διατριβής παρουσιάζονται η τεκμηρίωση και οι υπάρχουσες θεωρίες. Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζονται τα θέματα που συνιστούν την πρωτοτυπία της διατριβής.

Στην εισαγωγή γίνεται η έκθεση των βασικών εννοιών, απαραίτητων για την περιγραφή του προβλήματος. Παρουσιάζονται οι σχετικές έννοιες και ορισμοί από τη μηχανική του συνεχούς μέσου, καθώς και η γραμμική – ελαστική φύση του προβλήματος της ανισοτροπίας. Παρουσιάζεται το πρόβλημα της βραχομάζας με ανισότροπη συμπεριφορά και η μοντελοποίησή του ως πρόβλημα του συνεχούς μέσου, για την εφαρμογή των θεωριών της ελαστικότητας σε ανισότροπα μέσα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Περιγράφεται το λογισμικό της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων «x-fem», το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής. Το x-fem, αναπτύχθηκε σε αντικειμενοστραφή γλώσσα προγραμματισμού C++ για συστήματα τύπου Unix. Παρουσιάζονται οι βασικοί αλγόριθμοι και μεθοδολογία ανάλυσης. Εκτίθεται ο κατάλληλος κώδικας και αλγόριθμος για την επίλυση των προβλημάτων ελαστικότητας των ανισότροπων μέσων. Επιλύεται πρόβλημα ελαστικότητας και γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα πειράματος φωτοελαστικότητας.

Το τρίτο κεφάλαιο, είναι αυτό στο οποίο παρουσιάζεται η θεωρία της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς. Γίνεται ανασκόπηση θεωριών και κριτηρίων διαρροής που χρησιμοποιεί το x-fem, όπως Von Mises, Drucker-Prager και παραβολοειδούς εκ περιστροφής. Εκτίθεται αλγόριθμος και κώδικας ανάλυσης μη-γραμμικών (ελαστοπλαστικών) προβλημάτων. Αναλύεται το κριτήριο του παραβολοειδούς εκ περιστροφής, προτείνεται ο σχετικός αλγόριθμος επίλυσης με το x-fem. Επιλύεται το πρόβλημα ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς της κατανομής τάσεων σε πλάκα με εγκοπές, τα δε αριθμητικά αποτελέσματα, συγκρίνονται με πειραματικά αποτελέσματα της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται αρχικά τα κριτήρια αστοχίας βραχομάζας που αντιμετωπίζουν την κατάσταση αστοχίας ισότροπου μέσου. Γίνεται ανασκόπηση των κριτηρίων Mohr-Coulomb, Griffith, Hoek-Brown. Παρουσιάζονται έπειτα, τα κριτήρια που έχουν προταθεί για την περιγραφή της ανισότροπης κατάστασης αστοχίας της βραχομάζας με ιδιαίτερη έμφαση σε αυτό του Amadei.

Στην συνέχεια ακολουθούν τα κεφάλαια του δεύτερου μέρους της διατριβής, τα οποία περιέχουν προτάσεις και συνιστούν την πρωτοτυπία της εργασίας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, επιλύεται με χρήση του x-fem γεωτεχνικό πρόβλημα με ελαστική ανισοτροπία και συγκρίνεται με λύση κλειστής μορφής. Επιλύονται οι περιπτώσεις που δεν καλύπτονται από την λύση κλειστής μορφής, και παρουσιάζονται με την μορφή νομογραφημάτων ώστε να είναι δυνατή η χρήση των αποτελεσμάτων αυτών στον σχεδιασμό υπογείων έργων.

Στο έκτο κεφάλαιο αρχικά, παρουσιάζεται το κριτήριο αστοχίας του ελλειπτικού παραβολοειδούς για ανισότροπα μέσα. Διερευνάται το πεδίο εφαρμογής για την χρήση του οριοθετόντας κατάλληλα τις παραμέτρους του με συνθήκες που προτείνονται. Προτείνεται μεθοδολογία και αλγόριθμος για την

ελαστοπλαστική ανάλυση ορθότροπων υλικών με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και ειδικότερα με το x-fem. Επιλύεται με χρήση του x-fem ενδεικτικό πρόβλημα ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς με χρήση του συγκεκριμένου κριτηρίου.

