

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΜΕ
ΑΠΛΟΥΣΤΕΥΜΕΝΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

υπό

ΖΑΡΡΑ ΔΗΜΗΤΡΑ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

2018

© 2018 Ζάρρα Δήμητρα

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2)

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, καθηγητή κ. Κωμοδρόμο Αμίλιο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Πάνω απ' όλα όμως, είμαι ευγνώμων στην οικογένειά μου, για την ψυχολογική και οικονομική υποστήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια.

Δήμητρα Ζάρρα

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ ΜΕ
ΑΠΛΟΥΣΤΕΥΜΕΝΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

Ζάρρα Δήμητρα

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2018

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Αιμίλιος Κωμοδρόμος, Καθηγητής

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αντικείμενο μελέτης είναι η προσομοίωση μιας υπόγειας δεξαμενής με τη χρήση του προγράμματος SOFISTIK. Αρχικά, παρουσιάζεται το εδαφικό προφίλ που χρησιμοποιείται και οι ιδιότητές του. Στη συνέχεια, γίνονται οι υπολογισμοί των απαραίτητων παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της δεξαμενής στο πρόγραμμα. Έπειτα, παρουσιάζονται οι τρεις κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα Sofistik για την μελέτη της δεξαμενής. Ο πρώτος αφορά την σύνθετη μέθοδος προσομοίωσης και ο δεύτερος και τρίτος τις απλουστευμένες μεθόδους που χρησιμοποιούσαν οι μελετητές στα παλαιότερα χρόνια. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης που πραγματοποιήθηκαν για μια κυκλική υπόγεια δεξαμενή χωρίς υγρό αποθήκευσης και γίνεται σύγκριση των τριών αναλύσεων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1 Γενικά περί δεξαμενών.....	11
1.2 Κατηγοριοποίηση των δεξαμενών.....	11
1.3 Πιθανές μορφές αστοχίας των δεξαμενών.	13
1.3.1 Λυγισμός σε σχήμα διαμαντιού (Diamond Shape Buckling).....	14
1.3.2 Λυγισμός σε σχήμα πέλματος ελέφαντα (Elephant Foot Buckling).	14
1.3.3 Βλάβες λόγω κυματισμού του περιεχόμενου υγρού.....	15
1.3.4 Αστοχία της θεμελίωσης.	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	17
2.1 Εδαφικό προφίλ προβλήματος.	17
2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά της δεξαμενής.....	17
2.3 Κανονισμοί για δεξαμενές.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	18
3.1 Φορτία.	18
3.2 Εισαγωγή στο πρόγραμμα προσομοίωσης.	22
3.2.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	22
3.2.2 Εισαγωγή υλικών και εδαφικής τομής στο πρόγραμμα.	22
3.2.3 Γεωμετρία της κατασκευής.	25
3.2.3 Εισαγωγή των φορτίων στο πρόγραμμα προσομοίωσης.	30
3.3 Προσομοίωση στις δυο διαστάσεις.	39
3.3.1 Κυκλικός δακτύλιος: γεωμετρία και φορτία.	39
3.3.1 Πλαίσιο: γεωμετρία και φορτία.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ	56
4.1 Επίλυση κυκλικής δεξαμενής.....	56
4.1.1 Διαστασιολόγηση κυκλικής δεξαμενής.....	58
4.2 Επίλυση κυκλικού δακτυλίου.....	67
4.2.1 Διαστασιολόγηση κυκλικού δακτυλίου.....	70
4.3 Επίλυση πλαισίου.....	75
4.3.1 Διαστασιολόγηση πλαισίου.....	79
4.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων.	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	86
5.1. Συμπεράσματα.....	86

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Διάγραμμα κατακόρυφων ολικών και ενεργών τάσεων (θεώρηση μηδενικής ροής)	19
Σχήμα 2: Απεικόνιση στατικών, σεισμικών και ολικών ενεργητικών ωθήσεων σε τοίχο βαρύτητας	20
Σχήμα 3: Απεικόνιση στατικών, σεισμικών και ολικών παθητικών ωθήσεων σε τοίχο βαρύτητας	21
Σχήμα 4: Καμπύλη p-y για στατικές συνθήκες	24
Σχήμα 5: Βασικά σημεία κυκλικής βάσης	26
Σχήμα 6: Βασικά σημεία πεδύλου	27
Σχήμα 7: Κατάκι δεξαμενής	28
Σχήμα 8: Η συνολική κατασκευή από το WinGraf	29
Σχήμα 9: Η συνολική κατασκευή από το Animator	30
Σχήμα 10: Γραφική απεικόνιση φόρτισης LC 2	32
Σχήμα 11: Γραφική απεικόνιση φόρτισης LC 2	33
Σχήμα 12: Γραφική απεικόνιση φόρτισης LC 3	36
Σχήμα 13: Γραφική απεικόνιση φόρτισης LC 4	38
Σχήμα 14: Γραφική απεικόνιση κυκλικού δακτυλίου	40
Σχήμα 15: Γραφική απεικόνιση κυκλικού δακτυλίου στο Animator	40
Σχήμα 16: Γραφική απεικόνιση πρώτης φόρτισης (LC 2)	42
Σχήμα 17: Γραφική απεικόνιση πρώτης φόρτισης (LC 2)	43
Σχήμα 18: Γραφική απεικόνιση δεύτερης φόρτισης (LC 3)	44
Σχήμα 19: Γραφική απεικόνιση δεύτερης φόρτισης (LC 3)	45
Σχήμα 20: Γραφική απεικόνιση τρίτης φόρτισης (LC 4)	46
Σχήμα 21: Γραφική απεικόνιση τρίτης φόρτισης (LC 4)	47
Σχήμα 22: Γραφική απεικόνιση ομάδων κυκλικού δακτύλιου	48
Σχήμα 23: Γραφική απεικόνιση πλαισίου	50
Σχήμα 24: Γραφική απεικόνιση πλαισίου στο Animator	51
Σχήμα 25: Γραφική απεικόνιση πρώτης φόρτισης (LC 2) πλαισίου	53
Σχήμα 26: Γραφική απεικόνιση δεύτερης φόρτισης (LC 3) πλαισίου	54
Σχήμα 27: Γραφική απεικόνιση τρίτης φόρτισης (LC 4) πλαισίου	55
Σχήμα 28: Μετατόπιση στον άξονα z χωρίς ελατήρια στη βάση	57
Σχήμα 29: Ο ελάχιστος απαιτούμενος κύριος οπλισμός της δεξαμενής	59
Σχήμα 30: Ο ελάχιστος απαιτούμενος οπλισμός της δεξαμενής (μέγιστος στους κόμβους)	60
Σχήμα 31: Ο ελάχιστος απαιτούμενος εγκάρσιος οπλισμός της δεξαμενής	61
Σχήμα 32: Ο μέγιστος απαιτούμενος κύριος οπλισμός της δεξαμενής	62
Σχήμα 33: Ο μέγιστος απαιτούμενος κύριος οπλισμός της δεξαμενής (μέγιστος στους κόμβους)	63
Σχήμα 34: Ο μέγιστος απαιτούμενος εγκάρσιος οπλισμός της δεξαμενής	64
Σχήμα 35: Ο οπλισμός διάτμησης της δεξαμενής	65
Σχήμα 36: Μετατόπιση κυκλικού δακτυλίου για την φόρτιση LC 2	68
Σχήμα 37: Μετατόπιση κυκλικού δακτυλίου για την φόρτιση LC 4	69
Σχήμα 38: Ο ελάχιστος απαιτούμενος κύριος οπλισμός του κυκλικού δακτυλίου	71
Σχήμα 39: Ο ελάχιστος απαιτούμενος εγκάρσιος οπλισμός του κυκλικού δακτυλίου	72
Σχήμα 40: Ο μέγιστος απαιτούμενος κύριος οπλισμός του κυκλικού δακτυλίου	73
Σχήμα 41: Ο μέγιστος απαιτούμενος εγκάρσιος οπλισμός του κυκλικού δακτυλίου	74
Σχήμα 42: Μετατόπιση πλαισίου για την φόρτιση LC 2	76

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 43: Μετατόπιση πλαισίου για την φόρτιση LC 3.....	77
Σχήμα 44: Μετατόπιση πλαισίου για την φόρτιση LC 4.....	78
Σχήμα 45:Ο ελάχιστος απαιτούμενος κύριος οπλισμός του πλαισίου.	80
Σχήμα 46:Ο ελάχιστος απαιτούμενος εγκάρσιος οπλισμός του πλαισίου.....	81
Σχήμα 47:Ο μέγιστος απαιτούμενος κύριος οπλισμός του πλαισίου.	82
Σχήμα 48:Ο μέγιστος απαιτούμενος εγκάρσιος οπλισμός του πλαισίου.....	83
Σχήμα 49: Ο οπλισμός διάτμησης του πλαισίου του πλαισίου	84

ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

C_u	συνοχή εδάφους υπό αστράγγιστες συνθήκες
D	διάμετρος δεξαμενής
H	ύψος δεξαμενής
K_{ad}	συντελεστής στατικών και σεισμικών ενεργητικών ωθήσεων
K_o	συντελεστής ωθήσεων ηρεμίας
K_{pd}	συντελεστής στατικών και σεισμικών παθητικών ωθήσεων
p	αντίσταση του εδάφους
p_{ult}	μέγιστη αντίσταση του εδάφους
P_{ad}	συνισταμένη δύναμη από ενεργητικές σεισμικές και στατικές ωθήσεις
P_{pd}	συνισταμένη δύναμη από παθητικές σεισμικές και στατικές ωθήσεις
u	πίεση πόρων
y	οριζόντια μετακίνηση
y_{50}	η οριζόντια μετακίνηση της δεξαμενής που αντιστοιχεί στο 50% της μέγιστης αντίστασης του εδάφους
α_h	συντελεστής οριζόντιας σεισμικής επιτάχυνσης εδάφους
α_v	συντελεστής κατακόρυφης σεισμικής επιτάχυνσης εδάφους
γ	φαινόμενο βάρος εδάφους
γ'	υπό άνωση βάρος του εδάφους
δ	γωνία τριβής τοίχου εδάφους
ΔP_{ad}	συνισταμένη δύναμη σεισμικών ενεργητικών ωθήσεων
ΔP_{pd}	συνισταμένη δύναμη σεισμικών παθητικών ωθήσεων
ε_{50}	η οριζόντια μετακίνηση της δεξαμενής που αντιστοιχεί στο 50% της μέγιστης αντίστασης του εδάφους

ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

λ	γωνία παρειάς τοίχου ως προς την κατακόρυφη
σ_h	ολική οριζόντια τάση
σ_h'	ενεργός οριζόντια τάση
σ_v	ολική κατακόρυφη τάση
σ_v'	ενεργός κατακόρυφη τάση
φ	γωνία τριβής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά περί δεξαμενών.

Οι δεξαμενές αποθήκευσης υγρών αποτελούν κατασκευές ζωτικής σημασίας για την επιβίωση του σύγχρονου ανθρώπου, κι αυτό λόγω της ευρείας χρήσης τους σε μια σειρά από εφαρμογές. Δεξαμενές υγρών χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων νερού για ύδρευση, άρδευση, πυρόσβεση κ.α., για την αποθήκευση πετρελαίου, βενζίνης και λοιπών πετρελαιοειδών σε διυλιστήρια και λοιπές μονάδες παραγωγής, καθώς και σε πυρηνικές εγκαταστάσεις για αποθήκευση μιας σειράς χημικών υγρών καθώς και χημικών αποβλήτων .

Ειδικά τις τελευταίες δεκαετίες η χρήση τους είναι εξαιρετικά διαδεδομένη, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη λήψη μέτρων για την προστασία τους. Όπως είναι προφανές η κύρια απειλή για τις δεξαμενές αποθήκευσης υγρών είναι οι σεισμοί. Σε χώρες με έντονα σεισμικά φαινόμενα όπως είναι η Ελλάδα, η Νέα Ζηλανδία, οι Η.Π.Α., η Ιαπωνία κ.α., η κατασκευή τέτοιων δεξαμενών πρέπει να γίνεται με εξαιρετική προσοχή και λαμβάνοντας υπ' όψιν μια σειρά από παραμέτρους, ώστε να μην βρεθούμε προ δυσάρεστων εκπλήξεων. Ένα επιπλέον γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη διεξοδική μελέτη σχεδίασης και κατασκευής των δεξαμενών αυτών είναι οι ενδεχόμενες συνέπειες μιας μερικής ή πλήρους αστοχίας τους. Σε ένα τέτοιο σενάριο θα έχουμε διαφυγή στο έδαφος, στο υπέδαφος καθώς και στην ατμόσφαιρα τεράστιας ποσότητας βλαβερών ουσιών. Ακόμα, πιθανό είναι το σενάριο της πρόκλησης μεγάλων εκρήξεων καθώς και πυρκαγιών που θα στοιχήσουν τη ζωή σε πολλούς ανθρώπους.

Αυτές οι δεξαμενές και λόγω της μεγάλης τους μάζας είναι ιδιαίτερα τρωτές στις έντονες σεισμικές διεγέρσεις. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό αν ανατρέξουμε σε σεισμούς του παρελθόντος και εστιάσουμε στις βλάβες που υπέστησαν δεξαμενές αποθήκευσης υγρών. Μέχρι το 1964 και τον σεισμό της Αλάσκας οι επιστήμονες δεν έδιναν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην αντισεισμική σχεδίασή τους. Μετά τις εκτεταμένες βλάβες που υπέστησαν δεξαμενές σε αυτόν τον σεισμό, ακολούθησαν μια σειρά μελετών για τη διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης κατασκευών τέτοιου τύπου. Άλλα θέματα που απασχόλησαν και απασχολούν τους επιστήμονες είναι η συμπεριφορά του περιεχόμενου υγρού της δεξαμενής καθώς και η αλληλεπίδραση της κατασκευής με το έδαφος στο οποίο εδράζεται.

1.2 Κατηγοριοποίηση των δεξαμενών.

Αρχικά, μπορούμε να διακρίνουμε τις δεξαμενές αποθήκευσης υγρών ως προς τη διαμόρφωσή τους. Υπάρχουν υπερυψωμένες (υπέργειες) , στηριζόμενες στο έδαφος (επίγειες) και θαμμένες εντός του εδάφους (υπόγειες) δεξαμενές. Οι υπόγειες δεξαμενές (Εικόνα 1.1) όπως είναι προφανές πρέπει αναγκαστικά να διαθέτουν στέγη, ώστε μετά την επίχωση να προστατεύεται το περιεχόμενο υγρό από τα εδαφικά υλικά. Οι επίγειες δεξαμενές είναι αυτές που συναντάμε συνηθέστερα στην πράξη. Οι διαστάσεις τους ποικίλουν με ακτίνες που ξεκινούν από λίγα μέτρα και καταλήγουν μέχρι και σε ογκώδεις δεξαμενές με ακτίνα πολλών δεκάδων μέτρων. Το σχήμα τους είναι συνήθως κυλινδρικό. Οι υπερυψωμένες δεξαμενές (Εικόνα 1.2)

όπως είναι λογικό δεν μπορούν να ξεπεράσουν ένα συγκεκριμένο μέγεθος καθώς είναι πολύ πιο ευαίσθητες, λόγω του μεγάλου ύψους στο οποίο έχουν συγκεντρωμένη μεγάλη μάζα.



Εικόνα 1.1: Υπόγεια δεξαμενή αποθήκευσης υγρών από οπλισμένο σκυρόδεμα (πριν την επίχωση)

Ως προς το υλικό κατασκευής διακρίνουμε τόσο μεταλλικές όσο και δεξαμενές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι υπόγειες δεξαμενές κατασκευάζονται συνήθως από σκυρόδεμα σε αντίθεση με τις υπέργειες, οι οποίες είναι κατά κύριο λόγο μεταλλικές. Το υλικό κατασκευής των επίγειων δεξαμενών ποικίλει, αν και κατά κύριο λόγο είναι μεταλλικές.



Εικόνα 1.2: Υπερψωμένη μεταλλική δεξαμενή αποθήκευσης υγρών

Μια επιπλέον διάκριση για τις μεταλλικές δεξαμενές γίνεται ανάλογα με τον τρόπο υποστήριξής τους στο έδαφος. Έτσι, διαχωρίζουμε τις μεταλλικές δεξαμενές σε αγκυρωμένες (Εικόνα 1.3) και μη. Οι αγκυρωμένες δεξαμενές συνδέονται σε μεγάλα θεμέλια, ώστε να αποφευχθεί η ανύψωσή τους σε περίπτωση σεισμού. Όμως, η αγκύρωση αυτή δεν είναι εύκολη στην κατασκευή και είναι αρκετά ακριβή γι' αυτό και δεν χρησιμοποιείται πολύ στην πράξη. Επιπρόσθετα, σε περίπτωση σεισμού αγκύρια και μπουλόνια που δεν έχουν σχεδιαστεί σωστά ενδέχεται να επιφέρουν βλάβη στο κέλυφος της δεξαμενής. Λόγω των παραπάνω μειονεκτημάτων της αγκύρωσης είναι συνηθέστερο το κέλυφος των μεταλλικών δεξαμενών να υποστηρίζεται σε κυκλική θεμελίωση από σκυρόδεμα χωρίς τη χρήση αγκυρίων.



Εικόνα 1.3: Αγκυρωμένη σε θεμέλιο δεξαμενή.

1.3 Πιθανές μορφές αστοχίας των δεξαμενών.

Οι σεισμικές διεγέρσεις προκαλούν μια σειρά από βλάβες στις δεξαμενές, οι οποίες δεν έχουν σχεδιαστεί σωστά και με πρόβλεψη προστασίας από τις μορφές αστοχίας τις οποίες θα εκθέσουμε στη συνέχεια. Η έρευνα σχετικά με την σεισμική απόκριση και συμπεριφορά των δεξαμενών υγρών καυσίμων, είναι εξέχουσας σημασίας καθώς μια ενδεχόμενη βλάβη θα έχει ανυπολόγιστες περιβαλλοντικές και οικονομικές συνέπειες. Για τους παραπάνω λόγους καθίσταται αναγκαία η επισταμένη μελέτη των μορφών αστοχίας τέτοιων κατασκευών, ώστε να είναι στην πορεία δυνατή η λήψη μέτρων για την προστασία τους. Στη συνέχεια θα αναφέρουμε συνοπτικά τους κυριότερους τύπους βλαβών που συναντούμε σε δεξαμενές αποθήκευσης υγρών.

1.3.1 Λυγισμός σε σχήμα διαμαντιού (Diamond Shape Buckling)

Αυτή η μορφή αστοχίας είναι ένα ελαστικό φαινόμενο λυγισμού, όπου ο λυγισμός συμβαίνει πριν την πλαστικοποίηση, εξαιτίας της υπέρξεως υψηλής θλιπτικής αξονικής δύναμης (υπεύθυνη για τη δημιουργία αξονικών τάσεων στο κέλυφος της δεξαμενής). Αυτές οι αξονικές τάσεις που προκαλούν τον λυγισμό είναι συνάρτηση του μεγέθους των ατελειών που υπάρχουν στη δεξαμενή, της εσωτερικής πίεσης, του πάχους του εξωτερικού κελύφους της δεξαμενής, καθώς και της διαφοροποίησης της τιμής της αξονικής τάσης στην περιφέρεια της δεξαμενής. Οι ατέλειες της δεξαμενής δρουν αρνητικά καθώς μειώνουν την αντοχή σε λυγισμό. Η εσωτερική πίεση του υγρού στο κέλυφος της δεξαμενής αυξάνει την αντοχή σε λυγισμό δρώντας ανασταλτικά στο φαινόμενο του λυγισμού σε σχήμα διαμαντιού.

Αυτό το σταθεροποιητικό φαινόμενο της ανάπτυξης μεγάλης εσωτερικής πίεσης στα τοιχώματα της δεξαμενής από το υγρό, μπορεί να μειωθεί εξαιτίας της ανάπτυξης πίεσης στη δεξαμενή λόγω της κάθετης συνιστώσας του σεισμού. Αυτή η μείωση της πίεσης μπορεί να οδηγήσει σε λυγισμό μορφής διαμαντιού.

Αυτή η μορφή λυγισμού παρατηρείται συνήθως στη βάση της δεξαμενής, μπορεί όμως να συμβεί και σε πολύ ψηλότερα σημεία (Εικόνα 1.4) όπου η υδροδυναμική πίεση έχει πολύ μικρότερες τιμές. Όπως είναι προφανές αυτό το φαινόμενο του λυγισμού τύπου διαμαντιού πλήττει μόνο τις μεταλλικές κατασκευές.



Εικόνα 1.4: Δεξαμενή με λυγισμό μορφής διαμαντιού στο πάνω αριστερό της τμήμα.

1.3.2 Λυγισμός σε σχήμα πέλματος ελέφαντα (Elephant Foot Buckling).

Μια αρκετά συνηθισμένη μορφή βλάβης σε μεταλλικές δεξαμενές είναι ο προς τα έξω λυγισμός του κελύφους τους ακριβώς πάνω από τη βάση τους (Εικόνα 1.5). Αυτό το φαινόμενο λόγω της μορφής του ονομάζεται λυγισμός σε σχήμα πέλματος ελέφαντα αφού θυμίζει έντονα το πέλμα ενός ελέφαντα. Συνήθως συναντάται σε κοντές και πλατιές δεξαμενές με μικρό λόγο ύψους προς ακτίνα. Προκαλείται από την αυξημένη εσωτερική πίεση του υγρού (η οποία προφανώς αυξάνει με το βάθος, γι' αυτό λαμβάνει στη βάση της δεξαμενής την μέγιστη τιμή προκαλώντας εκεί το εν

λόγο φαινόμενο). Αυτή η μορφή λυγισμού έχει πολύ υψηλές εφελκυστικές τάσεις στην μια διεύθυνση, συνδυασμένες με αρκετά μικρές θλιπτικές τάσεις στην άλλη διεύθυνση.



