



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ - ΘΛΙΠΤΗΡΩΝ (TENSEGRITY STRUCTURES - CABLE DOMES)

ΝΙΚΗ ΚΑΡΑΓΕΩΡΓΟΠΟΛΟΥ



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Χ. ΓΑΝΤΕΣ
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2003



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΕΛΚΥΣΤΗΡΩΝ - ΘΛΙΠΤΗΡΩΝ
(TENSEGRITY STRUCTURES - CABLE DOMES)**

ΝΙΚΗ ΚΑΡΑΓΕΩΡΓΟΠΟΥΛΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Χ. ΓΑΝΤΕΣ
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2003

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική εργασία ‘Κατασκευές ελκυστήρων-θλιπτήρων’ (Tensegrity Structures-Cable Dome) πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Δ.Π.Μ.Σ. ‘Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών’, ΕΜΠ.

Σκοπός της είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς των συστημάτων tensegrity. Τα συστήματα αυτά είναι χωρικά δικτύωματα που αποτελούνται από εφελκόμενα μέλη καλωδίου και θλιβόμενα μέλη δοκού και ισορροπούν λόγω της εντατικής τους κατάστασης. Ανήκουν στην κατηγορία των ελεύθερων σωμάτων και δεν απαιτούν δεσμεύσεις στο οριζόντιο επίπεδο για να ισορροπήσουν. Οι εφελκυστικές και οι θλιπτικές εντάσεις που αναπτύσσονται στα μέλη θέτουν το χωρικό δίκτυωμα tensegrity σε ισορροπία.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν γίνεται μια προσπάθεια προσέγγισης της συμπεριφοράς τους.

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται κατασκευές βασισμένες σε αυτή την τεχνολογία.

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται μέθοδοι για την κατασκευή τέτοιων προσομοιωμάτων, καθώς και η διαδικασία κατασκευής ενός tensegrity 3-δοκών που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Μεταλλικό Κατασκευών του ΕΜΠ. Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μια εισαγωγή στη μαθηματική ανάλυσή τους, παρουσιάζονται οι κατηγορίες των tensegrity και με τη βοήθεια εξισώσεων στους κόμβους, προκύπτουν εκφράσεις για τις εσωτερικές εντάσεις και τα μήκη των μελών τους.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύεται η συμπεριφορά ενός τροποποιημένου tensegrity 3 – δοκών. Η ανάλυση που περιγράφεται οδηγεί στον υπολογισμό της δυναμικής ενέργειας του συστήματος, των επιμηκύνσεων των μελών και των μηκών τους.

Στο Κεφάλαιο 5 αναλύεται η συμπεριφορά ενός συστήματος tensegrity κάτω από τη επιβολή ενός διανυσματικού τόξου στην πάνω βάση του. Διατυπώνονται επίσης εκφράσεις που δίνουν τις εσωτερικές δυνάμεις, οι οποίες εντείνουν το σύστημα.

Στο Κεφάλαιο 6 αντικαθίστανται τα πλευρικά καλώδια με δοκούς και μελετάται η απόκριση της κατασκευής. Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται μέθοδοι εύρεσης σχήματος. Στο Κεφάλαιο 8 αναλύεται η συμπεριφορά της στοιχειώδους στέγης tensegrity και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά που προκύπτουν από το λογισμικό Sofistik. Στο Κεφάλαιο 9 διεξάγονται παραμετρικές αναλύσεις στα χαρακτηριστικά μέλη της στέγης που μελετήθηκε αναλυτικά και πειραματικά στο Κεφάλαιο 8. Στα Κεφάλαια 10 και 11 περιγράφονται στέγες tensegrity που έχουν κατασκευαστεί στη Σεούλ για τους Ολυμπιακούς Αγώνες της Κορέας και για το Στάδιο Giorgia Dome στην Ατλάντα.

Η ανάλυση που πραγματοποιείται σε όλη την πορεία της εργασίας μάς οδηγεί στην κατανόηση της ιδιαιτερότητας των tensegrity και οδηγούμαστε σε πολύτιμα συμπεράσματα τα οποία παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 12.