Στο έβδομο κεφάλαιο, προτείνεται γενίκευση του κριτηρίου Amadei σε πολλά συστήματα διακλάσεων και με ανισότροπη ολίσθηση στην επιφάνειά τους, καθώς και αλγόριθμος και μεθοδολογία ανάλυσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Γίνεται η διερεύνηση του κριτηρίου και καταδεικνύεται η μετάπτωσή του στο ισότροπο κριτήριο Mohr-Coulomb, πέρα από κάποιον αριθμό ομάδων διακλάσεων.

Στο όγδοο κεφάλαιο, γίνεται πρόταση για χρήση του κριτηρίου αστοχίας του ελλειπτικού παραβολοειδούς στα γεωτεχνικά προβλήματα και ειδικότερα στα προβλήματα βραχομάζας που συμπεριφέρεται ανισότροπα. Αρχικά, συγκρίνονται τα ισότροπα κριτήρια Hoek-Brown και του παραβολοειδούς εκ περιστροφής, εκτίθεται επί πλέον η παραβολική τους μορφή. Προτείνεται μεθοδολογία υπολογισμού των παραμέτρων αντοχής για το ανισότροπο κριτήριο του ελλειπτικού παραβολοειδούς από τα δεδομένα της βραχομάζας. Γίνεται σύγκριση και έλεγχος προσαρμογής των κριτηρίων ολίσθησης, όπως αυτό του Amadei, με το κριτήριο του ελλειπτικού παραβολοειδούς. Προτείνεται μεθοδολογία και αλγόριθμος ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και εφαρμόζεται στο x-fem.

Στο ένατο κεφάλαιο, παρουσιάζονται δύο αριθμητικές εφαρμογές με χρήση του x-fem. Η πρώτη αφορά την ελαστική επίλυση στον υπολογισμό επί-τόπου τάσεων σε πραγματικό ανάγλυφο. Η δεύτερη εφαρμογή αφορά την ελαστοπλαστική ανάλυση σε τρισδιάστατο πρόβλημα της περιοχής των υπογείων έργων (συμβολή υπογείων εκσκαφών), με χρήση του κριτηρίου του ελλειπτικού παραβολοειδούς όπως περιγράφεται στο όγδοο κεφάλαιο.

Στο δέκατο κεφάλαιο, γίνεται η παραμετρική διερεύνηση στις μη-γραμμικές συγκλίσεις και τις πλαστικές ζώνες (ζώνες αστοχίας) γύρω από κυκλική σήραγγα σε ανισότροπο μέσο χρησιμοποιώντας το x-fem. Εφαρμόζεται το κριτήριο του ελλειπτικού παραβολοειδούς και εξετάζεται η επιρροή των παραμέτρων του. Εξάγονται πρακτικά συμπεράσματα για τον σχεδιασμό υπογείων έργων σε ανισότροπα μέσα.

Τέλος, το ενδέκατο κεφάλαιο είναι η συνολική ανακεφαλαίωση. Γίνεται σύνοψη των προτάσεων που παρουσιάστηκαν στα επί μέρους κεφάλαια και συγκροτούν την πρωτοτυπία της εργασίας. Γίνονται προτάσεις και επισημάνσεις σε επί μέρους θέματα, που χρήζουν περαιτέρω έρευνας.

ABSTRACT

This dissertation is referring to the exploration of non-linear problems of geotechnical engineering, with the use of the Finite Element Method (F.E.M). The problem on which this essay focuses is the anisotropy of the rock-mass, the exploration of constitutive models for anisotropic behaviour and the analysis of such problems with the Finite Element Method. The dissertation is divided in two parts. In the first part, all the existing theories are presented. In the second part, the subjects containing the originality of the dissertation are presented.

The first chapter is the introduction, where all the relevant terms, for the better understanding of the problem, are analysed. All the essential terms of the continuous medium mechanics and the linear-elastic nature of the anisotropy problem are shown here. Finally, it is shown how the anisotropic-behaving rock-mass is modeled like a continuous medium problem, in order to use on it the theories of elasticity in anisotropic medium.