Εικόνα 1.5: Λυγισμός σε σχήμα πέλματος ελέφαντα σε δεξαμενή αποθήκευσης υγρών καυσίμων.

1.3.3 Βλάβες λόγω κυματισμού του περιεχόμενου υγρού.

Ένας σημαντικός κίνδυνος που συναντάται τόσο σε μεταλλικές όσο και σε δεξαμενές από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι οι βλάβες που μπορούν να δημιουργηθούν λόγω κυματισμού του υγρού που περιέχεται στη δεξαμενή. Για αυτό οι κατασκευαστές θα πρέπει να δίνουν ιδιαίτερη προσοχή στο ελεύθερο ύψος που αφήνουν μεταξύ της επιφάνειας του υγρού και τη στέγη της δεξαμενής. Μπορούν να προκληθούν και κυματισμοί που ξεπερνούν το ένα μέτρο, οι οποίοι είναι ικανοί να προκαλέσουν την αστοχία της στέγης και τον διαχωρισμό της από το υπόλοιπο σώμα της δεξαμενής. Στην Εικόνα 1.6 βλέπουμε μια δεξαμενή που περιείχε πετρέλαιο, η

οποία αστόχησε λόγω αυξημένου κυματισμού με αποτέλεσμα τη διαρροή πετρελαίου από την κορυφή της.



Εικόνα 1.6: Βλάβη σε δεξαμενή στην Καλιφόρνια λόγω κυματισμού του περιεχόμενου υγρού

1.3.4 Αστοχία της θεμελίωσης.

Μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται στην τοποθεσία που θα επιλεγεί για την κατασκευή μιας δεξαμενής, καθώς πρέπει να αποφεύγονται μαλακά εδάφη με φτωχές ιδιότητες έδρασης. Σε τέτοιου είδους εδάφη είναι πιθανή η ρευστοποίηση των εδαφικών υλικών που σε συνδυασμό με την εφαρμοζόμενη σεισμική ροπή στη βάση της δεξαμενής μπορεί να οδηγήσει σε στροφή του θεμελίου και σε μεγάλες μετακινήσεις της τάξεως αρκετών μέτρων. Σε άλλες περιπτώσεις η απώλεια του περιεχόμενου υγρού από μια κατασκευή που έχει υποστεί βλάβη μπορεί να φθείρουν το έδαφος γειτονικά της θεμελίωσης της δεξαμενής προκαλώντας επιδείνωση της εδαφικής υποστήριξης στη δεξαμενή.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

2.1 Εδαφικό προφίλ προβλήματος.

Στην παρούσα εργασία το έδαφος που θα χρησιμοποιηθεί είναι συνεκτικό. Για την ακρίβεια, είναι άργιλος με αστράγγιστη διατμητική αντοχή $C_u=50$ KPa, ειδικό βάρος $\gamma=19$ KN/m³ και γωνία τριβής $\varphi=0^\circ$.

2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά της δεξαμενής.

Η δεξαμενή έχει διάμετρο $D=5$ m και ύψος $H=8$ m, οπότε η συνολική χωρητικότητά της είναι 138 m³, δεδομένου ότι η στάθμη πλήρωσης βρίσκεται στα 7 m. Το υλικό κατασκευής της δεξαμενής είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα. Το σκυρόδεμα έχει χαρακτηριστική αντοχή $C 25/30$ και ο οπλισμός είναι χάλυβας κατηγορίας B500c. Η βάση της δεξαμενής έχει πάχος 40 cm, ομοίως και το καπάκι της δεξαμενής και ο τοίχος 30 cm. Η θεμελίωση της δεξαμενής είναι μορφής πέδλου περιμετρικά της δεξαμενής και έχει μήκος 1 m και πάχος 40 cm. Από άποψη σεισμικής επικινδυνότητας, η κατασκευή μελετάτε σε περιοχή που χαρακτηρίζεται ως ζώνη II, δηλαδή, η οριζόντια σεισμική επιτάχυνση λαμβάνεται ίση με $a=0,24$ m/sec².

2.3 Κανονισμοί για δεξαμενές.

Οι κανονισμοί που χρησιμοποιούνται συχνότερα στην πράξη είναι ο API-650 (2005), ο NZSEE (1986), ACI (2006) καθώς και ο Ευρωκώδικας 8 (2006). Ο API-650 εκδόθηκε από το Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου (American Petroleum Institute) και είναι ένας από τους πρώτους κανονισμούς που εισάγουν μια συστηματική προσέγγιση στην αντισεισμική σχεδίαση δεξαμενών υγρών καυσίμων. Ο Ευρωκώδικας 8 (1998) προβλέπει τη χρήση του μηχανικού μοντέλου των Veletsou και Yang (1977) ως μια αποδεκτή διαδικασία για άκαμπτες κυκλικές δεξαμενές. Για ελαστικές κυκλικές δεξαμενές, τα μοντέλα του Veletsou (1984) και τον Haroun και Housner (1981) χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τη διαδικασία των Malhotra et al (2000). Οι παραπάνω κώδικες έχουν το κοινό στοιχείο ότι οι υδροδυναμικές δυνάμεις του συστήματος υγρό-δεξαμενή που δημιουργούνται από τα σεισμικά φορτία μετατρέπονται σε ισοδύναμο σύστημα μάζας-ελατηρίου, το οποίο αναπτύσσει τις ίδιες δυνάμεις και ροπές στο τοίχωμα της δεξαμενής (Housner, 1954). Το παραπάνω σύστημα αποτελείται από δύο συνιστώσες. Η πρώτη συνιστώσα αντιπροσωπεύει το μέρος του υγρού που κινείται σε αρμονία με το τοίχωμα της δεξαμενής και ονομάζεται ωστική συνιστώσα. Η δεύτερη συνιστώσα αντιπροσωπεύει το μέρος του υγρού που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια του υγρού και υπόκειται σε κυματισμό. Αυτή η συνιστώσα ονομάζεται συναγωγική και μοντελοποιείται τοποθετώντας μια σειρά από ταλαντωτές ενός βαθμού ελευθερίας στο απλοποιημένο ισοδύναμο σύστημα.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

3.1 Φορτία.

Εφόσον, η δεξαμενή που προσομοιώνεται βρίσκεται μέσα στο έδαφος, η μια φόρτιση θα δέχεται είναι οι ωθήσεις ηρεμίας. Η ενεργός και ολική οριζόντια τάση δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\sigma'_h = K_0 \sigma'_v \quad (3.1)$$

$$\sigma_h = K_0 \sigma_v + u \quad (3.2)$$

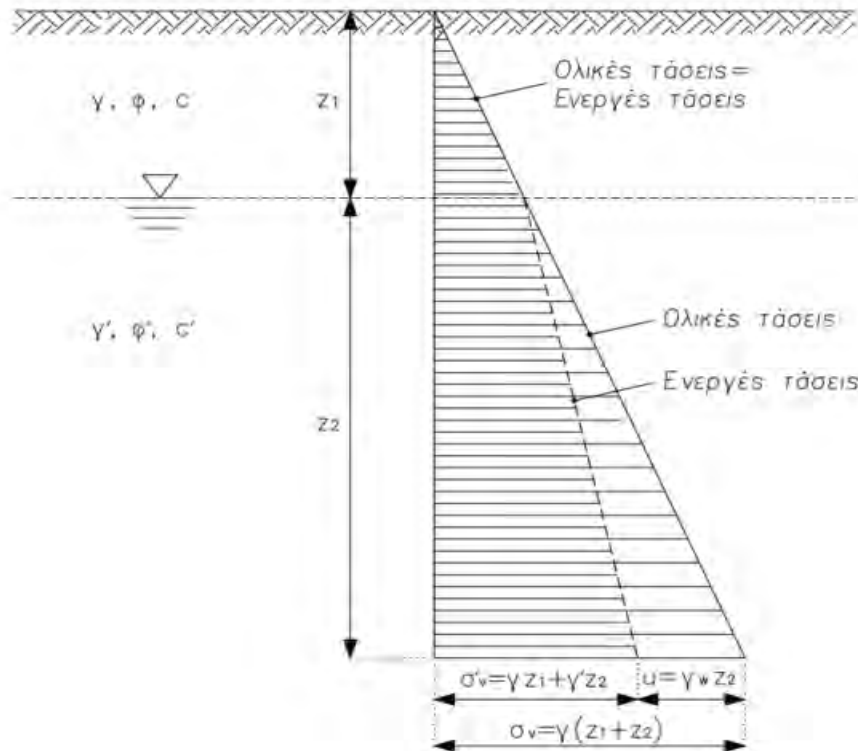
όπου, K_0 είναι ο συντελεστής ωθήσεων ηρεμίας και σύμφωνα με τον Jaky (1944), για κανονικά στερεοποιημένα εδάφη δίνεται από τον τύπο:

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} = 1 - \sin \varphi \quad (3.3)$$

όπου, φ η γωνία τριβής σε στραγγιζόμενες συνθήκες.

Οι στατικές ωθήσεις ηρεμίας που δρουν επαυξάνονται κατά τη διάρκεια του σεισμού από γραμμικό διάγραμμα πρόσθετων οριζόντιων πιέσεων με μέγιστη τιμή στην επιφάνεια του εδάφους ίση με $1.5\alpha\gamma H$ και ελάχιστη τιμή ίση προς $0.50\alpha\gamma H$ στο κατώτατο σημείο της δεξαμενής, σε βάθος H .

Στο σχήμα στην επόμενη σελίδα δίνεται το διάγραμμα ολικών και ενεργών κατακόρυφων τάσεων.



Σχήμα 1: Διάγραμμα κατακόρυφων ολικών και ενεργών τάσεων (θεώρηση μηδενικής ροής)

Μια άλλη φόρτιση που θα δέχεται η δεξαμενή είναι οι ωθήσεις λόγω σεισμικής δράσης. Σύμφωνα με τους Mononobe-Okabe θεωρείται ψευδοστατική ανάλυση η οποία οδηγεί σε περιστροφή του πεδίου βαρύτητας κατά γωνία θ . Ο συντελεστής στατικών και σεισμικών ενεργητικών ωθήσεων δίνεται από την εξίσωση:

$$K_{ad} = \frac{\cos^2(\varphi - \lambda - \theta)}{\cos \theta \cos(\delta + \lambda + \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \beta - \theta)}{\cos(\delta + \lambda + \theta) \cos(\beta - \lambda)}} \right]^2} \quad (3.4)$$

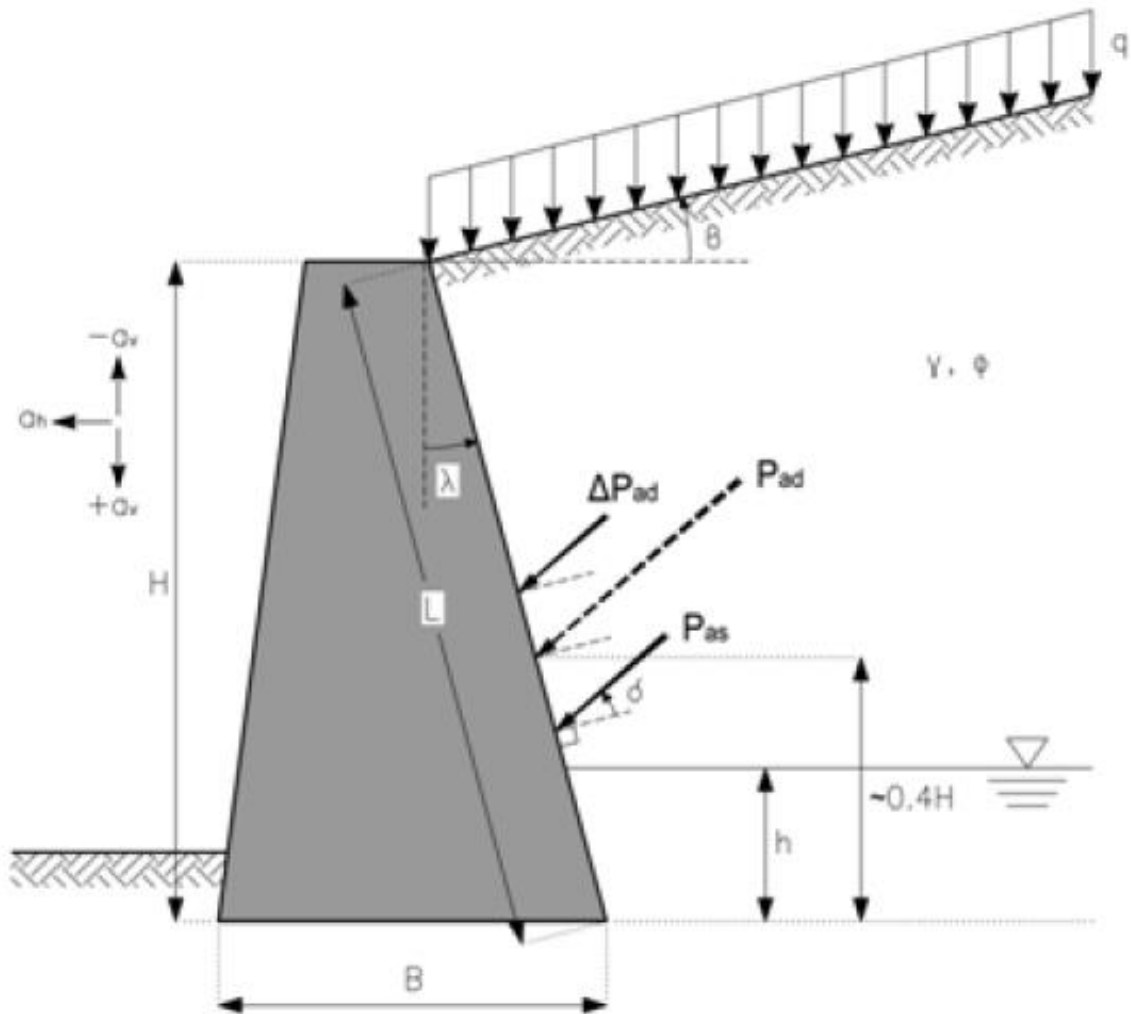
με,

$$\theta = \arctg \frac{\alpha_h}{1 + \alpha_v} \quad (3.5)$$

όπου, α_h και α_v είναι η οριζόντια και η κατακόρυφη σεισμική επιτάχυνση αντίστοιχα. Σύμφωνα με τους Newmark and Hall (1982) η κατακόρυφη σεισμική επιτάχυνση θα δίνεται από την σχέση :

$$\alpha_v = \frac{2}{3} \alpha_h \quad (3.6)$$

Για τον προσδιορισμό των δ , β , λ δίνεται το σχήμα 3.2



Σχήμα 2: Απεικόνιση στατικών, σεισμικών και ολικών ενεργητικών ωθήσεων σε τείχος βαρύτητας.

Η συνισταμένη δύναμη P_{ad} λόγω σεισμικών και στατικών ενεργητικών ωθήσεων δίνεται από την εξίσωση 3.7 και δρα σε απόσταση $0,6H$.

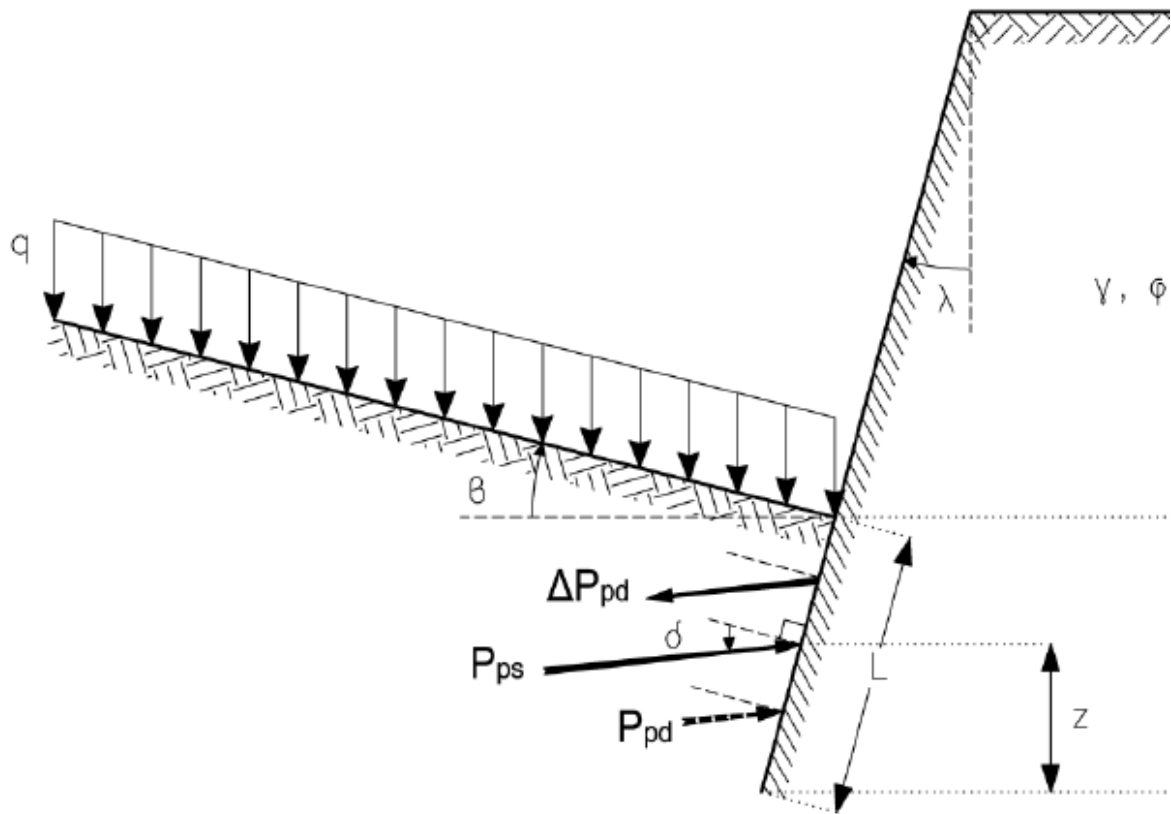
$$P_{ad} = \frac{1}{2} \gamma L^2 (1 \pm a_v) K_{ad} \quad (3.7)$$

Κατά παρόμοιο τρόπο προσδιορίζονται και οι παθητικές ωθήσεις λόγω σεισμού. Ο συντελεστής παθητικών ωθήσεων υπό σεισμική δράση δίνεται από την εξίσωση:

$$K_{pd} = \frac{\cos^2(\varphi + \lambda - \theta)}{\cos \theta \cos(\delta - \lambda + \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi + \beta - \theta)}{\cos(\delta - \lambda + \theta) \cos(\beta - \lambda)}} \right]^2} \quad (3.8)$$

Και η συνισταμένη δύναμη P_{pd} λόγω σεισμικών και στατικών παθητικών ωθήσεων δίνεται από την σχέση:

$$P_{pd} = \frac{1}{2} \gamma L^2 (1 \pm a_v) K_{pd} \quad (3.9)$$



Σχήμα 3: Απεικόνιση στατικών, σεισμικών και ολικών παθητικών ωθήσεων σε τοίχο βαρύτητας.

3.2 Εισαγωγή στο πρόγραμμα προσομοίωσης.

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της δεξαμενής είναι το SOFISTIK. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιείται για στατική και δυναμική ανάλυση, καθώς επίσης παρέχει και τη δυνατότητα για διαστασιολόγηση των κατασκευών. Χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και είναι ευρέως γνωστό στο χώρο των πολιτικών μηχανικών. Στο SOFISTIK TEDDY γράφεται ο κώδικας του προγράμματος, το SOFISTIK WINGRAF είναι το γραφικό περιβάλλον και στο SOFISTIK ANIMATOR παρουσιάζεται η καταπόνηση της κατασκευής κατά τη διάρκεια δράσης των φορτίων. Τέλος, στο SOFISTIK REPORT αναφέρονται αναλυτικά όλα τα δεδομένα και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

3.2.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων άρχισε να αναπτύσσεται από τα μέσα του προηγούμενου αιώνα και είναι μια μέθοδος μαθηματικής μοντελοποίησης φαινομένων στη φύση και κυρίως κατασκευών με σκοπό την επίτευξη μεγαλύτερης ακριβείας στους υπολογισμούς.

Κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η διαίρεση μιας κατασκευής σε μικρότερα πεπερασμένα στοιχεία το καθένα από τα οποία έχει καθορισμένα χαρακτηριστικά και συνοριακές συνθήκες. Αυτό σημαίνει πως η διαίρεση του συνολικού συστήματος σε πολλά πεπερασμένα στοιχεία έχει ως συνέπεια να απαιτείται η επίλυση ενός πολύ μεγάλου αριθμού εξισώσεων. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα μέχρι πρόσφατα, η εφαρμογή της μεθόδου να είναι σχετικά περιορισμένη. Όμως η αλματώδης ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και η διάδοσή τους στο ευρύ κοινό, έκανε εφικτή την επίλυση των φορέων με πεπερασμένα στοιχεία από ένα μεγάλο ποσοστό μηχανικών και είχε σαν συνέπεια την σημερινή εκτεταμένη εφαρμογή της μεθόδου.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στη διατύπωση των μεθόδων Rayleigh-Ritz, αλλά δύναται να προσομοιώσει με μεγαλύτερη ευχέρεια κατασκευές με πολύπλοκη γεωμετρία. Τα πεπερασμένα στοιχεία από τα οποία αποτελείται ο φορέας εφάπτονται μεταξύ τους, χωρίς να επιτρέπεται ανάμεσα η ύπαρξη κενών, συνθέτοντας έτσι ένα συνεχές πλέγμα. Τα στοιχεία αλληλοσυνδέονται μέσω κομβικών σημείων που βρίσκονται στα σύνορα τους. Οι βασικές παράμετροι που ζητούνται είναι οι μετακινήσεις των κόμβων, οι οποίες προσδιορίζονται από συναρτήσεις που χαρακτηρίζουν το είδος του πεπερασμένου στοιχείου. Η επιλογή του κατάλληλου σχήματος για το πεπερασμένο στοιχείο και των συναρτήσεων που θα δίνουν τις μετακινήσεις, επηρεάζουν σημαντικά την προσομοίωση.