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται οι αναλύσεις που επιχειρήσαμε, προκειμένου να κατανοήσουμε την συμπεριφορά των συστημάτων tensegrity 3-δοκών και σε στέγες, οι οποίες όμως τελικά δεν μας οδηγούν σε αποτελέσματα για τους λόγους που περιγράφονται.

Τέλος, στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω κυρίως τον καθηγητή Χ. Γαντέ για την επισταμένη παρακολούθηση της διπλωματικής, τον Θοδωρή Φραγκόπουλο για την σημαντική συμβολή του με το θέμα εξαμήνου 'Κατασκευές ελκυστήρων – θλιπτήρων (Tensegrity)' που εκπόνησε κατά τη διάρκεια του μαθήματος του ΔΠΜΣ: Σχεδιασμός Καλωδιωτών Κατασκευών και Μembrανών, στο ΕΜΠ- 2002, τον κ. Ξενοφώντα Λιγνό για την αξιόλογη βοήθεια του στην κατασκευή του φυσικού προσομοίωματος και την κ. Ισαβέλλα Βασιλοπούλου για τις υποδείξεις της όσον αφορά στο πρόγραμμα Sofistik και για τις σημαντικές παρατηρήσεις της.

Νίκη Καραγεωργοπούλου

Οκτώβριος 2003

ABSTRACT

This dissertation entitled '*Tensegrity Structures – Cable Domes*' has been accomplished during the master course 'Structural Design and Analysis of Structures' at the NTUA.

The objective of this thesis is to examine the behavior of the Tensegrity systems. These structures are consisted of tension members and compressive members (struts) which are in equilibrium. They are classified as free bodies with no commitment at the horizontal level, in order to be equilibrated, is needed. The tension and compressive forces that are developed among the parts, cause nodal forces that render the tensegrity truss elements in equilibrium.

The chapters presented at this thesis, attempt to provide an approach of these systems behavior. Chapter 1 presents constructions based on this technology, while Chapter 2 describes the simulation methods of those constructions, as well as the construction of a 3-strut tensegrity, which has taken place at the Steel Construction Laboratory.

Chapter 3 involves an introduction to the mathematic analysis of 3-strut tensegrity and with the help of nodal equations and expressions, regarding the internal force and the length of the parts, are concluded.

Chapter 4 analyses the behavior of a modified 3-strut tensegrity. The analysis described here concludes to the calculation of the potential energy of the system, as well as to the calculation of the members elongation and their new lengths.

In Chapter 5 the behavior of a Tensegrity system under the enforcement of a vectorial arc on its upper base is described. Expressions regarding the internal forces are formulated.

In Chapter 6 the lateral cables are replaced by strus and the response of this construction is inspected.

In Chapter 7 the shape formulation methods are presented.

Chapter 8 analyses the behavior of an elemental roof Tensegrity and the results are compared to those resulted by the ‘Sofistic’ software.

In Chapter 9 parametric analyses of main members of the roof studied analytically and experimentally at the Chapter 8 are conducted.

Chapters 10 and 11 describe tensegrity roofs that have been constructed in Seoul for the Olympic Games and Georgia Dome stadium in Atlanta.

The analysis that is taking place throughout this study, contributes to the comprehension of the tensegrity distinctiveness and conducts meaningful conclusions presented in Chapter 12.

In Appendix A the analyses that have contributed to the understanding of the tensegrity systems (3-strut tensegrity and roofs) behavior are presented.

From this point, I would like to thank my professor Dr. Ch. Gantes for his supervision, Mr. Theodoros Fraggopoulos for his valuable contribution regarding his work on ‘Structures consisted of tension and compressive members’ as well as Mr. Xenofonta Ligno for his substantial help about the formation of the natural model. Last, but not least, I would like to thank Mrs. Isabella Vasilopoulou for her help regarding the Sofistic software and her useful notifications.

Nicky Karageorgopoulou

October 2003