On the second chapter, the Finite Element Methode is fully described, together with the new software, called x-fem, that was developed using the object oriented language C++, in Unix enviroment. All the essential algorithms and analysis methodology are fully presented here. The relevant codes and algorithms used in order to face anisotropic medium elasticity problems are shown. An elasticity problem is fully solved and the results are compared to the ones deriving from photoelasticity experiments.

The third chapter contains the elastoplastic-behaviour theory. Theories and yield or failure criteria used by the x-fem (like the von Mises or the Drucker-Prager one) are thoroughly mentioned here. An algorithm and analysis code of elastoplastic problems are fully exhibited here. The criterion of paraboloid from revolution is given a new, x-fem, algorithm. The problem of elastoplastic behaviour of stress distribution on a horizontal plate with cuttings is fully solved and the experimental results are compared with those of the international bibliography.

The fourth chapter contains the rock-mass failure criteria that deal with the failure state of isotropic medium. A quick reference of Mohr-Coulomb, Griffith and Hoek-Brown criteria is essential. Several criteria concerning the anisotropic failure state of rock-mass are shown and special emphasis is given to Amadei's one, as its use (with an x-fem support) is proposed to many joint systems with anisotropic slipping.

On the fifth chapter, a geotechnical problem with elastic anisotropy gets completely solved and the results are compared with the closed-form solution ones.

In the sixth chapter, the anisotropic criterion of the elliptic paraboloid is presented and the widespread of its use is checked. A methodology and an algorithm for the elastoplastic analysis of orthotropic materials with the finite element method (and especially x-fem) are proposed. Finally, a demonstration problem of elastoplastic behaviour is treated.

On the seventh chapter, the expansion and full study of the Amadei criterion are considered. It's showed that the Amadei criterion equals the Mohr-Coulomb one from a certain amount of joint sets and onwards.

In the eighth chapter, the failure criterion of the elliptic paraboloid is proposed to be used to geotechnical problems and especially to anisotropic rock-mass ones. Firstly, the isotropic criteria of

Hoek-Brown and of paraboloid of revolution are compared and their parabolic shape is shown. A special methodology, based on the rock-mass characteristics, for the calculation of the endurance parameters of the anisotropic criterion of the elliptic paraboloid is introduced. A comparison and a compatibility check of the slipping criteria (like Amadei's) with the elliptic paraboloid one are made. A special methodology and an analysis algorithm (with the use of finite element method) are proposed.

Some arithmetic solutions are presented in the ninth chapter, with the use of the elliptic paraboloid to geotechnic problems of anisotropic rock-mass and use of x-fem software. The first one is an arithmetic solution that is presented using real ground topography and the analysis is done on a 3D scale. The second, comes from the field of underground structures and especially from the tunnel drive domain.

The tenth chapter is on the parametric study of a circular tunnel driven in anisotropic rock. The elliptic paraboloid failure criterion is considered. The elastoplastic deformations and plastic zones are calculated using x-fem software.

Finally, the eleventh chapter contains the whole gist (propositions, ways of thinking, solutions) throughout all the preceding chapters. A number of subjects and problems that need further research in the future is displayed.

RESUMÉ

Cette dissertation se réfère aux problèmes non-linéaires de l'ingénierie géotechnique, en utilisant la méthode d'éléments limités (M.E.L ou F.E.M en anglais). Le problème sur lequel cet essai se fixe est l'anisotropie de la masse du rocher, l'exploration de modèles constitutives du comportement anisotropique et l'analyse des problèmes pareilles avec la M.E.L. La dissertation est divisée en deux parts. Le premier se réfère aux théories existant aujourd'hui, tandis que le deuxième contient les sujets qui montrent l'originalité de cette thèse.

Le premier chapitre est l'introduction où les termes utiles pour mieux comprendre la nature du problème sont présentés. Tous les termes essentiels de l'ingénierie du moyen massif et la linéaire-élastique nature du problème anisotropique se trouvent ici. Finalement, on montre comment on peut modéliser le rocher qui se comporte anisotropiquement comme un problème d'un moyen massif, pour qu'on puisse utiliser les théories d'élasticité sur le moyen anisotropique.