3.2.2 Εισαγωγή υλικών και εδαφικής τομής στο πρόγραμμα.

Η προσομοίωση αρχίζει με το πρόγραμμα +PROG AQUA όπου εισάγεται ο κανονισμός που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση και διαστασιολόγηση της κατασκευής. Στην προσομοίωση αυτή θα χρησιμοποιηθεί ο Ευρωκώδικας. Έπειτα, δηλώνεται η χαρακτηριστική αντοχή του σκυροδέματος και η κατηγορία του εδάφους. Στη συνέχεια, εισάγεται το εδαφικό προφίλ του προβλήματος και τέλος, απαιτείται από το πρόγραμμα να παρουσιάσει στο REPORT τις γραφικές παραστάσεις των υλικών.

```
+PROG AQUA
HEAD Circular Plate with Cylinder
NORM EN 1992-2004
CONC 1 C 25
STEE 2 S 500
MATE 91 GAM 19 TYPE CLAY
BORE NO 1 X 0 Y 0 Z 0 NZ 1.0 TITL 'BOREHOLE'
BLAY S 10 MNO 91 MUE 0.35 C 50 PHI 0
BBAX S1 0.0 S2 10.0 KSIG 1 TANR 0
BBLA S1 0.0 S2 10.0 K0 9652
ECHO MAT EXTR
ECHO PICT EXTR
END
```

Με την εντολή BLAY δηλώνεται ότι το έδαφος, γύρω από την δεξαμενή, είναι μονοστρωματικό, αποτελείται από το υλικό 91 (που είναι η άργιλος που ορίσαμε στο MATE) και ότι το υλικό αυτό έχει λόγο Poisson 0,35 και γωνία τριβής 0°. Οι εντολές BBAX και BBLA χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή των πλευρικών αντιστάσεων υπό κατακόρυφη και οριζόντια φόρτιση αντίστοιχα. Το K0 (δυσκαμψία του εδάφους) υπολογίστηκε με την μέθοδο των p-y καμπυλών. Παρακάτω, παρουσιάζεται η μέθοδος αυτή.

Μέθοδος p-y καμπυλών

Με τη μέθοδο αυτή προσδιορίζεται η απόκριση του εδάφους υπό οριζόντια φόρτιση. Ο Matlock (1970) προσδιόρισε τις καμπύλες που χαρακτηρίζουν την απόκριση μαλακών έως μέσης συνεκτικότητας αργίλων υπό οριζόντια φόρτιση, και η εξίσωση που προσδιορίζει τον αρχικό κλάδο της καμπύλης απόκρισης για την περίπτωση της στατικής φόρτισης είναι:

$$\frac{p}{p_{ult}} = 0.5 \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{0.3} \quad (3.10)$$

όπου,

p : η αντίσταση του εδάφους,

y : η οριζόντια μετακίνηση,

p_{ult} : η μέγιστη αντίσταση του εδάφους, η οποία δίνεται από τη μικρότερη των τιμών που προκύπτουν από τις εξισώσεις 3.11 και 3.12,

y_{50} : η οριζόντια μετακίνηση της δεξαμενής που αντιστοιχεί στο 50% της μέγιστης αντίστασης του εδάφους που δίνεται από την εξίσωση 3.13.

$$p_{ut} = \left[3 + \frac{\gamma'}{c_u} + J \frac{z}{D} \right] c_u D \quad (3.11)$$

$$p_{ud} = 9c_u D \quad (3.12)$$

$$y_{50} = 2.5\varepsilon_{50}D \quad (3.13)$$

όπου,

γ' : το υπό άνωση βάρος του εδάφους,

c_u : η αστράγγιστη διατμητική αντοχή του εδάφους,

J : συντελεστής ίσος με 0.5 για μαλακές αργίλους και 0.25 για αργίλους μέσης συνεκτικότητας (συνήθως λαμβάνεται ίσος με 0.5),

D : η διάμετρος της δεξαμενής,

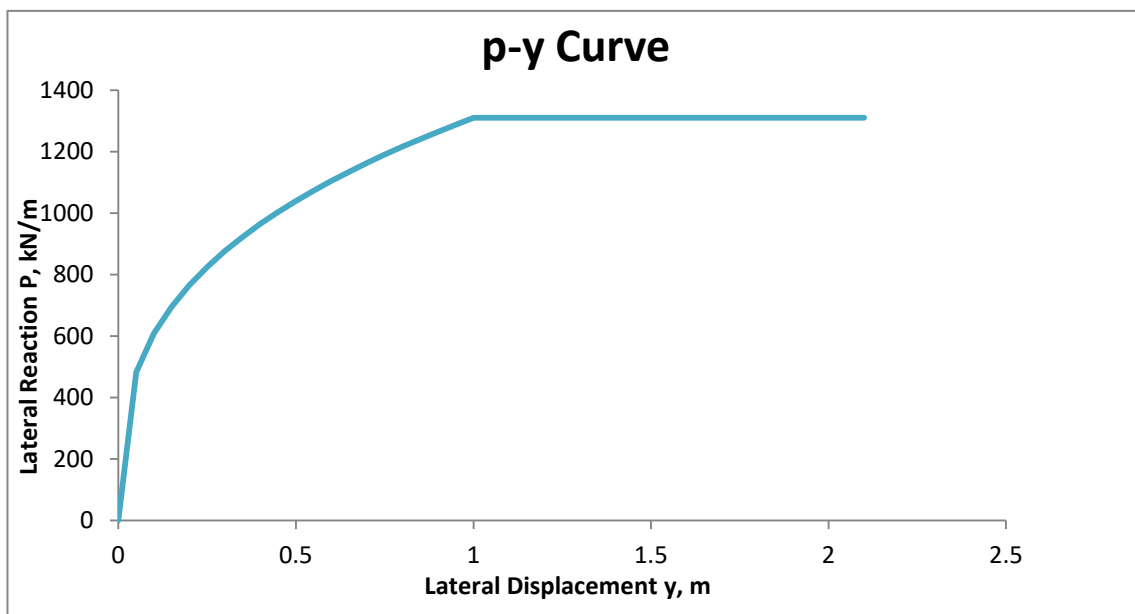
z : το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους,

ε_{50} : η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο 50% της μέγιστης αντοχής του εδάφους στο διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων που προσδιορίζεται εργαστηριακά.

Στη συνέχεια δίνονται τα δεδομένα και η καμπύλη που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό την δυσκαμψίας K_0 .

Πίνακας 3.1: Δεδομένα για p-y καμπύλη

Διάμετρος πασσάλου (m)	5
C_u (kPa)	50
φ (°)	0
γ' (kN/m ³)	9
ε_{50}	0,01
z (m)	8



Σχήμα 4: Καμπύλη p-y για στατικές συνθήκες.

Η δυσκαμψία υπολογίζεται στον γραμμικό κλάδο και για μετακίνηση μικρότερη του 0.05m. Υπολογίζεται από το πηλίκο του φορτίου που αντιστοιχεί σε μετατόπιση 0.05m προς την μετατόπιση αυτή.

3.2.3 Γεωμετρία της κατασκευής.

Στο +PROG SOFIMSHA γίνεται η εισαγωγή των βασικών σημείων που στη συνέχεια μετατρέπονται σε τετράπλευρα τρισδιάστατα στοιχεία με την εντολή QUAD.

+PROG SOFIMSHA

HEAD Circular Plate with Cylinder

SYST SPAC GDIV 100000

sto#rz 2.5 \$ radius cylinder

sto#hz 8.0 \$ height cylinder

sto#rp 3.5 \$ radius circular plate

sto#teil 10 \$ subdivision

\$

QUAD PROP MNO 1 MRF 2 T 400 POSI ABOV C 1930 \$ plate properties

\$ central node

NODE NO 1 X 0 Y 0 Z 0

\$central nodes of the cylinder wall

NODE NO 52 X #rz Y 0 Z 0

NODE NO 45 X 0 Y #rz Z 0

NODE NO 34 X -#rz Y 0 Z 0

NODE NO 23 X 0 Y -#rz Z 0

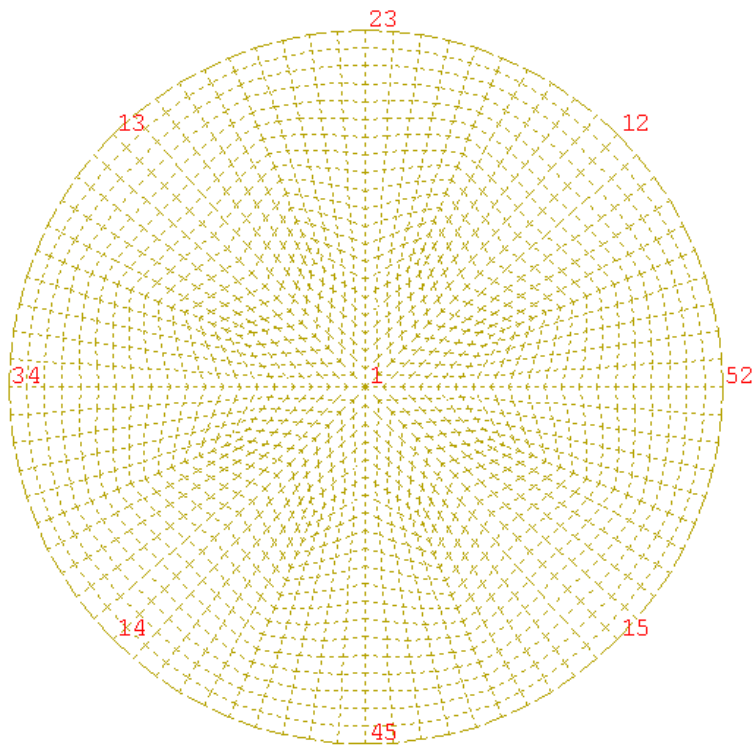
\$corner points of the cylinder wall

NODE NO 15 X (#rz)*cos(45) Y (#rz)*sin(45) Z 0

NODE NO 14 X (#rz)*cos(135) Y (#rz)*sin(135) Z 0

NODE NO 13 X (#rz)*cos(225) Y (#rz)*sin(225) Z 0

NODE NO 12 X (#rz)*cos(315) Y (#rz)*sin(315) Z 0



Σχήμα 5: Βασικά σημεία κυκλικής βάσης.

Στη συνέχεια, δημιουργούνται τα βασικά σημεία της θεμελίωσης της δεξαμενής.

\$central points of the plate

NODE NO 152 X #rp Y 0 Z 0

NODE NO 145 X 0 Y #rp Z 0

NODE NO 134 X -#rp Y 0 Z 0

NODE NO 123 X 0 Y -#rp Z 0

\$corner points of the plate

NODE NO 115 X (#rp)*cos(45) Y (#rp)*sin(45) Z 0

NODE NO 114 X (#rp)*cos(135) Y (#rp)*sin(135) Z 0

NODE NO 113 X (#rp)*cos(225) Y (#rp)*sin(225) Z 0

NODE NO 112 X (#rp)*cos(315) Y (#rp)*sin(315) Z 0

\$ edges plate outside cylinder

BOUN 21 TITL 'edge_outside' ; BOUN NA 12 112 DIV #teil*2

\$ plate outside cylinder

GRP 1

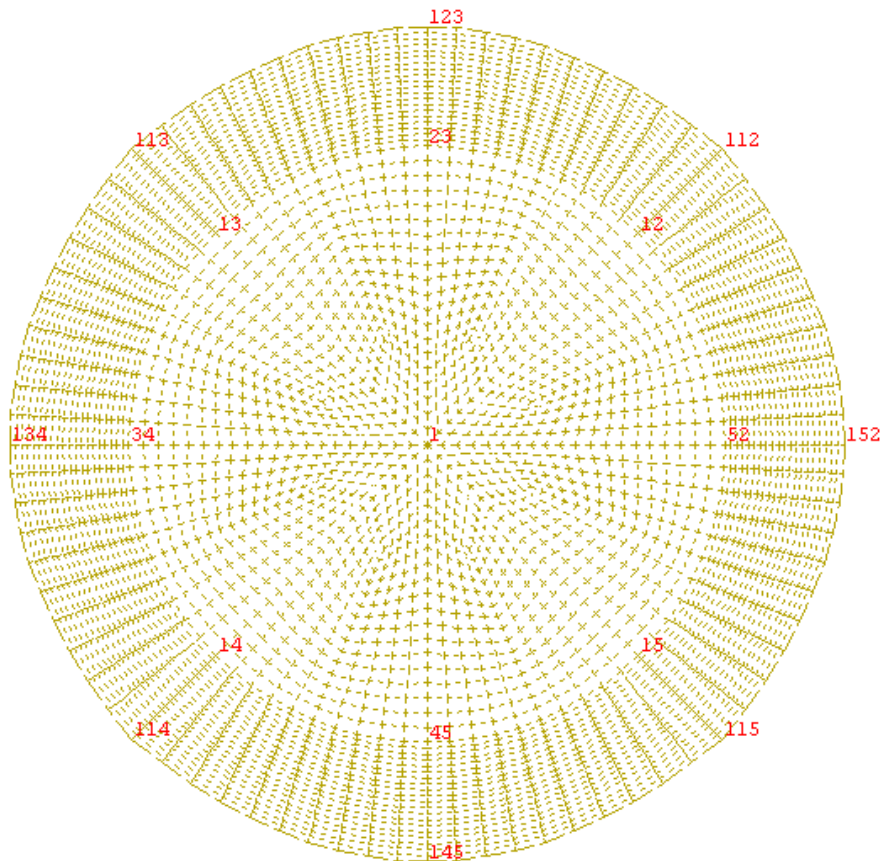
QUAD FIT N1 112 113 13 12 M12 123 M34 23 MNO 1 MRF 2 T 400 KR 1 C 1930

\$ with direction of local x axis to central node

QUAD FIT N1 113 114 14 13 M12 134 M34 34 MNO 1 MRF 2 T 400 KR 1 C 1930

QUAD FIT N1 114 115 15 14 M12 145 M34 45 MNO 1 MRF 2 T 400 KR 1 C 1930

QUAD FIT N1 115 112 12 15 M12 152 M34 52 MNO 1 MRF 2 T 400 KR 1 C 1930



Σχήμα 6: Βασικά σημεία πεδίου.

Έπειτα, κατασκευάζεται το καπάκι της δεξαμενής και μετά ο τοίχος.

\$CAP

\$ central node

NODE NO 100001 X 0 Y 0 Z -#hz

\$central nodes of the cylinder wall

NODE NO 100052 X #rz Y 0 Z -#hz

NODE NO 100045 X 0 Y #rz Z -#hz

NODE NO 100034 X -#rz Y 0 Z -#hz

NODE NO 100023 X 0 Y -#rz Z -#hz

\$corner points of the cylinder wall

NODE NO 100015 X (#rz)*cos(45) Y (#rz)*sin(45) Z -#hz

NODE NO 100014 X (#rz)*cos(135) Y (#rz)*sin(135) Z -#hz

NODE NO 100013 X (#rz)*cos(225) Y (#rz)*sin(225) Z -#hz

NODE NO 100012 X (#rz)*cos(315) Y (#rz)*sin(315) Z -#hz

\$ edges of the cylindrical wall

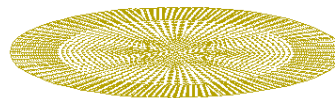
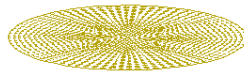
BOUN 10001 TITL '1st quarter'; BOUN NA 100013 100012 NM -100023 DIV #teil*2

BOUN 10002 TITL '2nd quarter'; BOUN NA 100014 100013 NM -100034 DIV #teil*2

BOUN 10003 TITL '3rd quarter'; BOUN NA 100015 100014 NM -100045 DIV #teil*2

```

BOUN 10004 TITL '4th quarter' ; BOUN NA 100012 100015 NM -100052 DIV
#teil*2
$edge plate plate within cylinder
BOUN 100011 TITL 'edge_inside' ; BOUN NA 100001 100012 DIV #teil*2
BOUN 100012 TITL 'edge_inside' ; BOUN NA 100001 100023 DIV #teil*2
BOUN 100013 TITL 'edge_inside' ; BOUN NA 100001 100013 DIV #teil*2
BOUN 100014 TITL 'edge_inside' ; BOUN NA 100001 100034 DIV #teil*2
BOUN 100015 TITL 'edge_inside' ; BOUN NA 100001 100014 DIV #teil*2
BOUN 100016 TITL 'edge_inside' ; BOUN NA 100001 100045 DIV #teil*2
BOUN 100017 TITL 'edge_inside' ; BOUN NA 100001 100015 DIV #teil*2
BOUN 100018 TITL 'edge_inside' ; BOUN NA 100001 100052 DIV #teil*2
GRP 2
$residual plate area inside cylinder
QUAD FIT N1 100052 100012 100001 100001 MNO 1 MRF 2 T 400 KR 1 C 1930 $
with direction of local x axis to central node
QUAD FIT N1 100012 100023 100001 100001 MNO 1 MRF 2 T 400 KR 1 C 1930
QUAD FIT N1 100023 100013 100001 100001 MNO 1 MRF 2 T 400 KR 1 C 1930
QUAD FIT N1 100013 100034 100001 100001 MNO 1 MRF 2 T 400 KR 1 C 1930
QUAD FIT N1 100034 100014 100001 100001 MNO 1 MRF 2 T 400 KR 1 C 1930
QUAD FIT N1 100014 100045 100001 100001 MNO 1 MRF 2 T 400 KR 1 C 1930
QUAD FIT N1 100045 100015 100001 100001 MNO 1 MRF 2 T 400 KR 1 C 1930
QUAD FIT N1 100015 100052 100001 100001 MNO 1 MRF 2 T 400 KR 1 C 1930
    
```

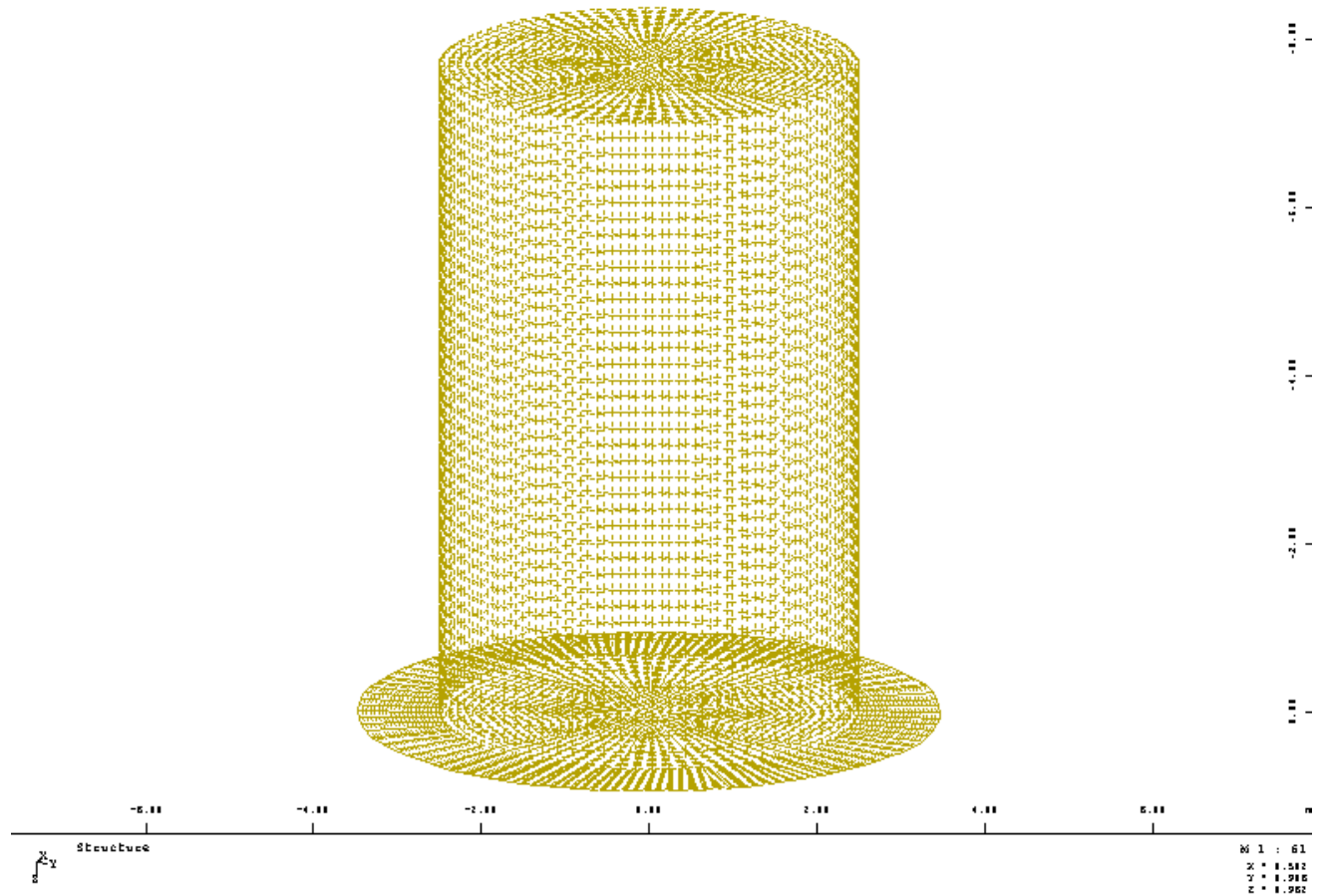


Σχήμα 7: Καπάκι δεξαμενής.

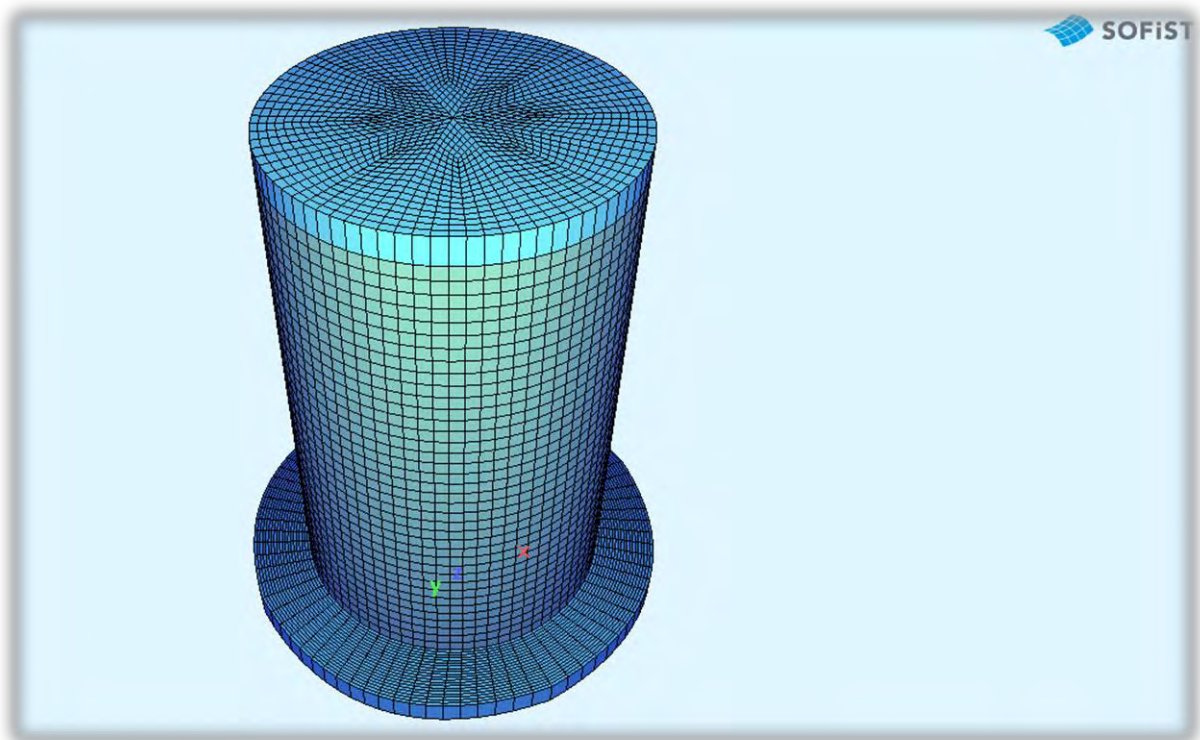
```

$cylinder wall
BOUN NA 12 100012 DIV #teil*4
BOUN NA 23 100023 DIV #teil*4
BOUN NA 13 100013 DIV #teil*4
BOUN NA 34 100034 DIV #teil*4
BOUN NA 14 100014 DIV #teil*4
BOUN NA 45 100045 DIV #teil*4
BOUN NA 15 100015 DIV #teil*4
BOUN NA 52 100052 DIV #teil*4
BOUN NA 12 100012 DIV #teil*4
GRP 3
    
```

QUAD FIT 100012 100013 13 12 M12 100023 MNO 1 MRF 2 T 300 KR 1 C 1930
QUAD FIT 100013 100014 14 13 M12 100034 MNO 1 MRF 2 T 300 KR 1 C 1930
QUAD FIT 100014 100015 15 14 M12 100045 MNO 1 MRF 2 T 300 KR 1 C 1930
QUAD FIT 100015 100012 12 15 M12 100052 MNO 1 MRF 2 T 300 KR 1 C 1930



Σχήμα 8: Η συνολική κατασκευή από το WinGraf.



Σχήμα 9: Η συνολική κατασκευή από το Animator.

Σύμφωνα με το Report, έχουν δημιουργηθεί 7600 τετράπλευρα στοιχεία.

Groups

Grp	number	Type	min-no	max-no	Title
0	260	BOUN	1	21	
	1400	QUAD	1	1400	
	1660	base	0	99999	
1	240	BOUN	100011	110004	
	1600	QUAD	100001	101600	
	1840	base	100000	199999	
2	1400	QUAD	200001	201400	
3	3200	QUAD	300001	303200	
Grp	primary group number	Type	element type		
number	number of elements within group		min-no,max-no	minimum/maximum element number	

Πίνακας 3.2: Πλήθος τετράπλευρων στοιχείων σύμφωνα με το Report.

3.2.3 Εισαγωγή των φορτίων στο πρόγραμμα προσομοίωσης.

Τα φορτία εισάγονται με το +PROG SOFILOAD. Στην πρώτη φόρτιση υπάρχει το βάρος του εδάφους που ασκείται στο πέδιλο, οι ενεργητικές ωθήσεις (στατικές και σεισμικές) και οι ωθήσεις ηρεμίας. Στο πρώτο και τέταρτο τεταρτημόριο δρουν οι ενεργητικές ωθήσεις και στο δεύτερο και τρίτο οι ωθήσεις ηρεμίας. Οι ενεργητικές ωθήσεις έχουν μετατραπεί σε καταναμημένο φορτίο τραπεζοειδούς σχήματος.

```

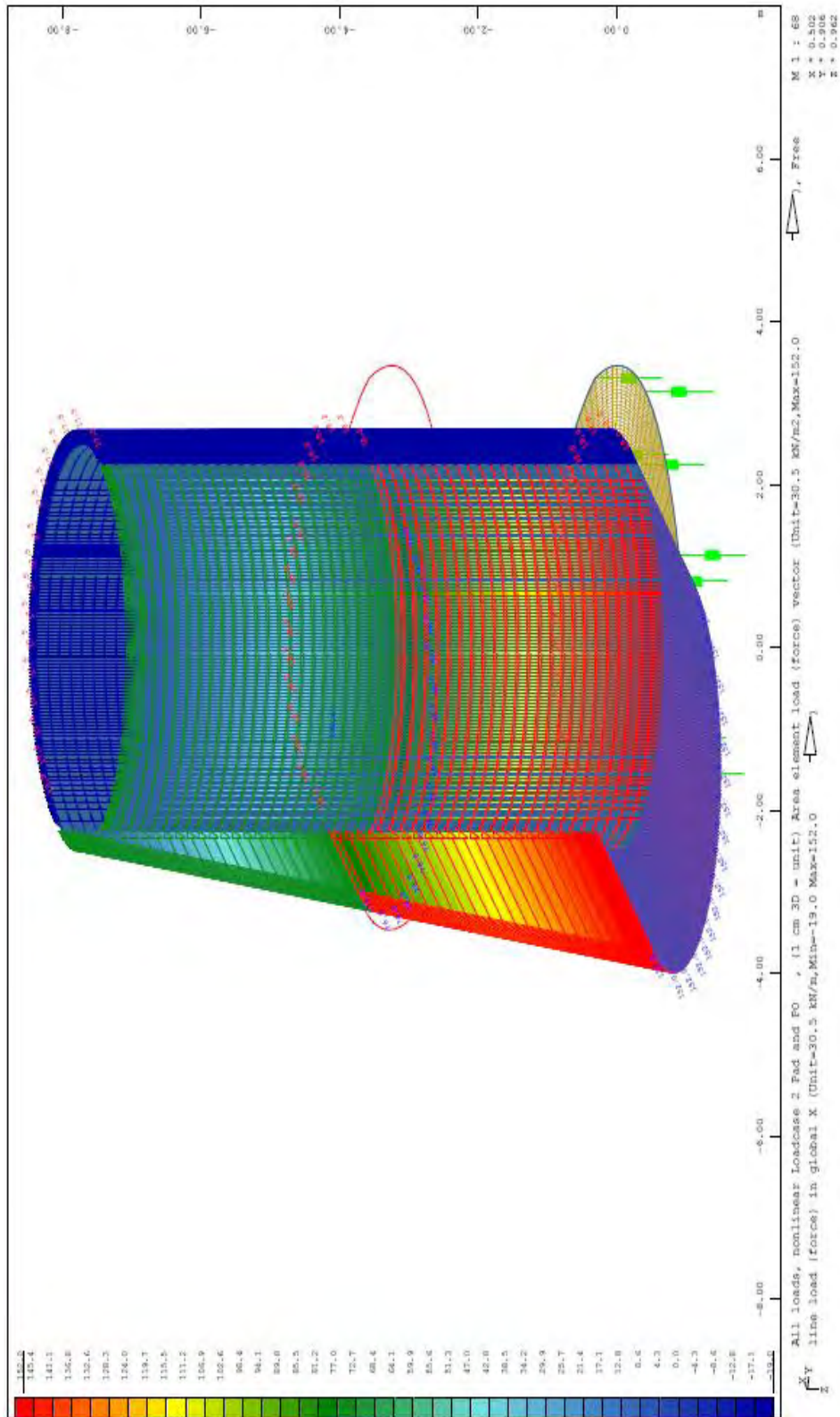
+PROG SOFILOAD urs:3
HEAD LOADS
LC 2 TYPE G TITL "Pad and P0"
QUAD GRP 1 TYPE PG 19*#hz
let#20 0
let#b20 0
loop#b20 90
let#20 #20+1
LINE REF AUTO TYPE PXX P1 -17.45 X1 (#rz)*(COS(#20)) Y1 (#rz)*(SIN(#20))
Z1 -(#hz) P2 -19.05 X2 (#rz)*(COS(#20)) Y2
let#b20 #b20+1
ENDLOOP

let#21 270
let#b21 0
loop#b21 90
let#21 #21+1
LINE REF AUTO TYPE PXX P1 -17.45 X1 (#rz)*(COS(#21)) Y1 (#rz)*(SIN(#21))
Z1 -(#hz) P2 -19.05 X2 (#rz)*(COS(#21)) Y2
let#b21 #b21+1
ENDLOOP

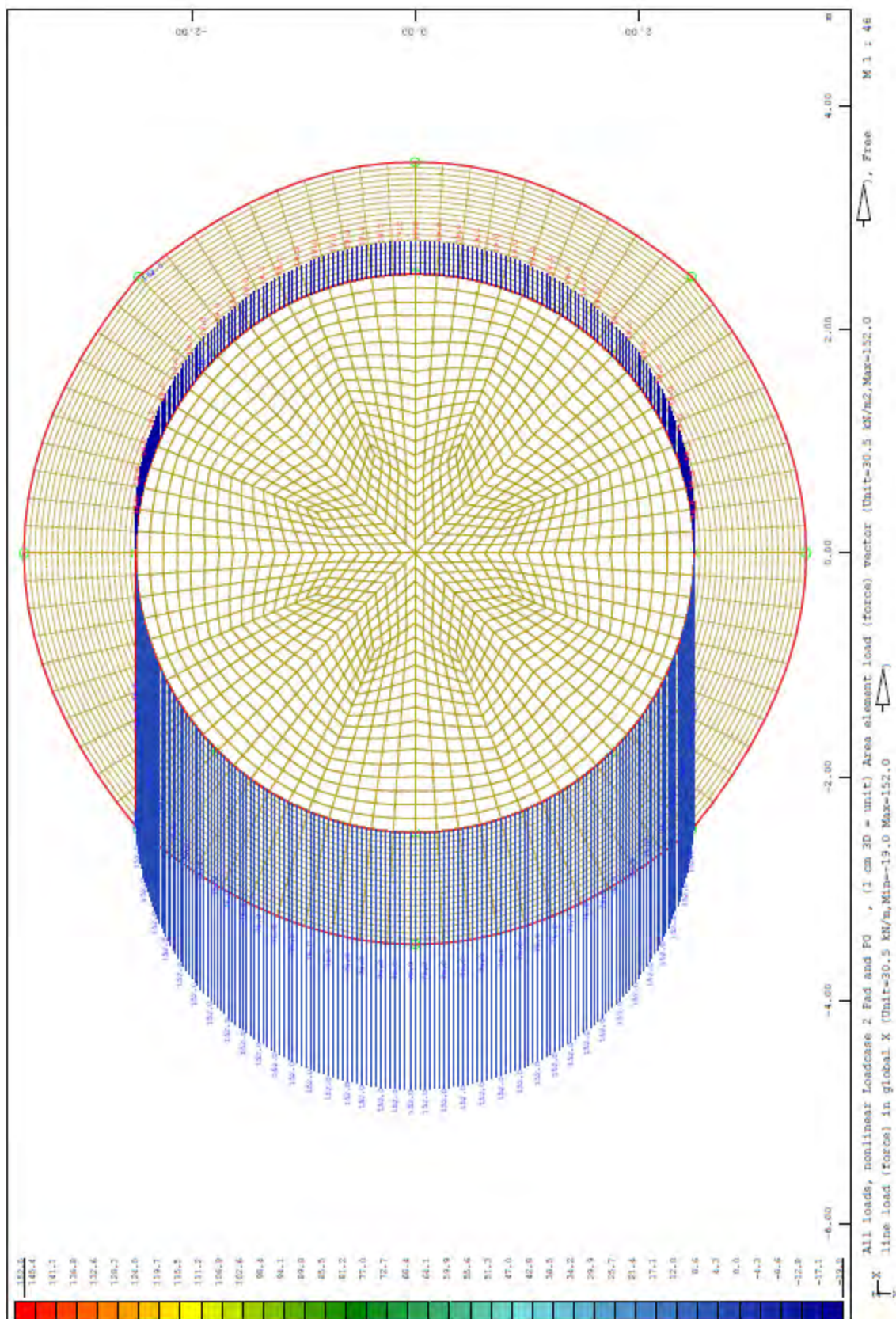
let#22 90
let#b22 0
loop#b22 90
let#22 #22+1
LINE REF AUTO TYPE PXX P1 0 X1 (#rz)*(COS(#22)) Y1 (#rz)*(SIN(#22)) Z1 -
(#hz) P2 152 X2 (#rz)*(COS(#22)) Y2 (#rz)*(SIN(#22))
let#b22 #b22+1
ENDLOOP

let#23 180
let#b23 0
loop#b23 90
let#23 #23+1
LINE REF AUTO TYPE PXX P1 0 X1 (#rz)*(COS(#23)) Y1 (#rz)*(SIN(#23)) Z1 -
(#hz) P2 152 X2 (#rz)*(COS(#23)) Y2 (#rz)*(SIN(#23))
let#b23 #b23+1
ENDLOOP

```



Σχήμα 10: Γραφική απεικόνιση φόρτισης LC 2.



Σχήμα 11: Γραφική απεικόνιση φόρτισης LC 2.

Στην δεύτερη φόρτιση υπάρχουν οι ενεργητικές ωθήσεις στο πρώτο και τέταρτο τεταρτημόριο, ο μέσος όρος των ωθήσεων ηρεμίας και των παθητικών ωθήσεων στο δεύτερο και τρίτο τεταρτημόριο και ομοίως με πριν το βάρος του εδάφους στο πέδιλο.

```

LC 3 TYPE G TITL "Pad and (P0+Ppd)/2"
QUAD GRP 1 TYPE PG 19*#hz
let#30 0
let#b30 0
loop#b30 90
let#30 #30+1
LINE REF AUTO TYPE PXX P1 -17.45 X1 (#rz)*(COS(#30)) Y1 (#rz)*(SIN(#30))
Z1 -(#hz) P2 -19.05 X2 (#rz)*(COS(#30)) Y2 (#rz)*(SIN(#30)) Z2 0
let#30 #30+1
ENDLOOP

let#31 270
let#b31 0
loop#b31 90
let#31 #31+1
LINE REF AUTO TYPE PXX P1 -17.45 X1 (#rz)*(COS(#31)) Y1 (#rz)*(SIN(#31))
Z1 -(#hz) P2 -19.05 X2 (#rz)*(COS(#31)) Y2 (#rz)*(SIN(#31)) Z2 0
let#b31 #b31+1
ENDLOOP

let#32 180
let#b32 0
loop#b32 90
let#32 #32+1
LINE REF AUTO TYPE PXX P1 8.725 X1 (#rz)*(COS(#32)) Y1 (#rz)*(SIN(#32))
Z1 -(#hz) P2 9.525 X2 (#rz)*(COS(#32)) Y2 (#rz)*(SIN(#32)) Z2 0
let#b32 #b32+1
ENDLOOP

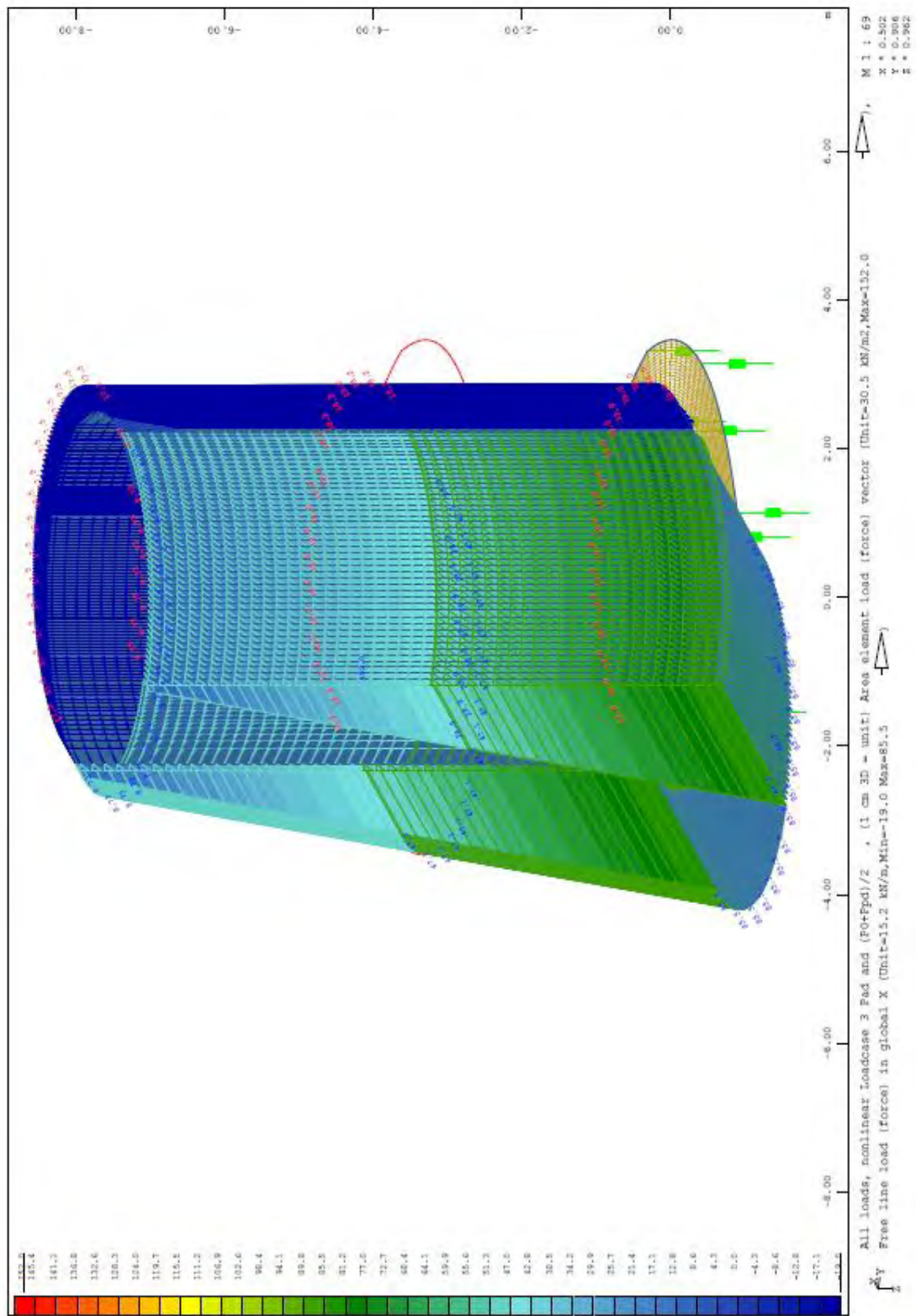
let#33 90
let#b33 0
loop#b33 90
let#33 #33+1
LINE REF AUTO TYPE PXX P1 8.725 X1 (#rz)*(COS(#33)) Y1 (#rz)*(SIN(#33))
Z1 -(#hz) P2 9.525 X2 (#rz)*(COS(#33)) Y2 (#rz)*(SIN(#33)) Z2 0
let#b33 #b33+1
ENDLOOP

let#34 180
let#b34 0
loop#b34 90
let#34 #34+1

```

```
LINE REF AUTO TYPE PXX P1 0 X1 (#rz)*(COS(#34)) Y1 (#rz)*(SIN(#34)) Z1 -  
(#hz) P2 76 X2 (#rz)*(COS(#34)) Y2 (#rz)*(SIN(#34))  
let#b34 #b34+1  
ENDLOOP
```

```
let#35 90  
let#b35 0  
loop#b35 90  
let#35 #35+1  
LINE REF AUTO TYPE PXX P1 0 X1 (#rz)*(COS(#35)) Y1 (#rz)*(SIN(#35)) Z1 -  
(#hz) P2 76 X2 (#rz)*(COS(#35)) Y2 (#rz)*(SIN(#35)) Z2 0  
let#b35 #b35+1  
ENDLOOP
```



Σχήμα 12: Γραφική απεικόνιση φόρτισης LC 3.

Τέλος, στην τελευταία φόρτιση είναι οι ενεργητικές ωθήσεις στο πρώτο και τέταρτο τεταρτημόριο της δεξαμενή, οι παθητικές ωθήσεις στο δεύτερο και τρίτο τεταρτημόριο και το βάρος του εδάφους στη θεμελίωση της δεξαμενής.