Dans le deuxième chapitre, la méthode F.E.M est complètement décrite et simultanément un logiciel nouveau, appelé x-fem (qui est développé en utilisant la langue C++ dans un 'environnement' Unix) est présenté. Tous les algorithmes essentiels et la méthodologie de l'analyse sont marqués ici. Les codes et algorithmes pour affronter des problèmes d'élasticité d'un moyen anisotropique se trouvent aussi ici. Un problème d'élasticité est entièrement résolu et les résultats sont comparés à ceux des expériences photoélastiques.

Le troisième chapitre contient la théorie du comportement élastoplastique. On trouve aussi des critères utilisés par le x-fem (comme ceux de von Mises et Drucker-Prager). Un algorithme et un code d'analyse des problèmes élastoplastiques sont complètement démontrés ici. Le critère du paraboloïde par filage est donné un nouveau, x-fem algorithme. Le problème du comportement élastoplastique de la distribution de tension sur une plaque horizontale avec des 'blessures' est totalement résolu et les résultats expérimentaux sont comparés à ceux de la bibliographie internationale.

Le quatrième chapitre contient les critères d'échec de la masse du rocher, qui ont à faire avec la condition d'échec du moyen isotropique. Une référence rapide aux critères de Mohr-Coulomb, Griffith and Hoek-Brown est nécessaire ici. Quelques critères concernant l'échec anisotropique du rocher sont illustrés et une emphase spéciale est donnée au critère d'Amadei et son utilisation (avec un x-fem support) est proposée pour beaucoup de systèmes avec un glissement anisotropique.

Le cinquième chapitre contient un, entièrement résolu, problème élastique anisotropique et les résultats sont comparés à ceux des solutions forme-fermée.

Le sixième chapitre se réfère premièrement au critère anisotropique du paraboloïde elliptique et l'universel de son usage est contrôlé. Une méthodologie et un algorithme concernant l'analyse élastoplastique des matériaux orthotropiques avec la méthode F.E.M (et spécialement x-fem) sont proposés. Finalement, un problème démonstratif de comportement élastoplastique est résolu.

Le septième chapitre est consacré au critère d'Amadei. On illustre que ce critère devient le même comme le critère Mohr-Coulomb si on surpasse un certain nombre de 'joint sets'.

Dans le huitième chapitre, le critère d'échec du paraboloïde elliptique est proposé pour les problèmes géotechniques et spécialement celles qui se réfèrent à des masses anisotropiques de rocher. Premièrement, le critère isotropique de Hoek-Brown et celui du paraboloïde par filage sont comparés

et leur forme parabolique est démontrée. Une méthodologie spéciale, basée sur les caractéristiques de la masse du rocher, pour le calcul des paramètres d'endurance du critère anisotrope du paraboloid elliptique est présentée. Une comparaison et un test de compatibilité des critères de glissement (comme celui d'Amadei) et de celui du paraboloid elliptique est fait. Une méthodologie spéciale et un algorithme d'analyse (avec l'utilisation de F.E.M) sont proposés.

Le neuvième chapitre contient quelques solutions arithmétiques avec l'utilisation du paraboloid elliptique en des problèmes géotechniques de anisotropie de masse de rocher et l'utilisation, aussi, du x-fem software. Le premier est une solution arithmétique qui est présentée en utilisant topographie réelle et l'analyse est faite en trois dimensions (3D). Le deuxième dérive du domaine des constructions souterraines et spécialement du domaine de construction des tunnels.

Le dixième chapitre se réfère sur l'étude paramétrique d'un tunnel circulaire dans un rocher anisotrope. Le critère d'échec du paraboloid elliptique est considéré. Les déformations elastoplastiques et les zones plastiques sont calculées en utilisant x-fem software.

Finalement, le onzième chapitre contient toutes les propositions, solutions, pensées parues dans la thèse. Un nombre de sujets et problèmes à rechercher dans l'avenir est illustré.