LC 4 TYPE G TITL "Pad and Ppd"

QUAD GRP 1 TYPE PG 19*#hz

let#40 0

let#b40 0

loop#b40 90

let#40 #40+1

LINE REF AUTO TYPE PXX P1 -17.45 X1 (#rz)*(COS(#40)) Y1 (#rz)*(SIN(#40))

Z1 -(#hz) P2 -19.05 X2 (#rz)*(COS(#40)) Y2(#rz)*(SIN(#40)) Z2 0

let#b40 #b40+1

ENDLOOP

let#41 270

let#b41 0

loop#b41 90

let#41 #41+1

LINE REF AUTO TYPE PXX P1 -17.45 X1 (#rz)*(COS(#41)) Y1 (#rz)*(SIN(#41))

Z1 -(#hz) P2 -19.05 X2 (#rz)*(COS(#41)) Y2(#rz)*(SIN(#41)) Z2 0

let#b41 #b41+1

ENDLOOP

let#42 180

let#b42 0

loop#b42 90

let#42 #42+1

LINE REF AUTO TYPE PXX P1 17.7 X1 (#rz)*(COS(#42)) Y1 (#rz)*(SIN(#42)) Z1

-(#hz) P2 19.3 X2 (#rz)*(COS(#42)) Y2 (#rz)*(SIN(#42)) Z2 0

let#b42 #b42+1

ENDLOOP

let#43 90

let#b43 0

loop#b43 90

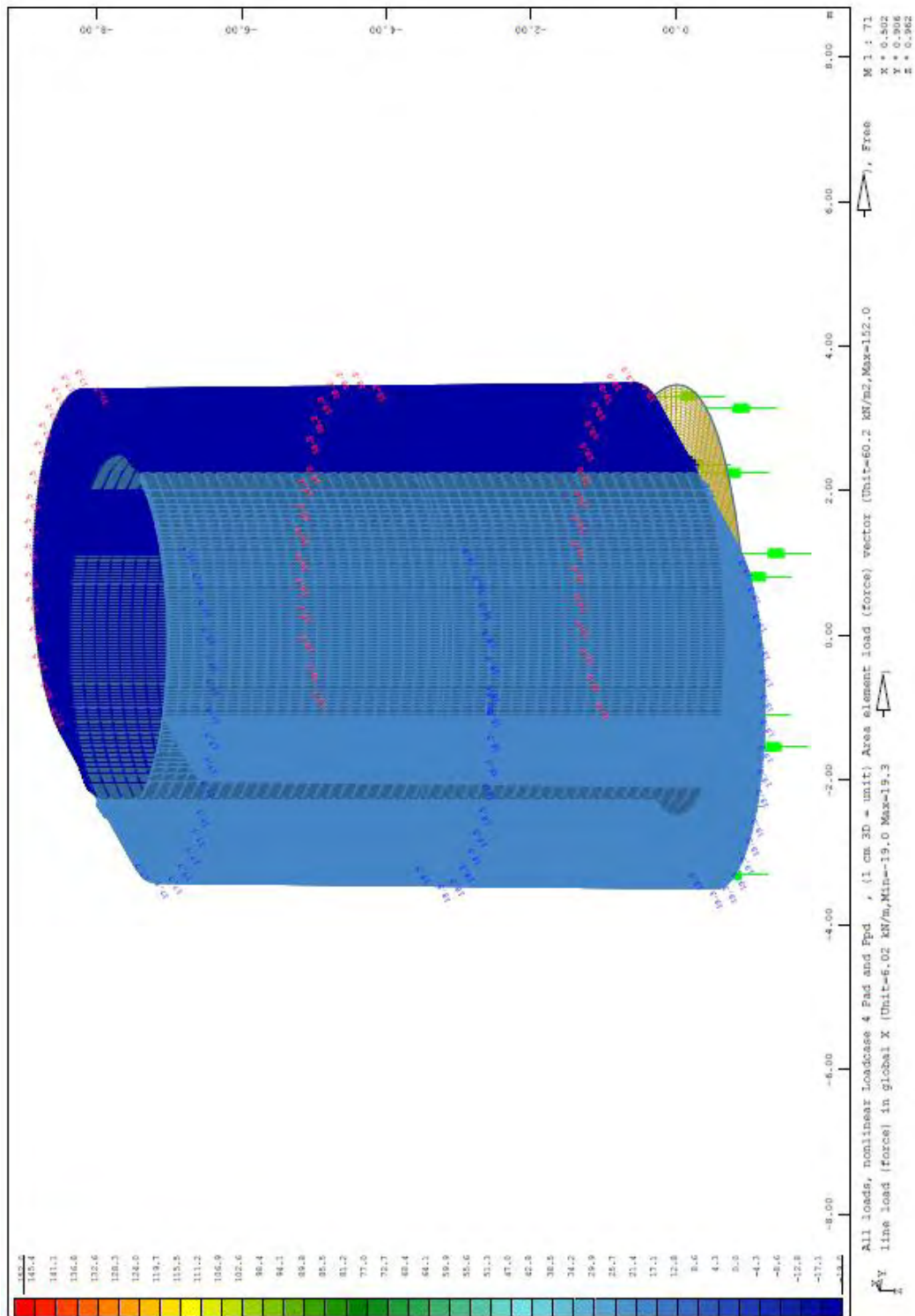
let#43 #43+1

LINE REF AUTO TYPE PXX P1 17.7 X1 (#rz)*(COS(#43)) Y1 (#rz)*(SIN(#43)) Z1

-(#hz) P2 19.3 X2 (#rz)*(COS(#43)) Y2 (#rz)*(SIN(#43)) Z2 0

let#b43 #b43+1

ENDLOOP



Σχήμα 13: Γραφική απεικόνιση φόρτισης LC 4.

3.3 Προσομοίωση στις δυο διαστάσεις.

3.3.1 Κυκλικός δακτύλιος: γεωμετρία και φορτία.

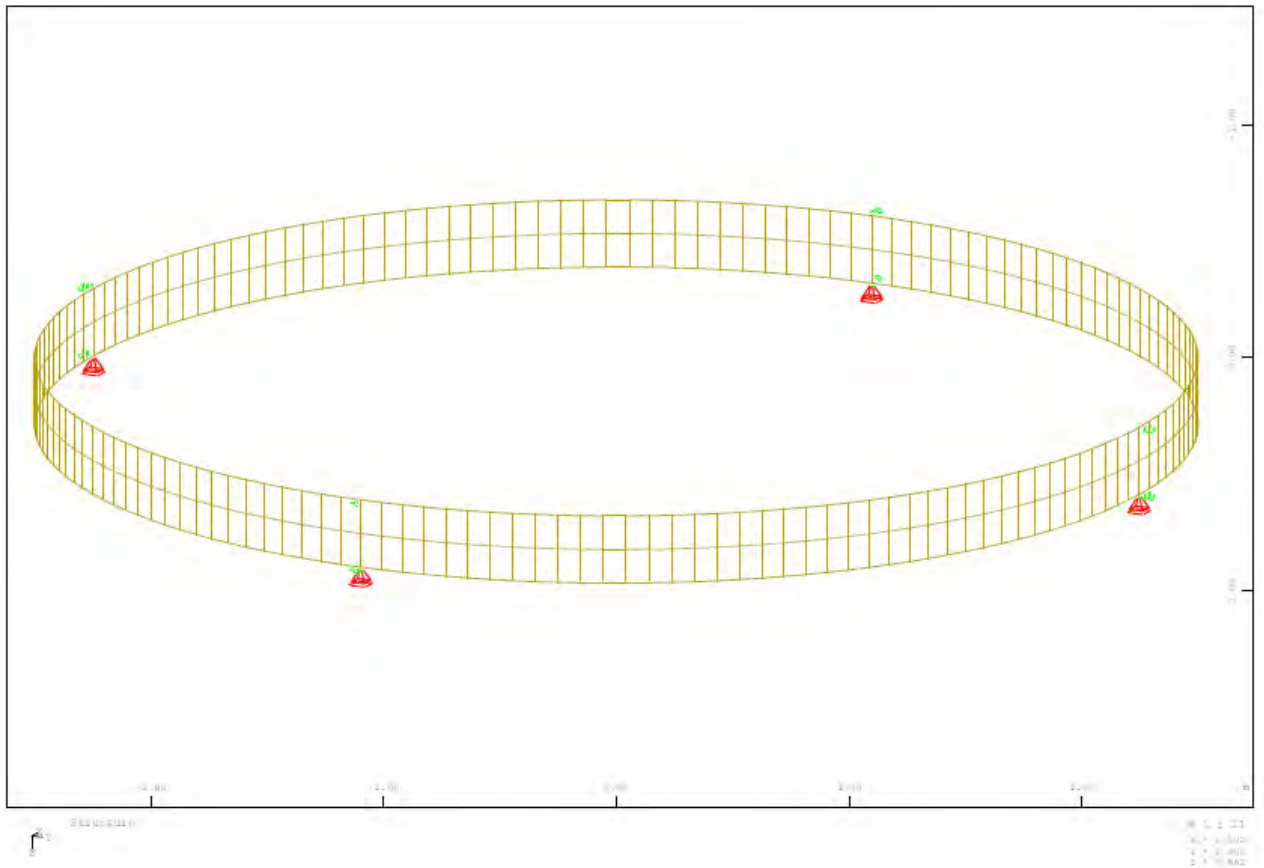
Στην αρχή εισάγεται στο PROG AQUA τα υλικά και ιδιότητές τους που είναι τα ίδια με τις τρεις διαστάσεις. Έπειτα, εισάγεται η γεωμετρία τις κατασκευής.

+PROG AQUA

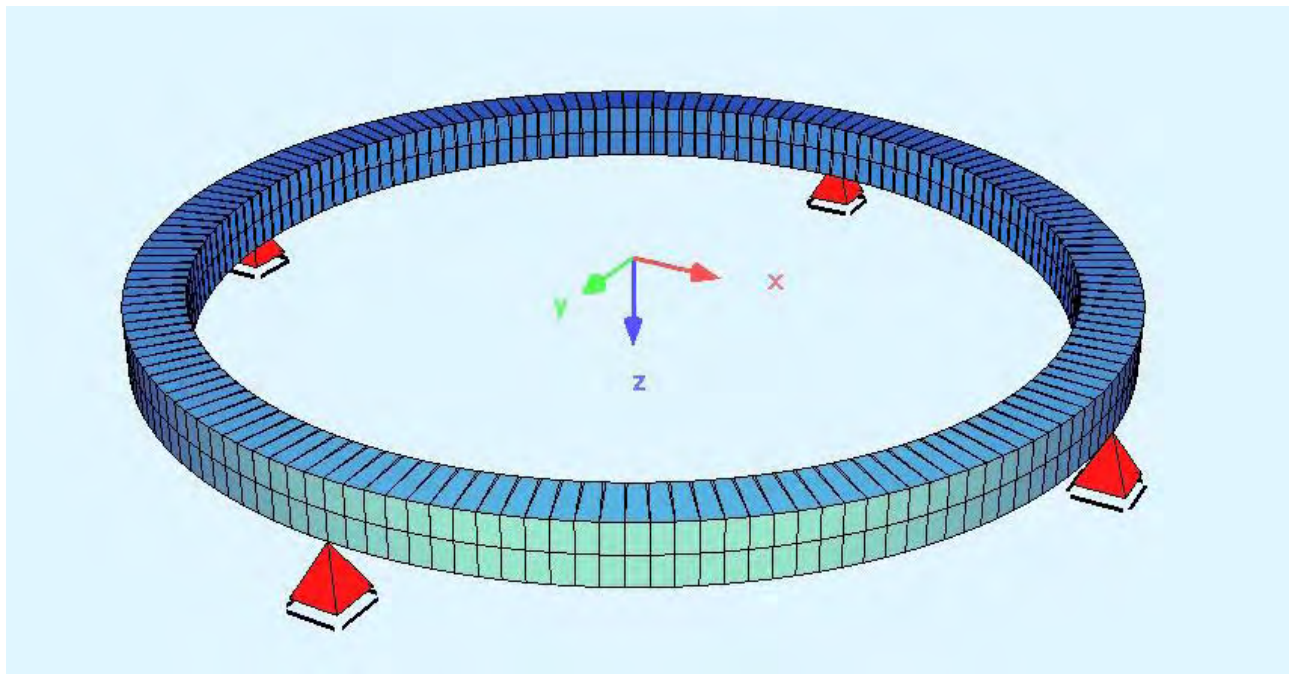
```
HEAD Circular Plate with Cylinder
NORM EN 1992-2004
CONC 1 C 25
STEE 2 S 500
MATE 91 GAM 19 TYPE CLAY
BORE NO 1 X 0 Y 0 Z 0 NZ 1.0 TITL 'BOREHOLE'
BLAY S 10 MNO 91 MUE 0.35 C 50 PHI 0
BBAX S1 0.0 S2 10.0 KSIG 1 TANR 0
BBLA S1 0.0 S2 10.0 K0 9652
ECHO MAT EXTR
ECHO PICT EXTR
END
```

+PROG SOFIMSHA

```
HEAD Circular Plate with Cylinder
SYST SPAC GDIV 100000
sto#r 2.5 $ radius cylinder
sto#teil 10 $ subdivision
QUAD PROP MNO 1 T 300 POSI ABOV C 1930 $ plate properties
$ central node
NODE NO 1 X 0 Y 0 Z 0
NODE 52 #r 0 0
NODE 15 (#r)*cos(45) (#r)*sin(45) 0
NODE 45 0 #r 0
NODE 14 (#r)*cos(135) (#r)*sin(135) 0
NODE 34 -#r 0 0
NODE 13 (#r)*cos(225) (#r)*sin(225) 0
NODE 23 0 -#r 0
NODE 12 (#r)*cos(315) (#r)*sin(315) 0
NODE 100052 #r 0 0.3 FIX PZ
NODE 100015 (#r)*cos(45) (#r)*sin(45) 0.3
NODE 100045 0 #r 0.3 FIX PZ
NODE 100014 (#r)*cos(135) (#r)*sin(135) 0.3
NODE 100034 -#r 0 0.3 FIX PZ
NODE 100013 (#r)*cos(225) (#r)*sin(225) 0.3
NODE 100023 0 -#r 0.3 FIX PZ
NODE 100012 (#r)*cos(315) (#r)*sin(315) 0.3
```



Σχήμα 14: Γραφική απεικόνιση κυκλικού δακτυλίου.



Σχήμα 15: Γραφική απεικόνιση κυκλικού δακτυλίου στο Animator.

Σύμφωνα με το Report, έχουν δημιουργηθεί 320 τετράπλευρα στοιχεία.

Πίνακας 3.3: Πλήθος τετράπλευρων στοιχείων σύμφωνα με το Report.

Groups

Grp	number	Type	min-no	max-no	Title
0	336	BOUN	1	4	
	160	QUAD	1	160	
	496	base	0	99999	
1	8	SPRI	100023	100152	
	160	QUAD	100001	100160	
	168	base	100000		
Grp number	primary group number number of elements within group		Type min-no,max-no	element type minimum/maximum element number	

Τα φορτία για τον κυκλικό δακτύλιο είναι οι ωθήσεις ηρεμίας σε ύψος $0,6h = 4.8m$, όπου σύμφωνα με τις εξισώσεις Monopobe-Okabe εκεί ασκούνται οι ενεργητικές ωθήσεις (στατικές και σεισμικές), οι ωθήσεις ηρεμίας που λαμβάνονται ως κατανεμημένο φορτίο και οι παθητικές ωθήσεις. Όπως και στην δεξαμενή, η πρώτη φόρτιση περιλαμβάνει τις ωθήσεις ηρεμίας και τις ενεργητικές ωθήσεις. Η δεύτερη, τις ενεργητικές ωθήσεις και τον μέσο όρο των ωθήσεων ηρεμίας και των παθητικών ωθήσεων και τέλος, στην τρίτη φόρτιση υπάρχουν οι ενεργητικές και παθητικές ωθήσεις.

+PROG SOFILOAD urs:3

HEAD LOADS

LC 2 TYPE G TITL "Pad and P0"

QUAD GRP 0 TYPE PZ -146

QUAD GRP 1 TYPE PZ -97.28

LC 3 TYPE G TITL "Pad and (Ppd+P0)/2"

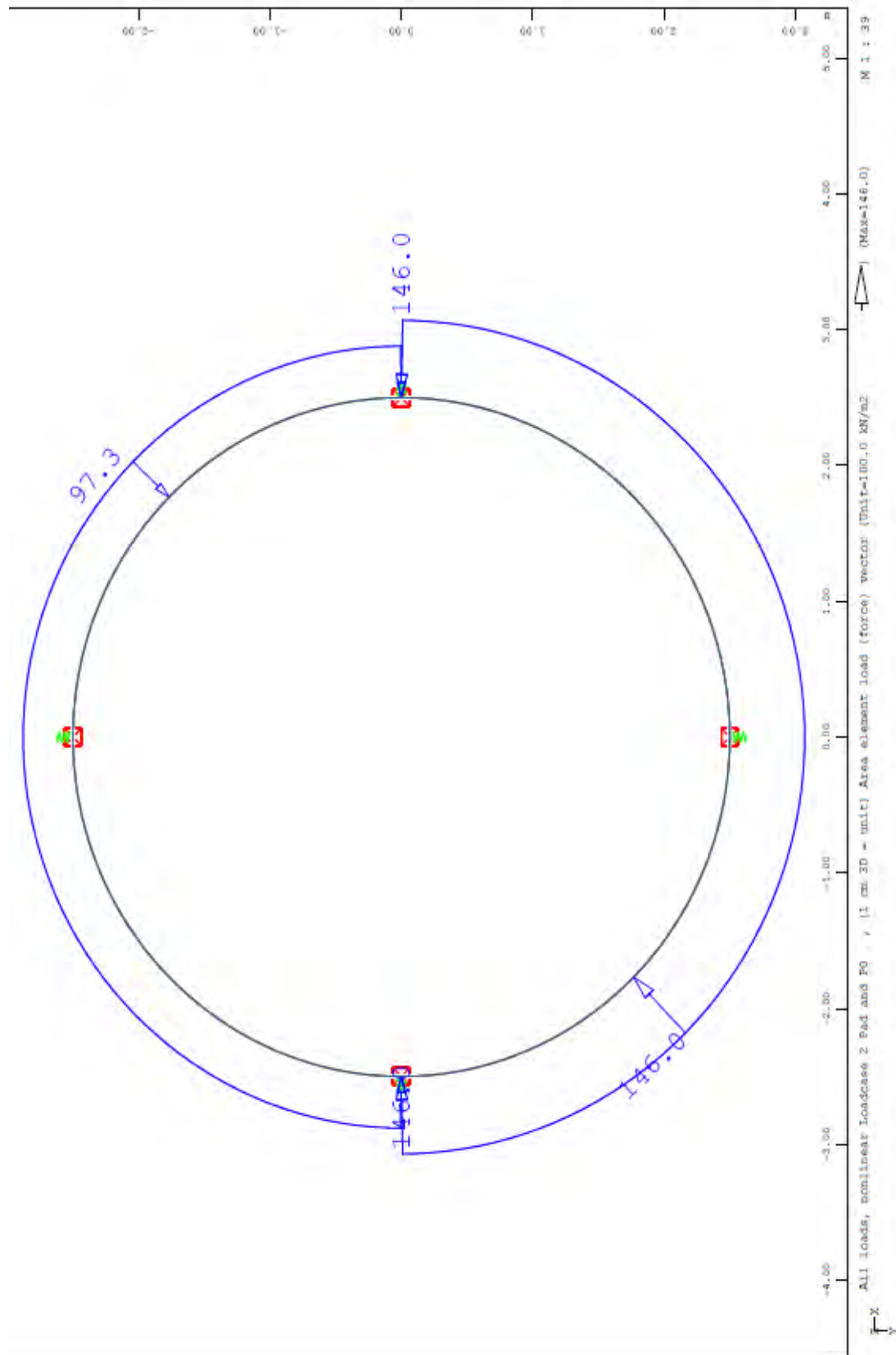
QUAD GRP 0 TYPE PZ -146

QUAD GRP 1 TYPE PZ -122.64

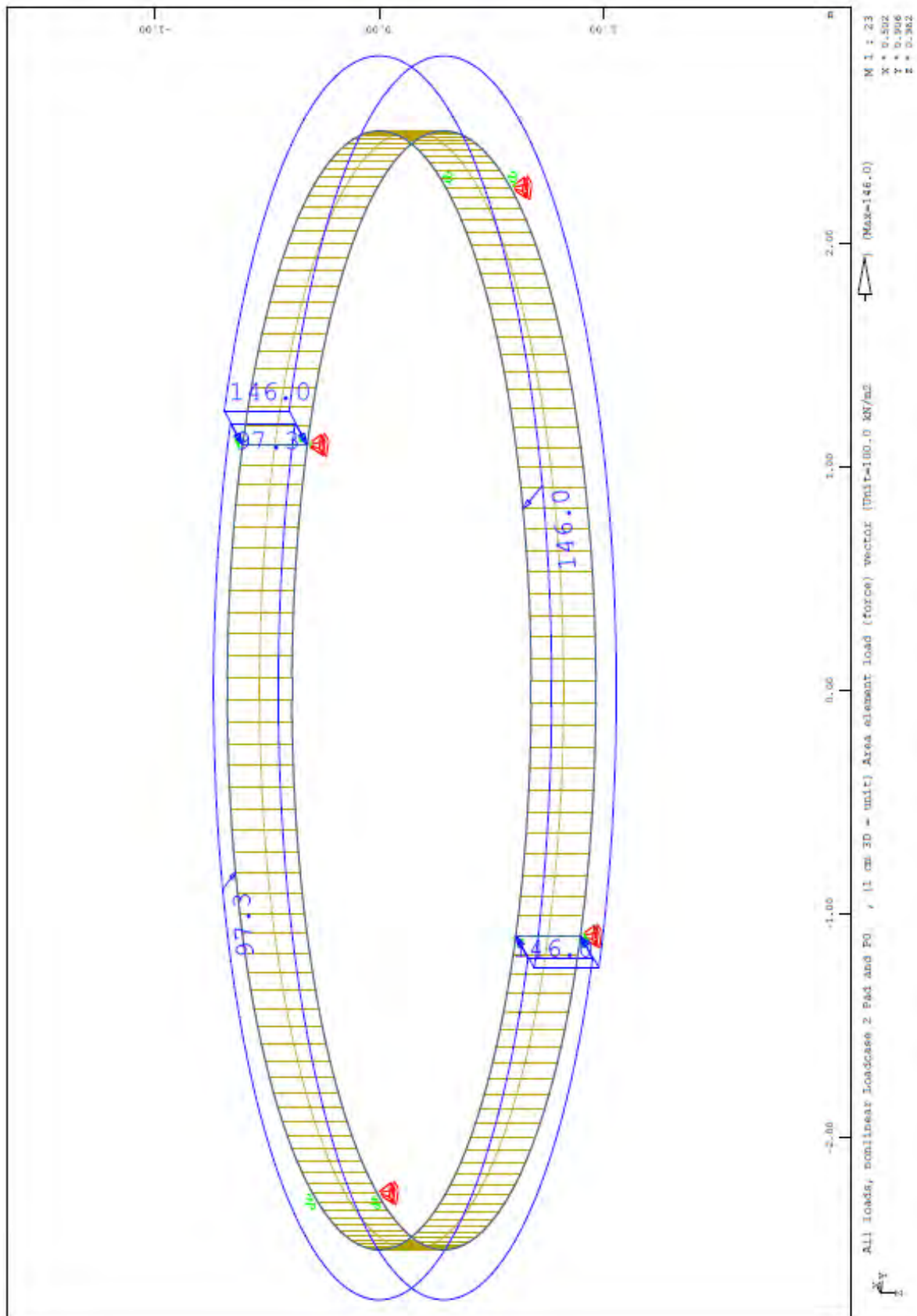
LC 4 TYPE G TITL "Pad and Ppd"

QUAD GRP 0 TYPE PZ -146

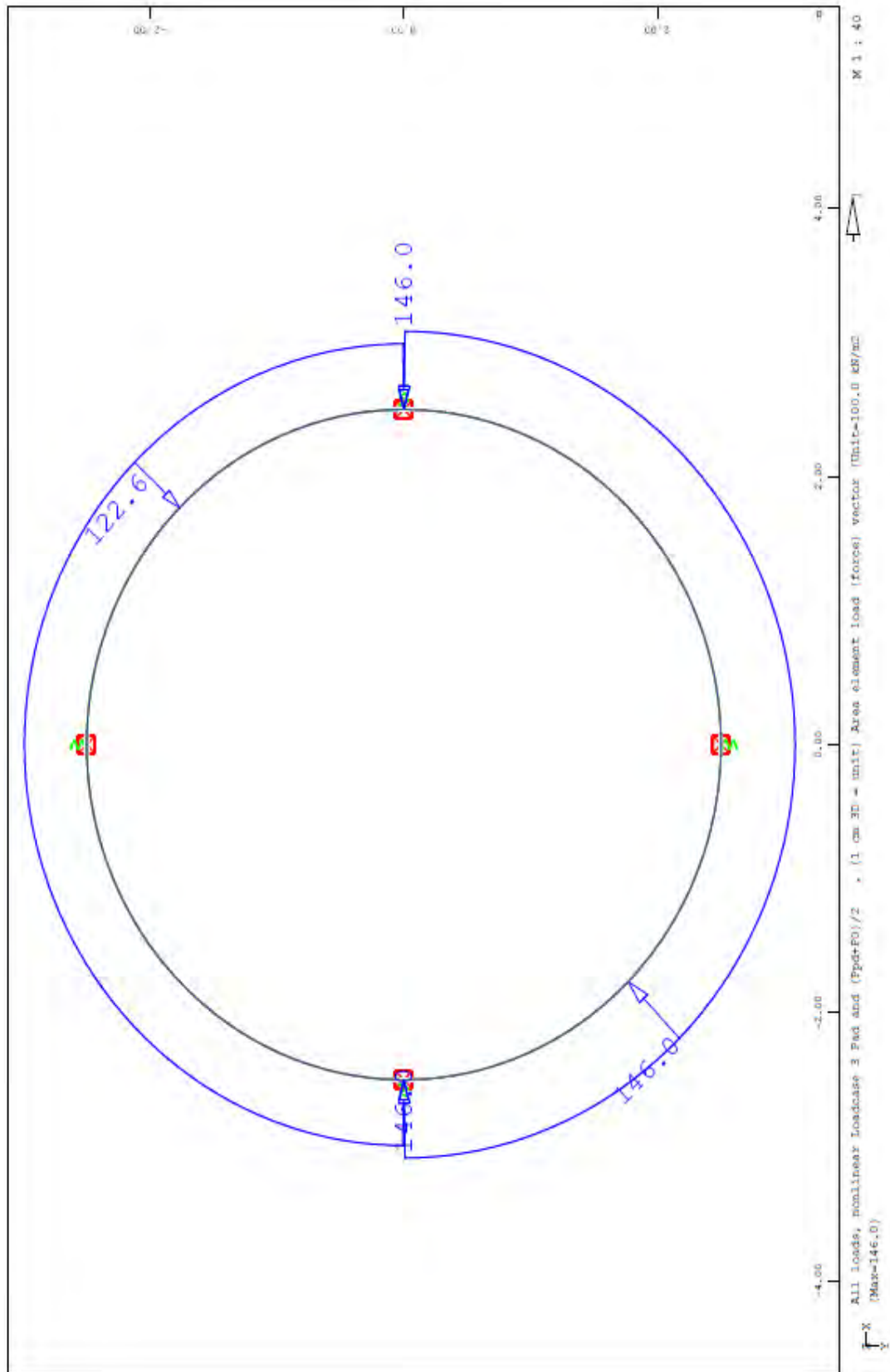
QUAD GRP 1 TYPE PZ -148



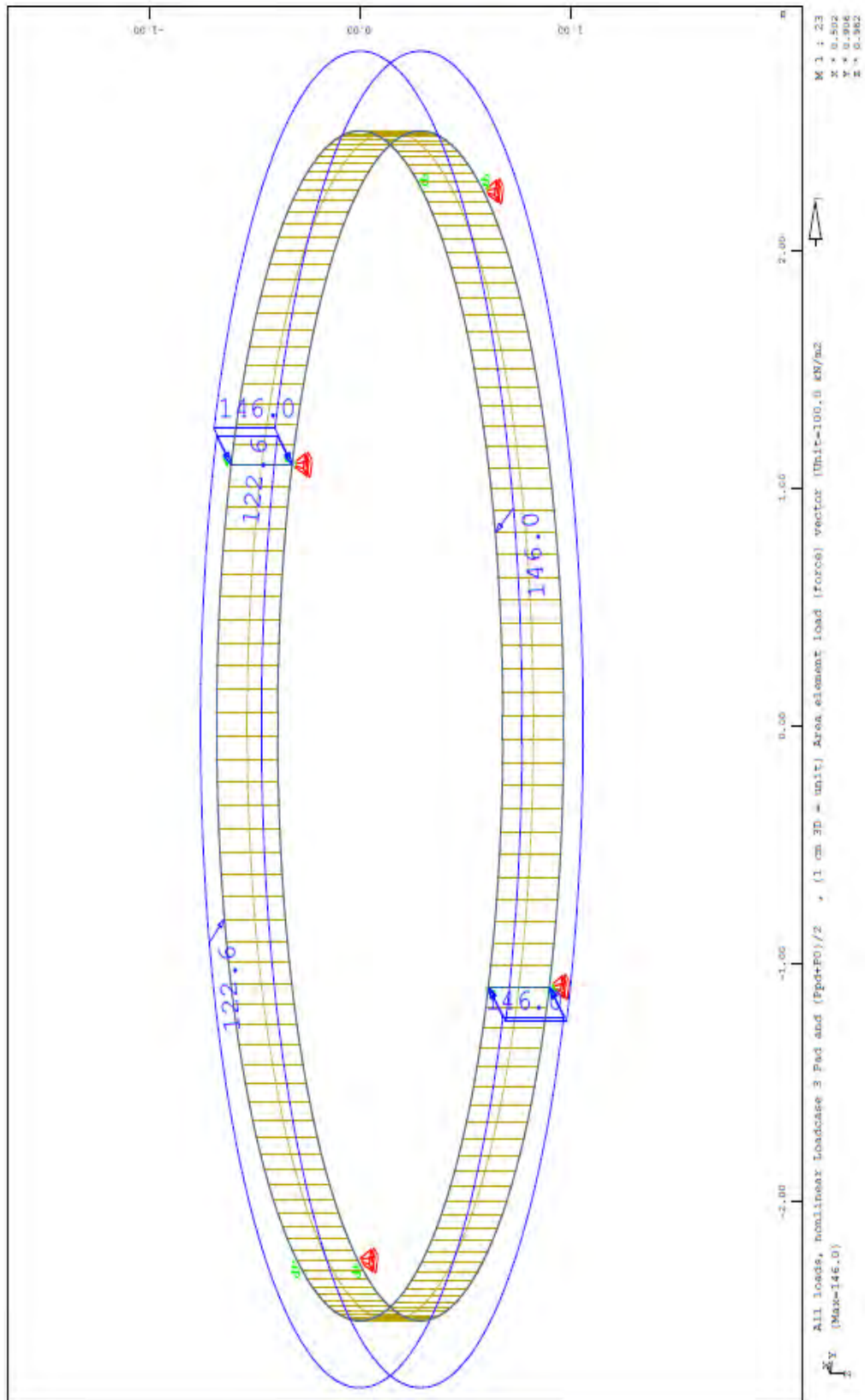
Σχήμα 16: Γραφική απεικόνιση πρώτης φόρτισης (LC 2).



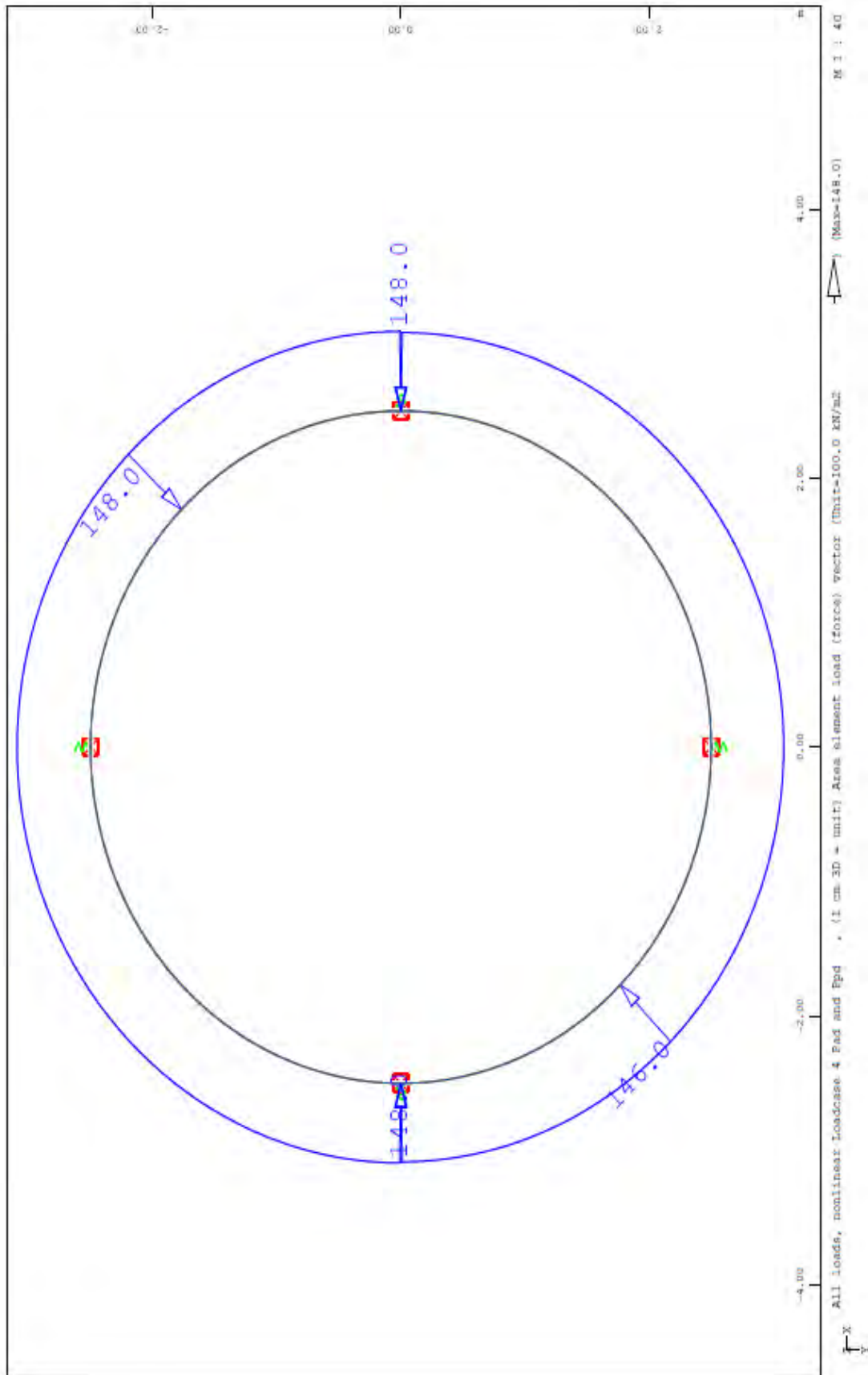
Σχήμα 17: Γραφική απεικόνιση πρώτης φόρτισης (LC 2).



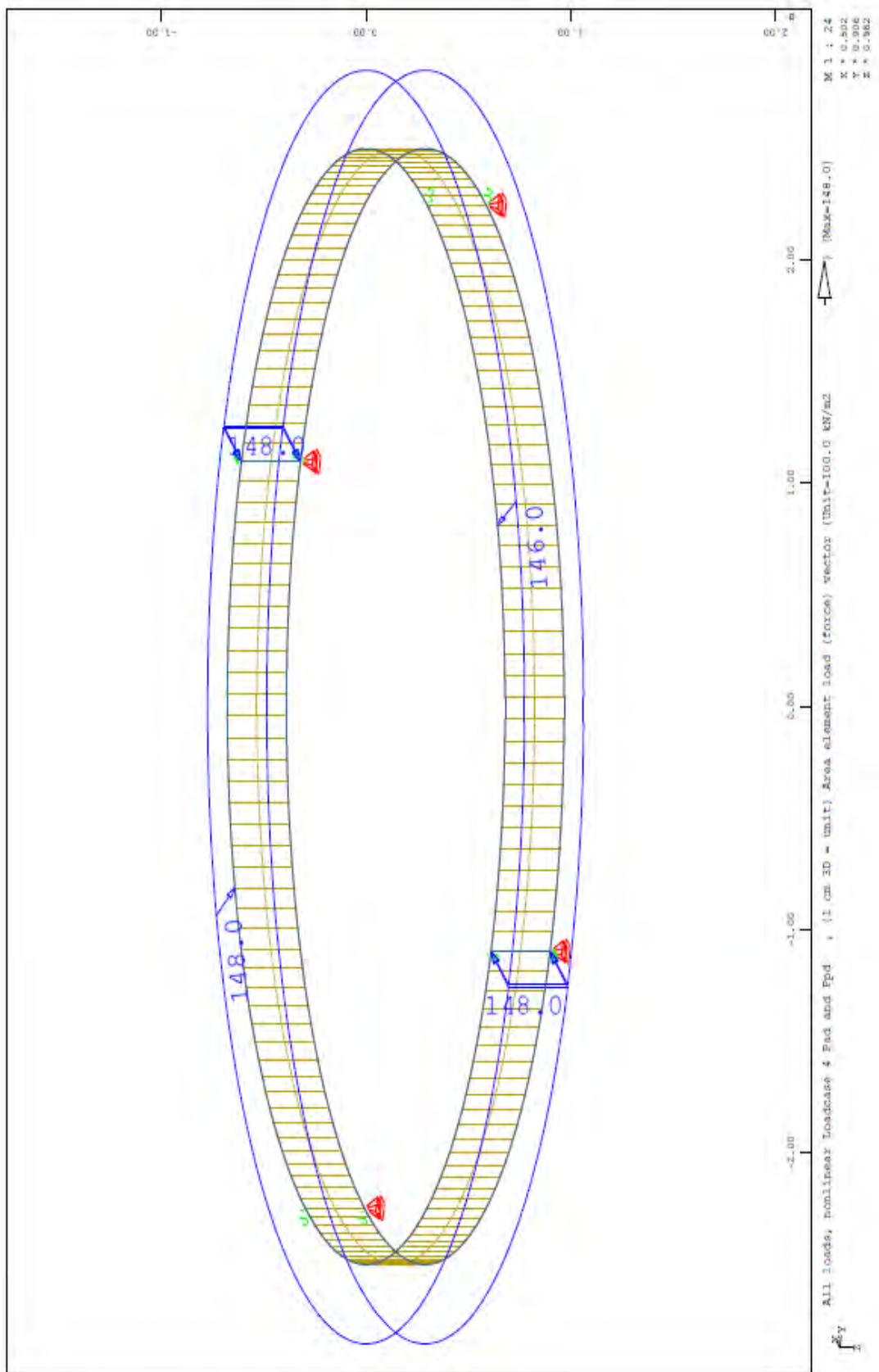
Σχήμα 18: Γραφική απεικόνιση δεύτερης φόρτισης (LC 3).



Σχήμα 19: Γραφική απεικόνιση δεύτερης φόρτισης (LC 3).

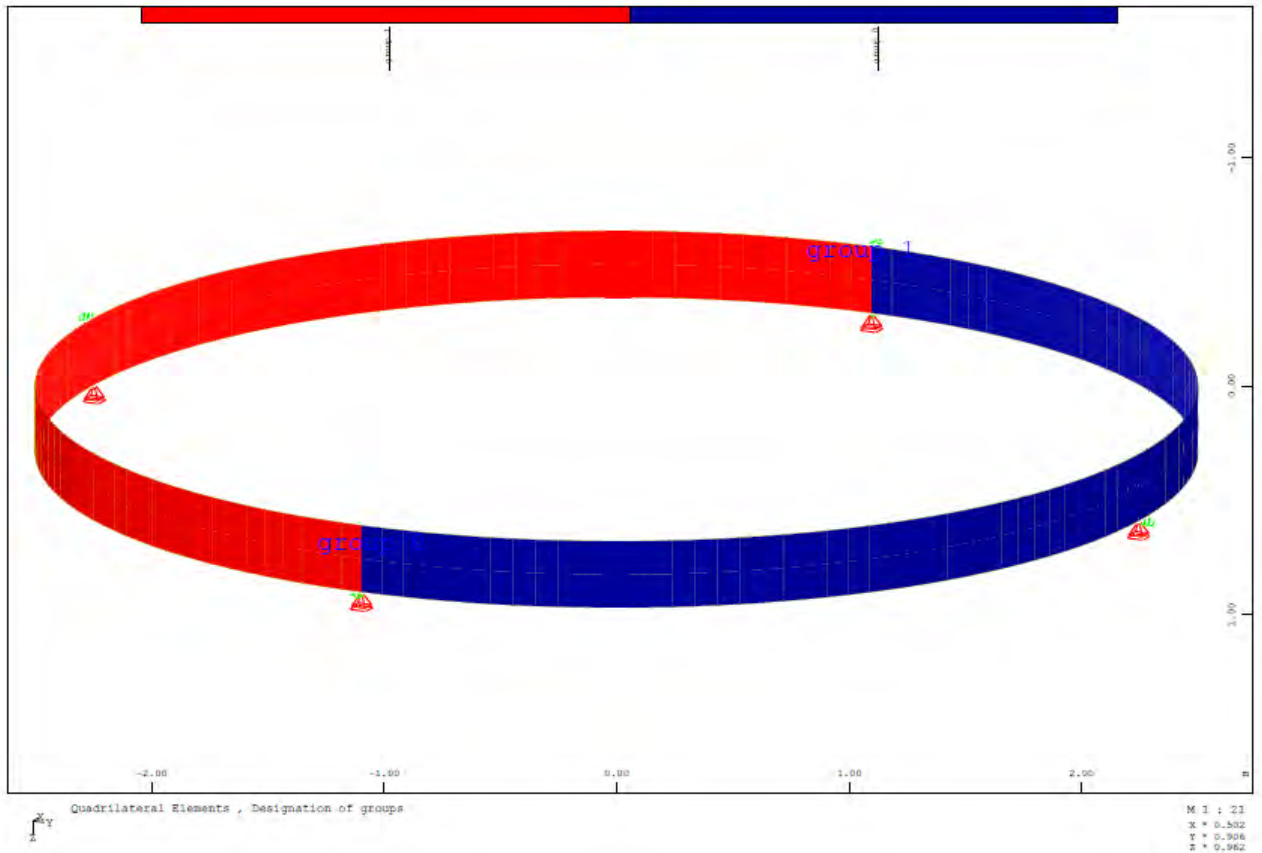


Σχήμα 20: Γραφική απεικόνιση τρίτης φόρτισης (LC 4).



Σχήμα 21: Γραφική απεικόνιση τρίτης φόρτισης (LC 4).

Για να εισαχθούν τα φορτία χωρίστηκε ο κυκλικός δακτύλιος σε 2 ομάδες (group).



Σχήμα 22: Γραφική απεικόνιση ομάδων κυκλικού δακτύλιου.

3.3.1 Πλαίσιο: γεωμετρία και φορτία.

Στην αρχή εισάγεται στο PROG AQUA τα υλικά και ιδιότητές τους που είναι τα ίδια με τις τρεις διαστάσεις. Έπειτα, εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής.

```
+PROG AQUA
HEAD Circular Plate with Cylinder
NORM EN 1992-2004
CONC 1 C 30
STEE 2 S 500
MATE 91 GAM 19 TYPE CLAY
BORE NO 1 X 0 Y 0 Z 0 NZ 1.0 TITL 'BOREHOLE'
BLAY S 10 MNO 91 MUE 0.35 C 50 PHI 0
BBAX S1 0.0 S2 10.0 KSIG 1 TANR 0
BBLA S1 0.0 S2 10.0 K0 9652
ECHO MAT EXTR
ECHO PICT EXTR
END
```

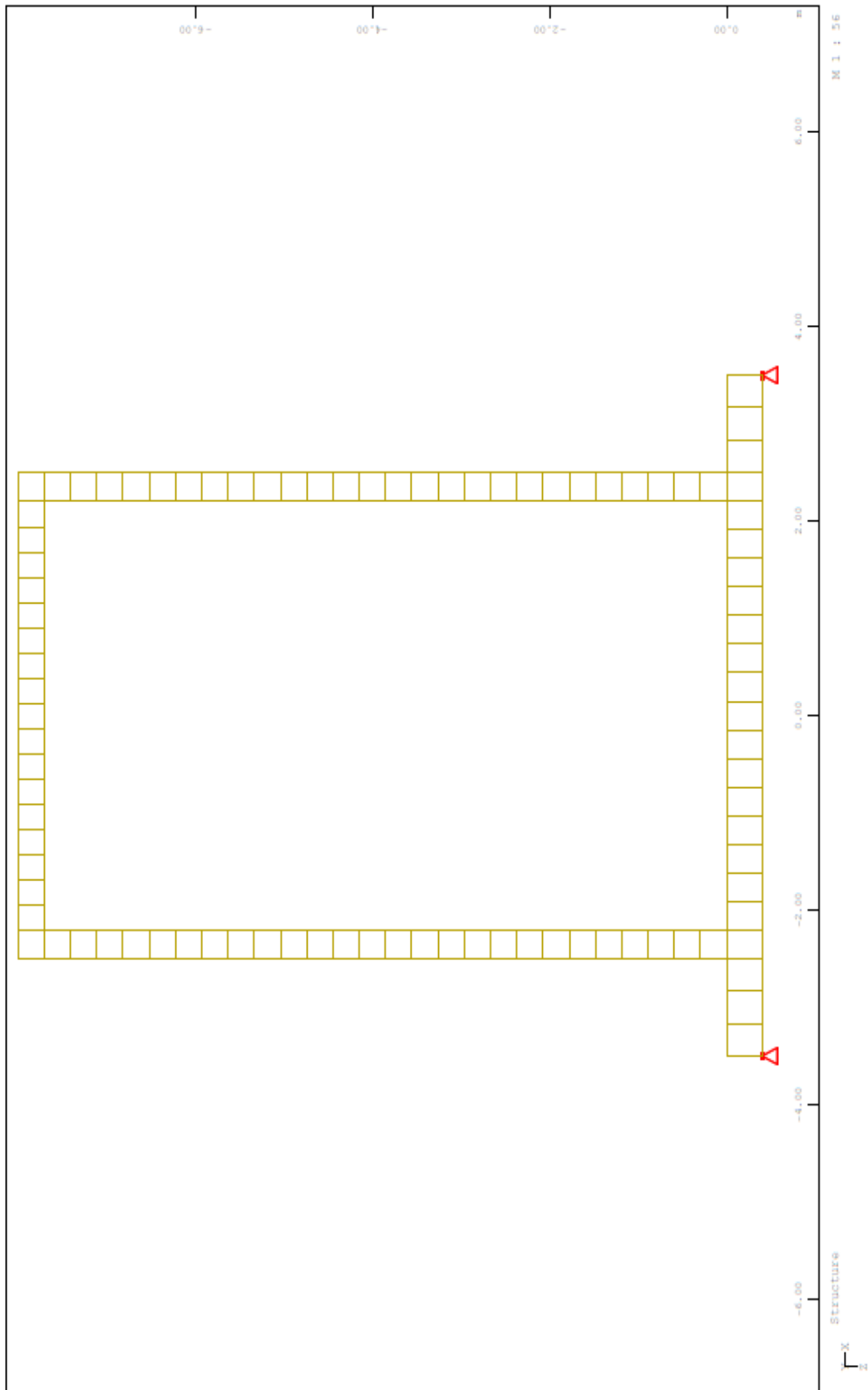
```
+PROG SOFIMSHA
HEAD Circular Plate with Cylinder
SYST SPAC GDIV 100000
```



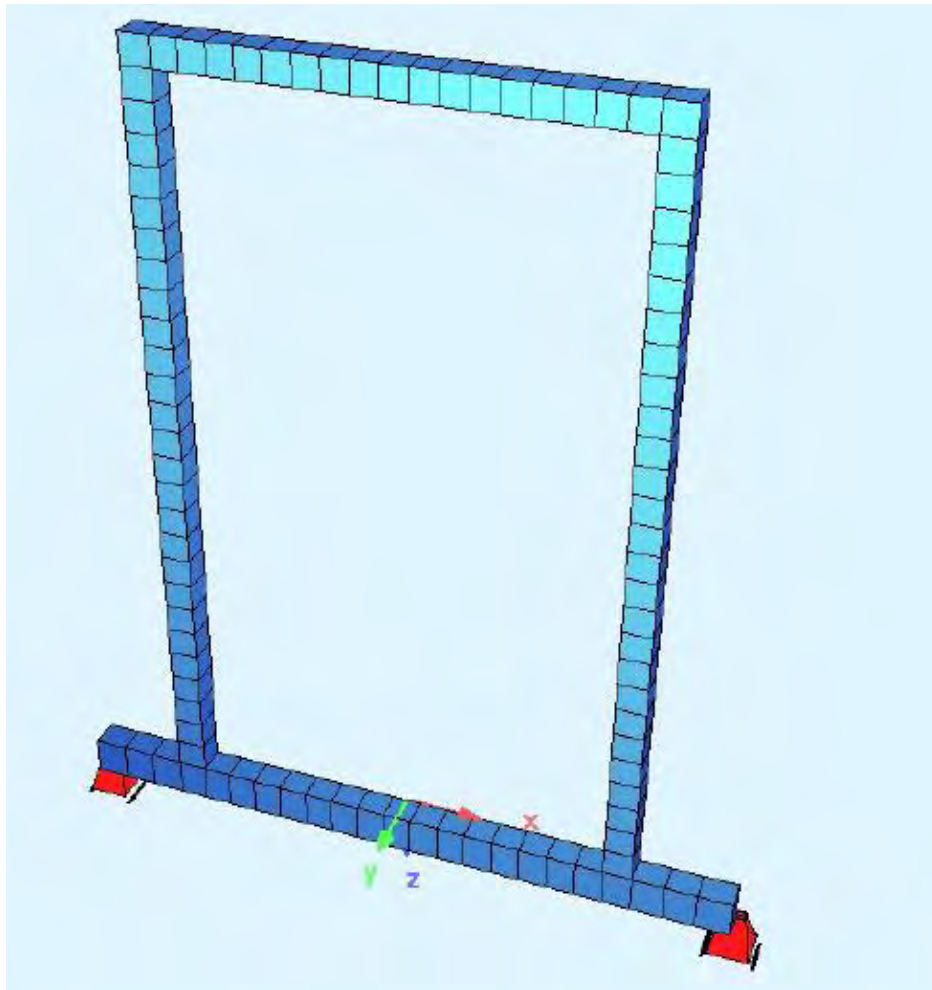
```

sto#rz 2.5 $ radius cylinder
sto#hz 8.0 $ height cylinder
sto#rp 3.5 $ radius circular plate
sto#teil 10 $ subdivision
NODE 1 0 0 0
NODE 2 #rz 0 0
NODE 3 #rz 0 -#hz $FIX PY,MY
NODE 4 -#rz 0 -#hz $FIX PY,MY
NODE 5 -#rz 0 0
NODE 6 #rp 0 0
NODE 7 -#rp 0 0
NODE 8 -#rp 0 0.4 FIX YP,XM
NODE 9 #rp 0 0.4 FIX YP,XM
NODE 15 -(#rz-0.3) 0 0
NODE 12 (#rz-0.3) 0 0
NODE 14 -(#rz-0.3) 0 -#hz
NODE 13 (#rz-0.3) 0 -#hz
NODE 24 -#rz 0 -(#hz-0.3)
NODE 23 #rz 0 -(#hz-0.3)
NODE 34 -(#rz-0.3) 0 -(#hz-0.3)
NODE 33 (#rz-0.3) 0 -(#hz-0.3)
NODE 25 -#rz 0 0.4
NODE 22 #rz 0 0.4
NODE 26 -(#rz-1) 0 0.4
NODE 27 -(#rz-2) 0 0.4
NODE 28 (#rz-1) 0 0.4
NODE 29 (#rz-2) 0 0.4
NODE 30 -1.75 0 0.4
NODE 31 1.75 0 0.4
NODE 53 #rz 0 -(#hz-6)
NODE 63 #rz 0 -(#hz-4)
NODE 73 #rz 0 -(#hz-2)
NODE 54 -#rz 0 -(#hz-6)
NODE 64 -#rz 0 -(#hz-4)
NODE 74 -#rz 0 -(#hz-2)

```



Σχήμα 23: Γραφική απεικόνιση πλαισίου.



Σχήμα 24: Γραφική απεικόνιση πλαισίου στο Animator.

Σύμφωνα με το Report, έχουν δημιουργηθεί 94 τετράπλευρα στοιχεία.

Πίνακας 3.4: Πλήθος τετράπλευρων στοιχείων σύμφωνα με το Report.

Groups

Grp	number	Type	min-no	max-no	Title
0	23	QUAD	1	23	
1	27	QUAD	100001	100027	
2	27	QUAD	200001	200027	
3	17	QUAD	300001	300017	
Grp number	primary group number number of elements within group	Type	min-no,max-no		element type minimum/maximum element number

Τα φορτία για το πλαίσιο είναι οι ωθήσεις ηρεμίας, οι ενεργητικές ωθήσεις (στατικές και σεισμικές) και οι παθητικές ωθήσεις. Όπως και στην δεξαμενή, η πρώτη φόρτιση περιλαμβάνει τις ωθήσεις ηρεμίας και τις ενεργητικές ωθήσεις. Η δεύτερη, τις ενεργητικές ωθήσεις και τον μέσο όρο των ωθήσεων ηρεμίας και των παθητικών ωθήσεων και τέλος, στην τρίτη φόρτιση υπάρχουν οι ενεργητικές και παθητικές ωθήσεις.

+PROG SOFILOAD

HEAD LOADS

LC 2 TYPE G TITL "Pa and P0"

POIN TYPE PXX 146 X -#rz Y 0 Z -3.2

LINE TYPE PXX P1 0 X1 #rz Y1 0 Z1 -#hz P2 -152 X2 #rz Y2 0 Z2 0

LC 3 TYPE G TITL "Pa and (P0+Pp)/2"

POIN TYPE PXX 146 X -#rz Y 0 Z -3.2

LINE TYPE PXX P1 0 X1 #rz Y1 0 Z1 -#hz P2 -76 X2 #rz Y2 0 Z2 0

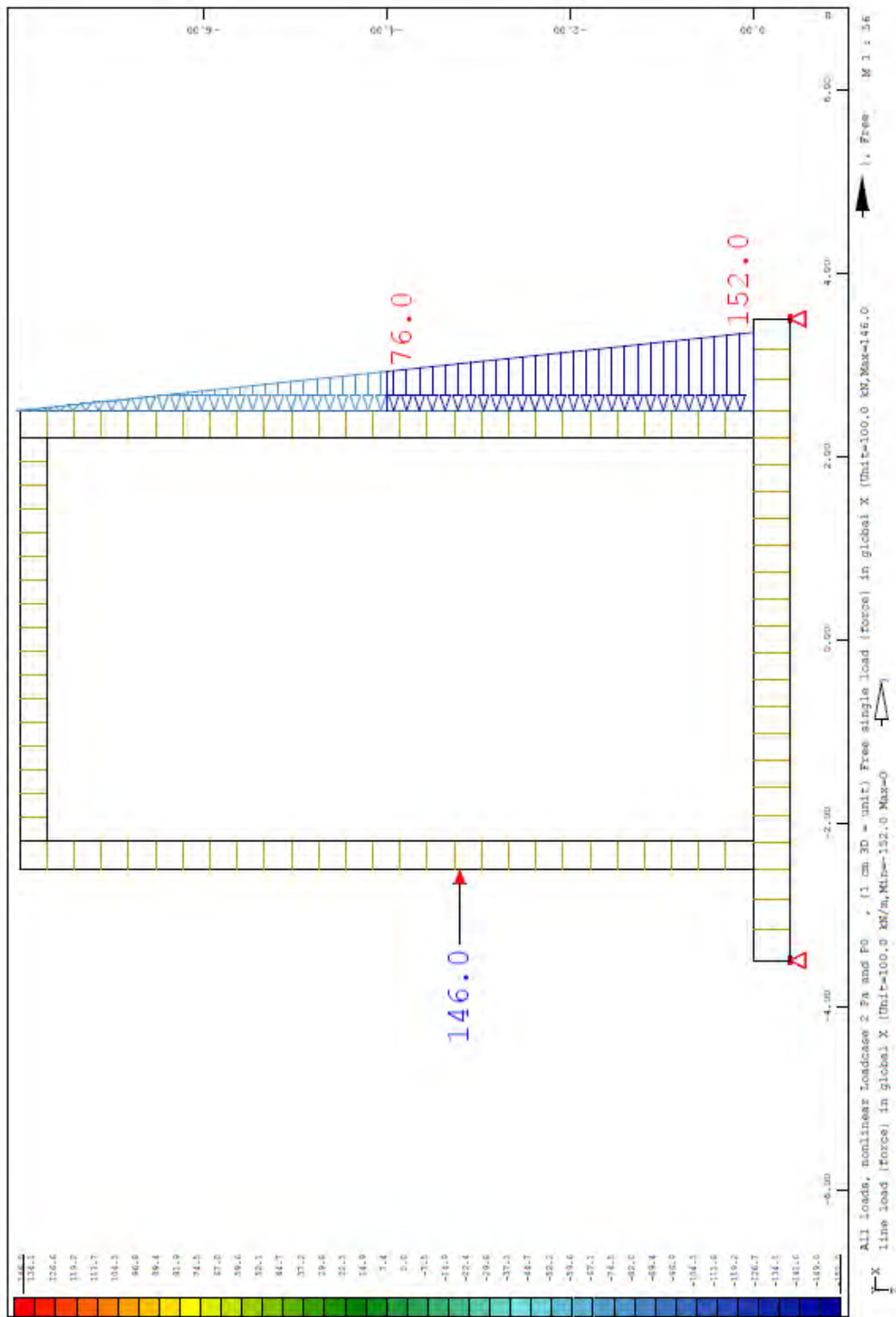
POIN TYPE PXX -74 X #rz Y 0 Z -3.2

LC 4 TYPE G TITL "Pa and Pp"

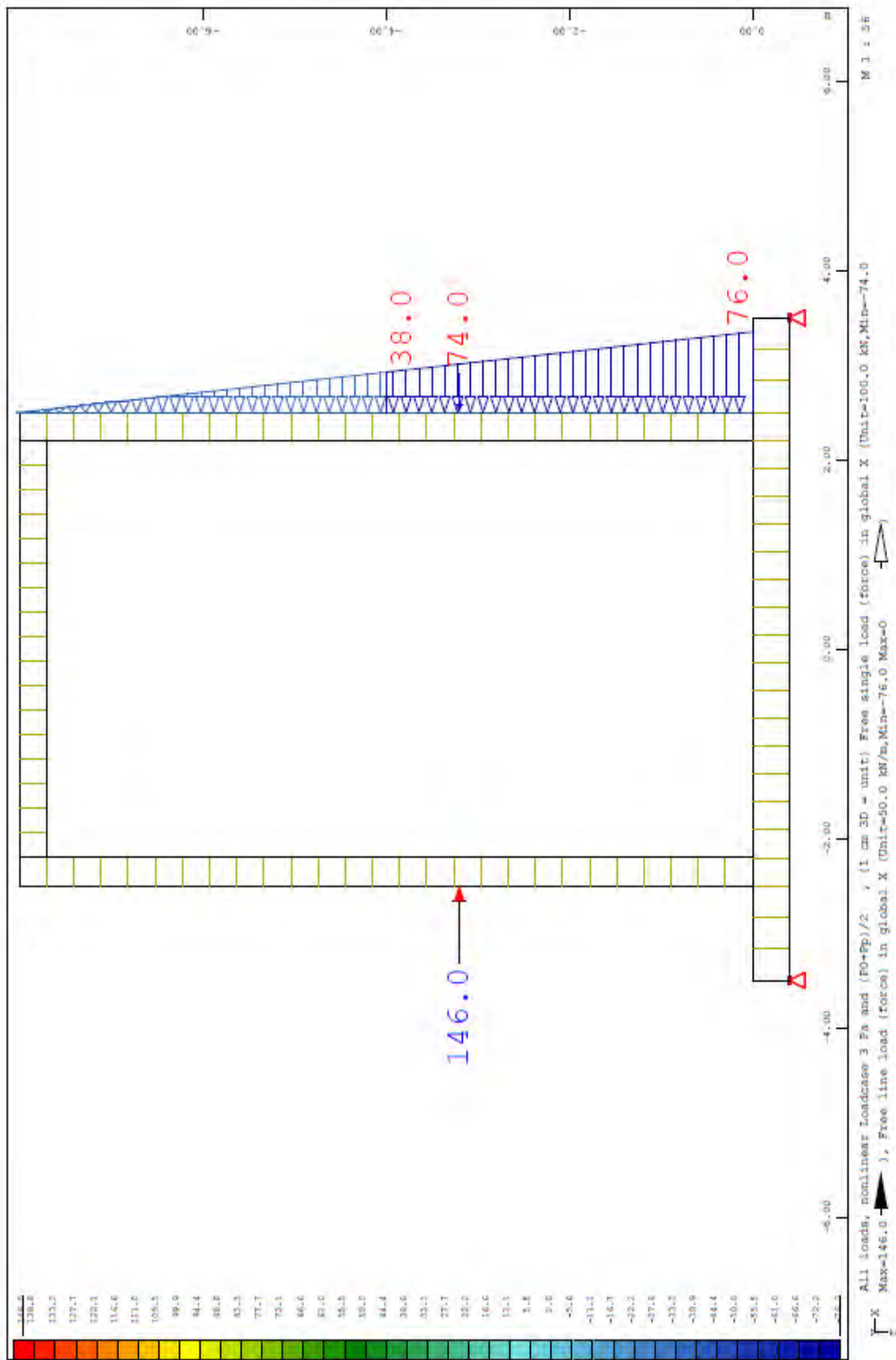
POIN TYPE PXX 146 X -#rz Y 0 Z -3.2

POIN TYPE PXX -148 X #rz Y 0 Z -3.2

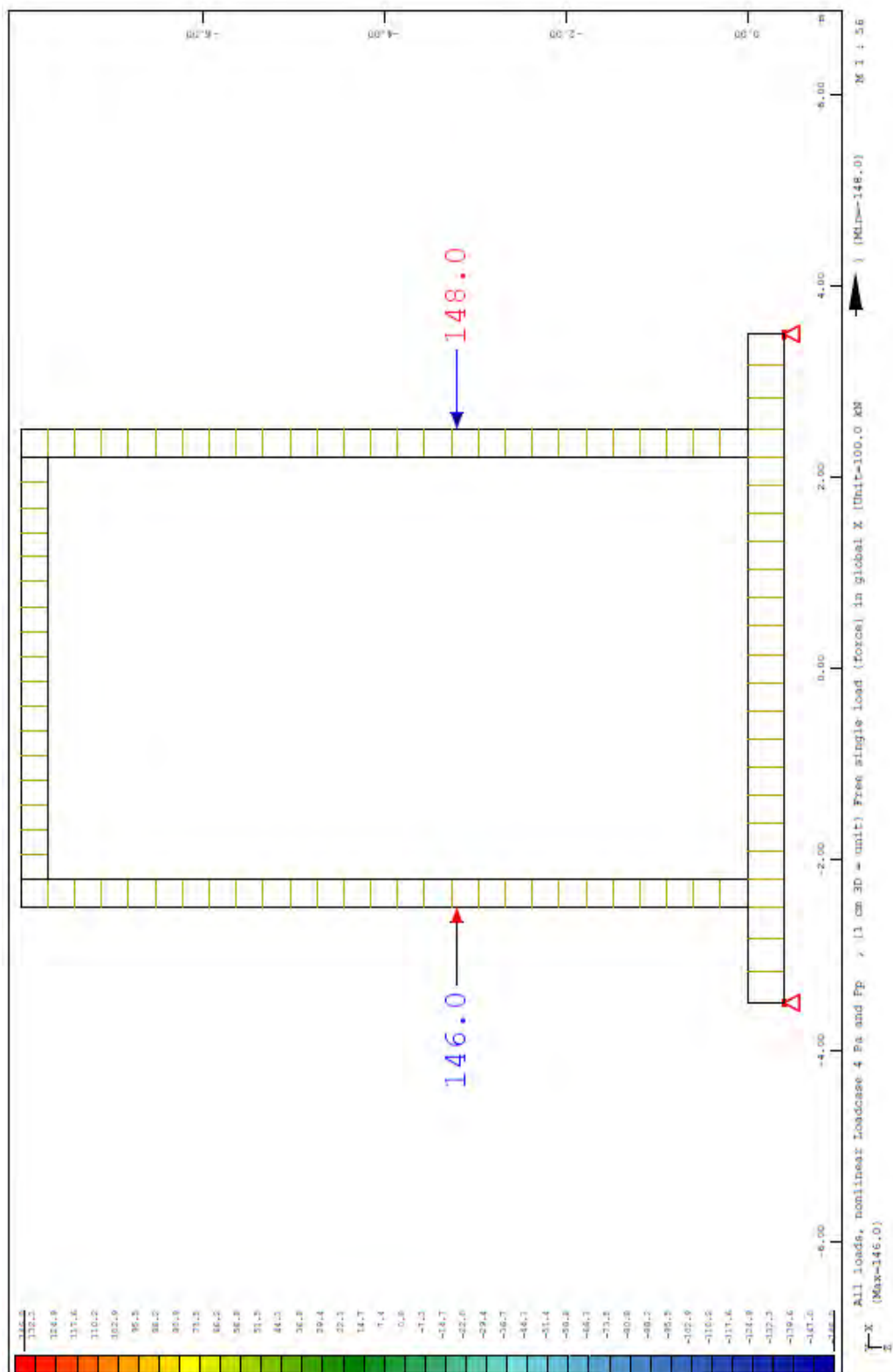
END



Σχήμα 25: Γραφική απεικόνιση πρώτης φόρτισης (LC 2) πλαισίου.



Σχήμα 26: Γραφική απεικόνιση δεύτερης φόρτισης (LC 3) πλαισίου.



Σχήμα 27: Γραφική απεικόνιση τρίτης φόρτισης (LC 4) πλαισίου.

ΑΠΛΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

4.1 Επίλυση κυκλικής δεξαμενής.

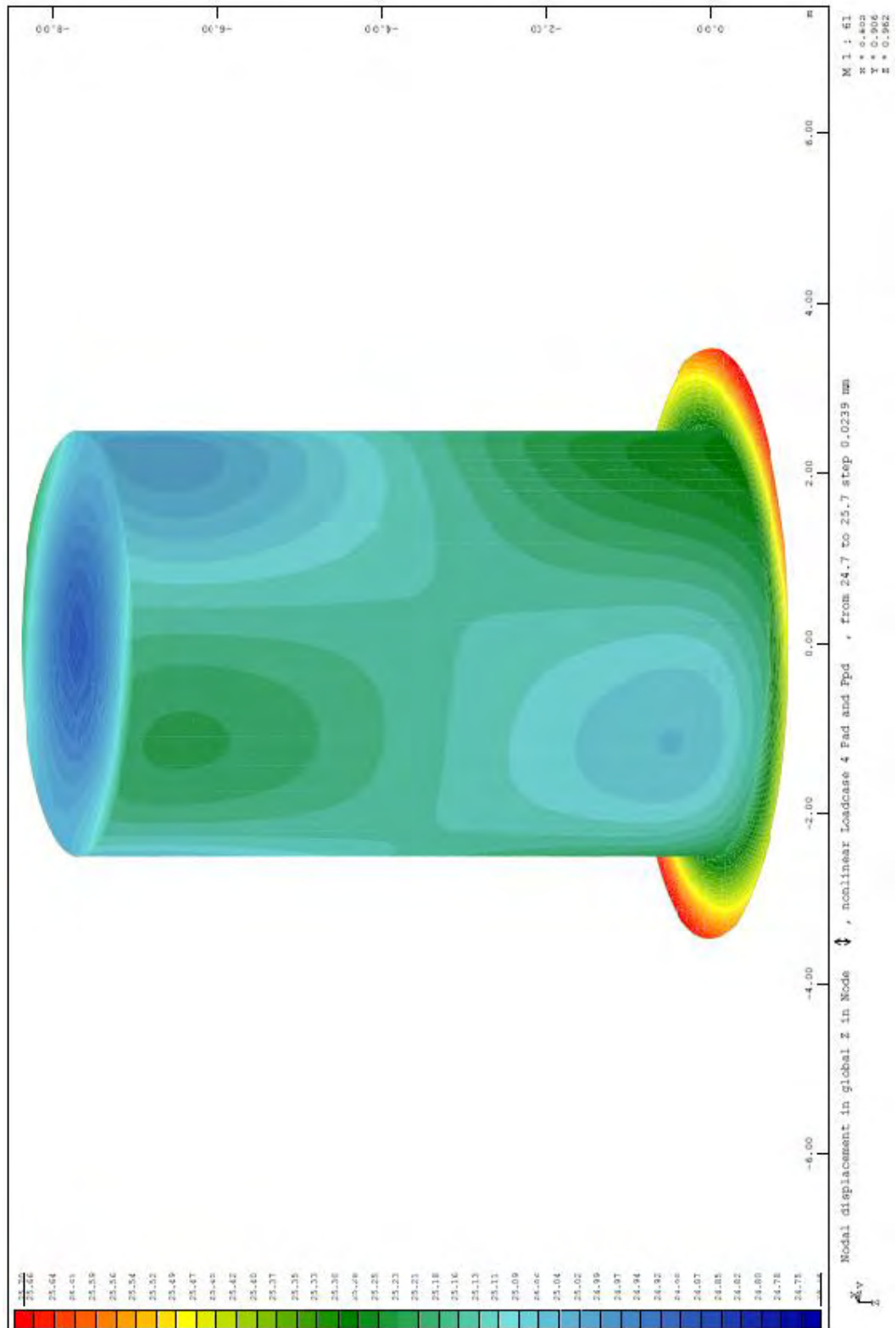
Η γενική στατική επίλυση γίνεται με το PROG ASE και θα είναι μη γραμμική. Τα αποτελέσματα που δίνει το πρόγραμμα αυτό είναι οι μετατοπίσεις, οι στροφές, οι δυνάμεις που αναπτύσσονται, οι ροπές, οι τάσεις που αναπτύσσονται στα τετράπλευρα στοιχεία κ.α..

```
+PROG ASE
HEAD LOAD CASE 2
SYST PROB NONL ITER 200 TOL 0.001
LC 2
GRP -
END
```

```
+PROG ASE
HEAD LOAD CASE 3
SYST PROB NONL ITER 200 TOL 0.001
LC 3
GRP -
END
```

```
+PROG ASE
HEAD LOAD CASE 4
SYST PROB NONL ITER 200 TOL 0.001
LC 4
GRP -
END
```

Να σημειωθεί ότι έχει γίνει μια πρώτη επίλυση και βρέθηκε ότι η μετατόπιση στον z άξονα είναι 0,2 m. Γι αυτό, χρησιμοποιούνται ελατήρια στη βάση της δεξαμενής, για να μειωθεί η μετατόπιση.



Σχήμα 28: Μετατόπιση στον άξονα z χωρίς ελατήρια στη βάση.

4.1.1 Διαστασιολόγηση κυκλικής δεξαμενής.

Η διαστασιολόγηση γίνεται με το PROG BEMESS και τα αποτελέσματα δίνουν το εμβαδόν του οπλισμού που απαιτείται σύμφωνα με τον κανονισμό που γίνεται η επίλυση. Επίσης, η διαστασιολόγηση γίνεται στην κατάσταση αστοχίας (ULS Design).

+PROG BEMESS

ECHO FULL FULL

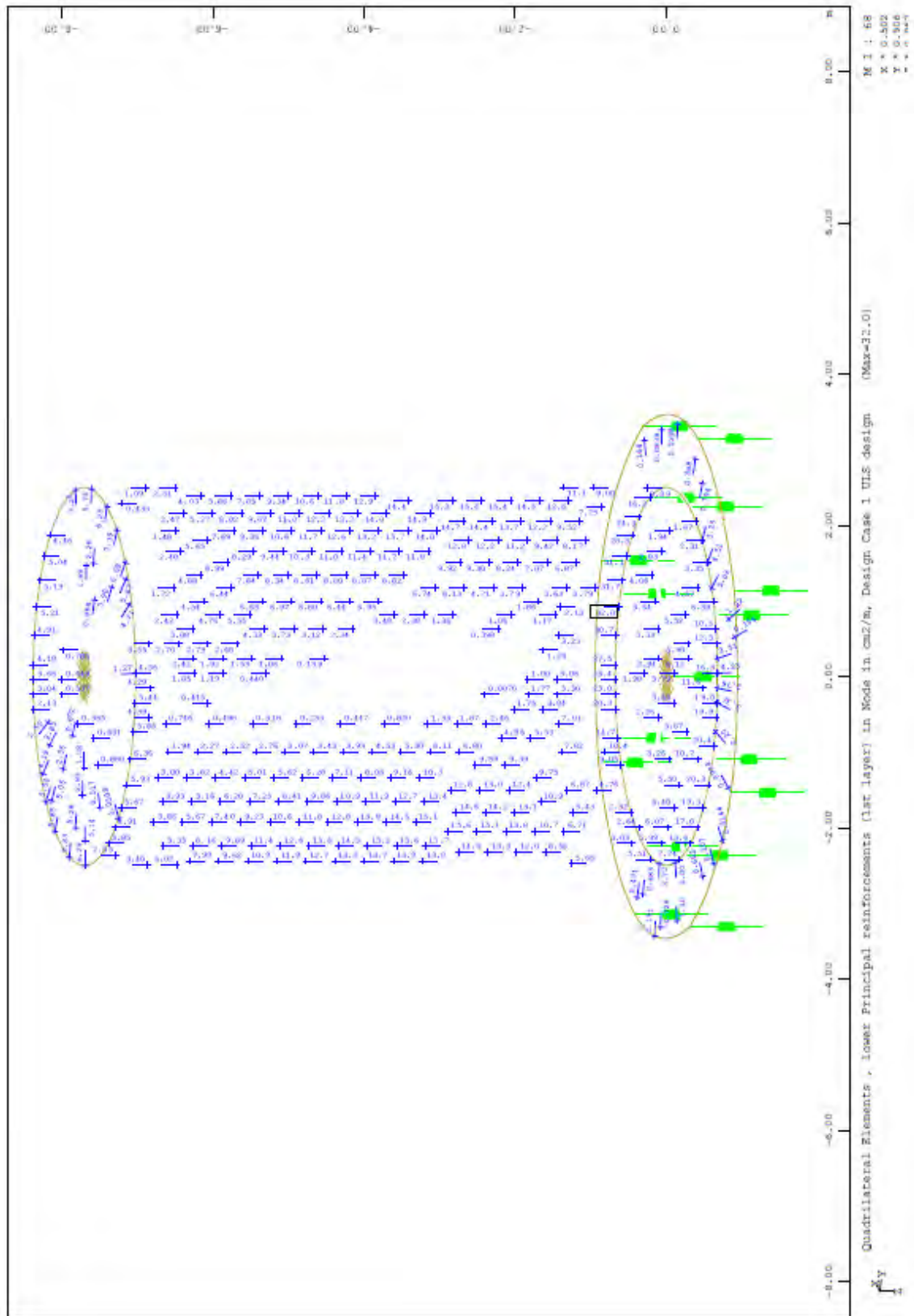
CTRL TYPE ULTI RMOD SAVE TENS 0 PFAI 2

LC 2,3,4

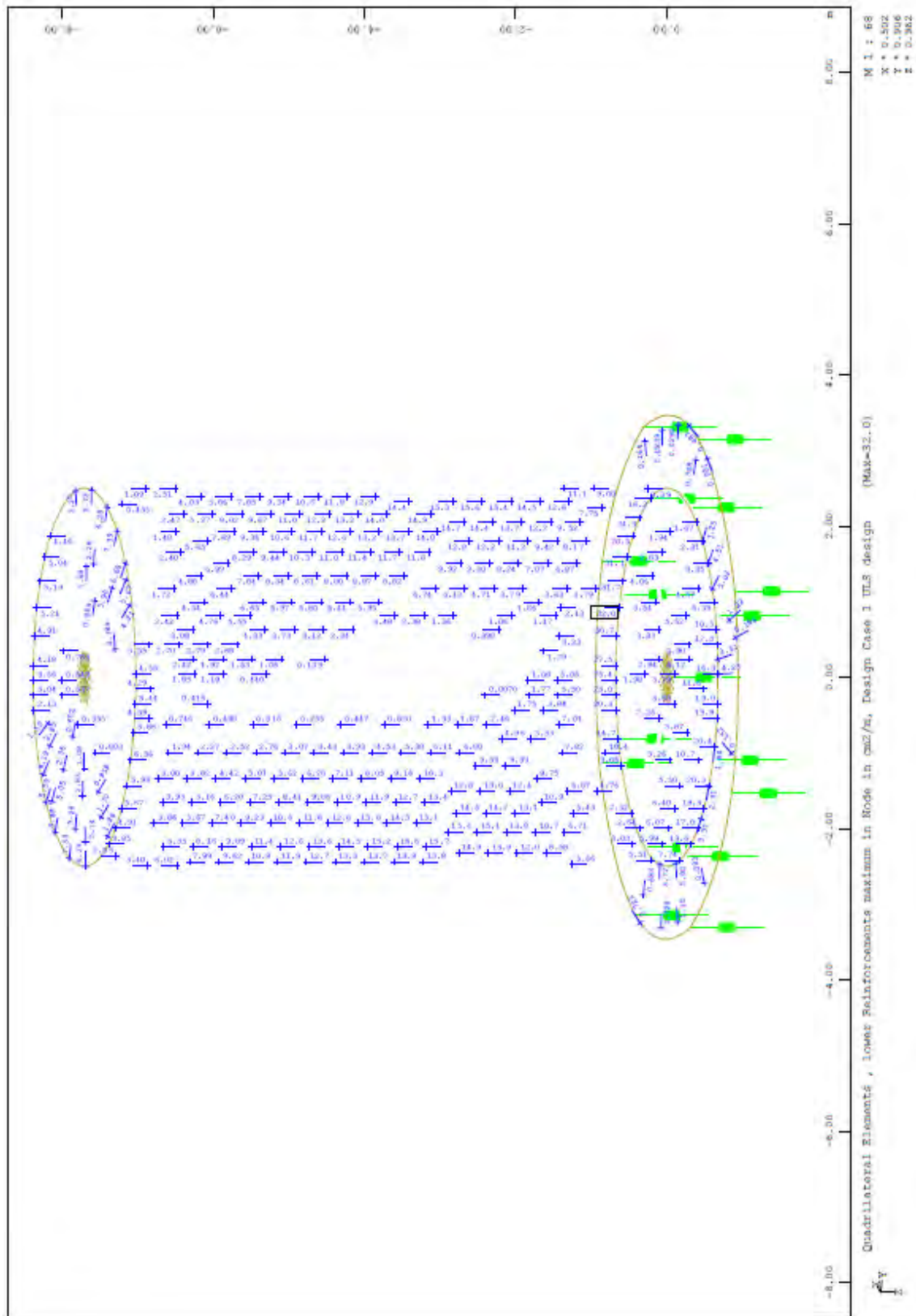
DIRE X 0.0 Y 0.0 Z 0.0

GRP -

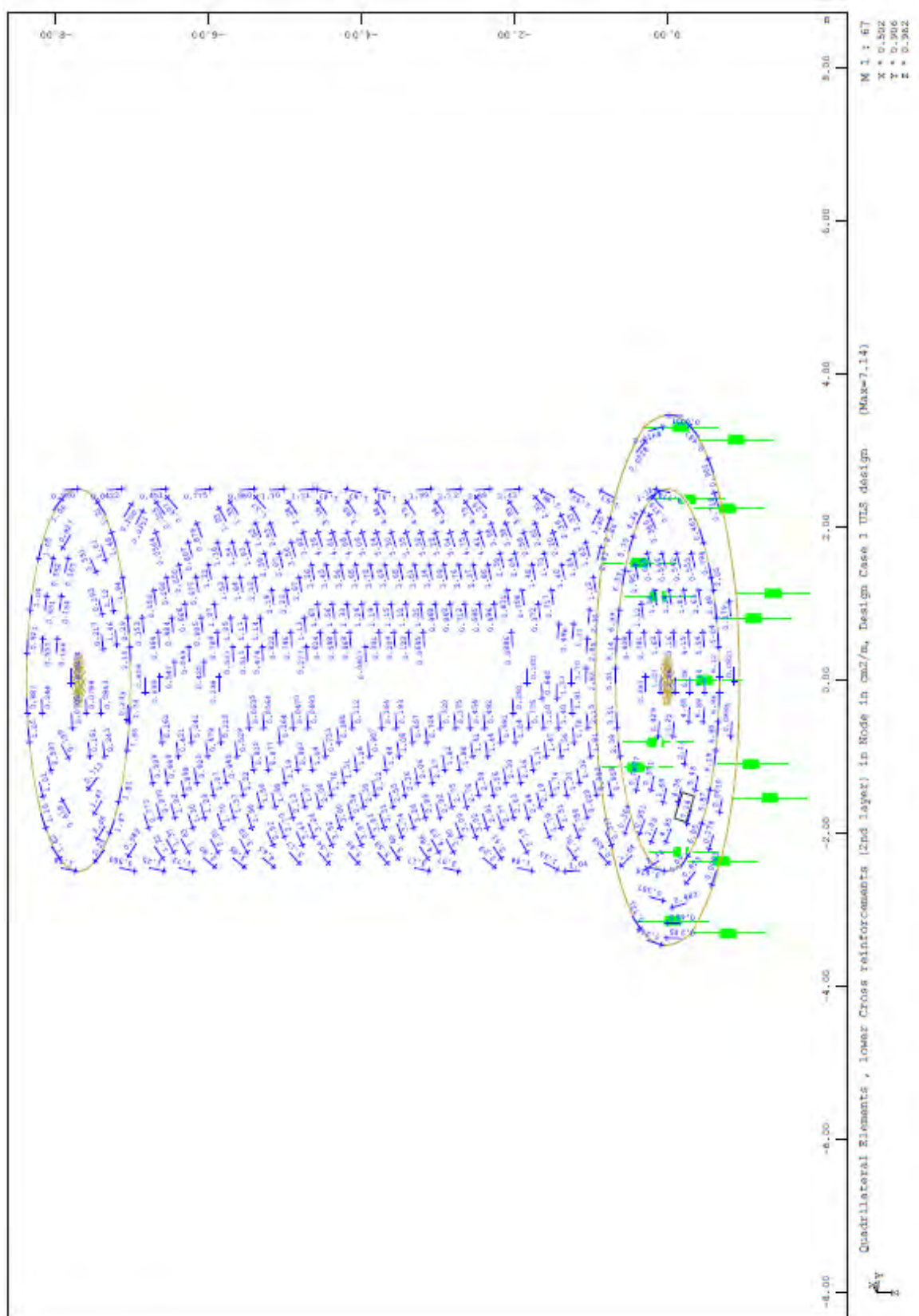
END



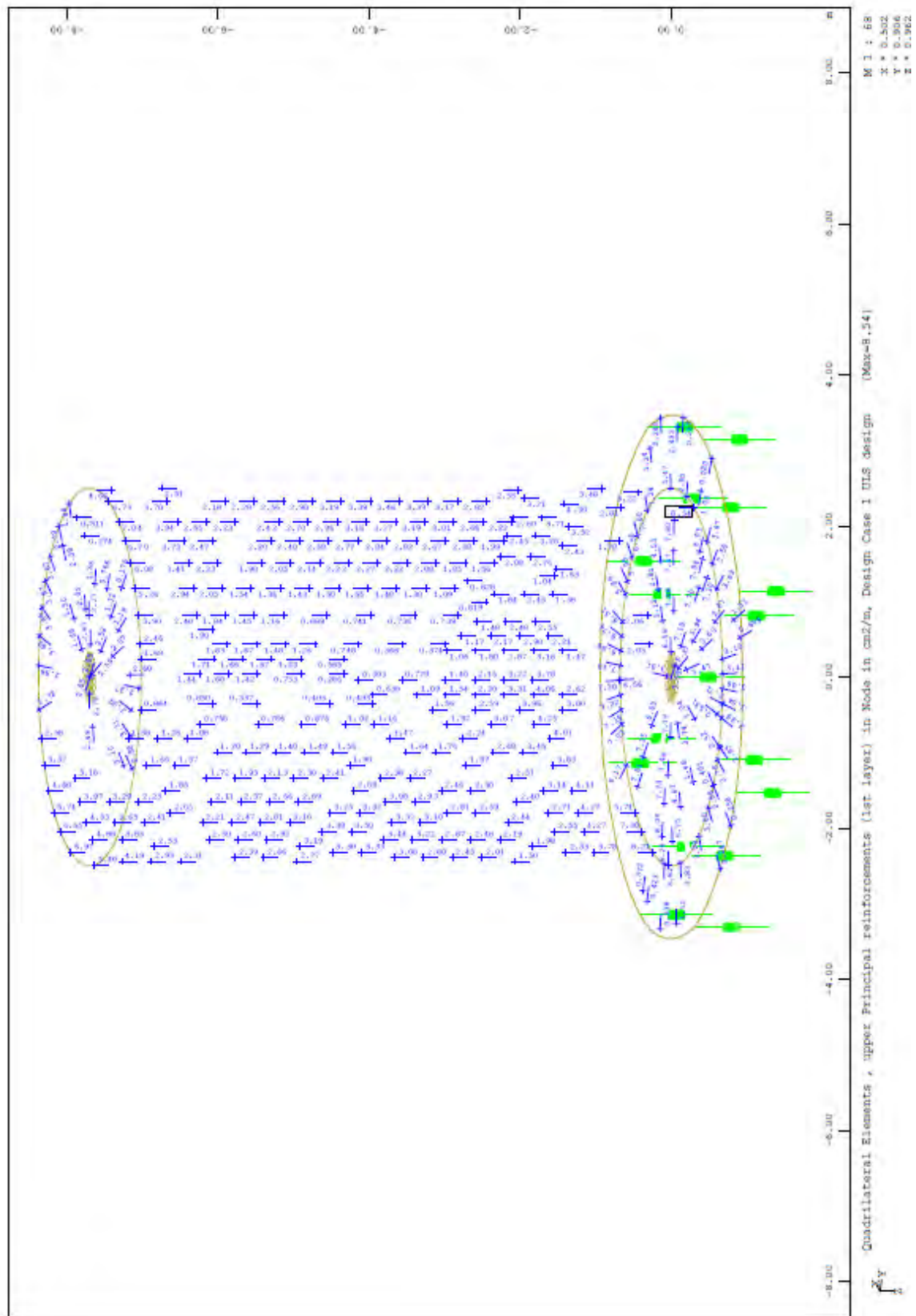
Σχήμα 29: Ο ελάχιστος απαιτούμενος κύριος σπλισμός της δεξαμενής.



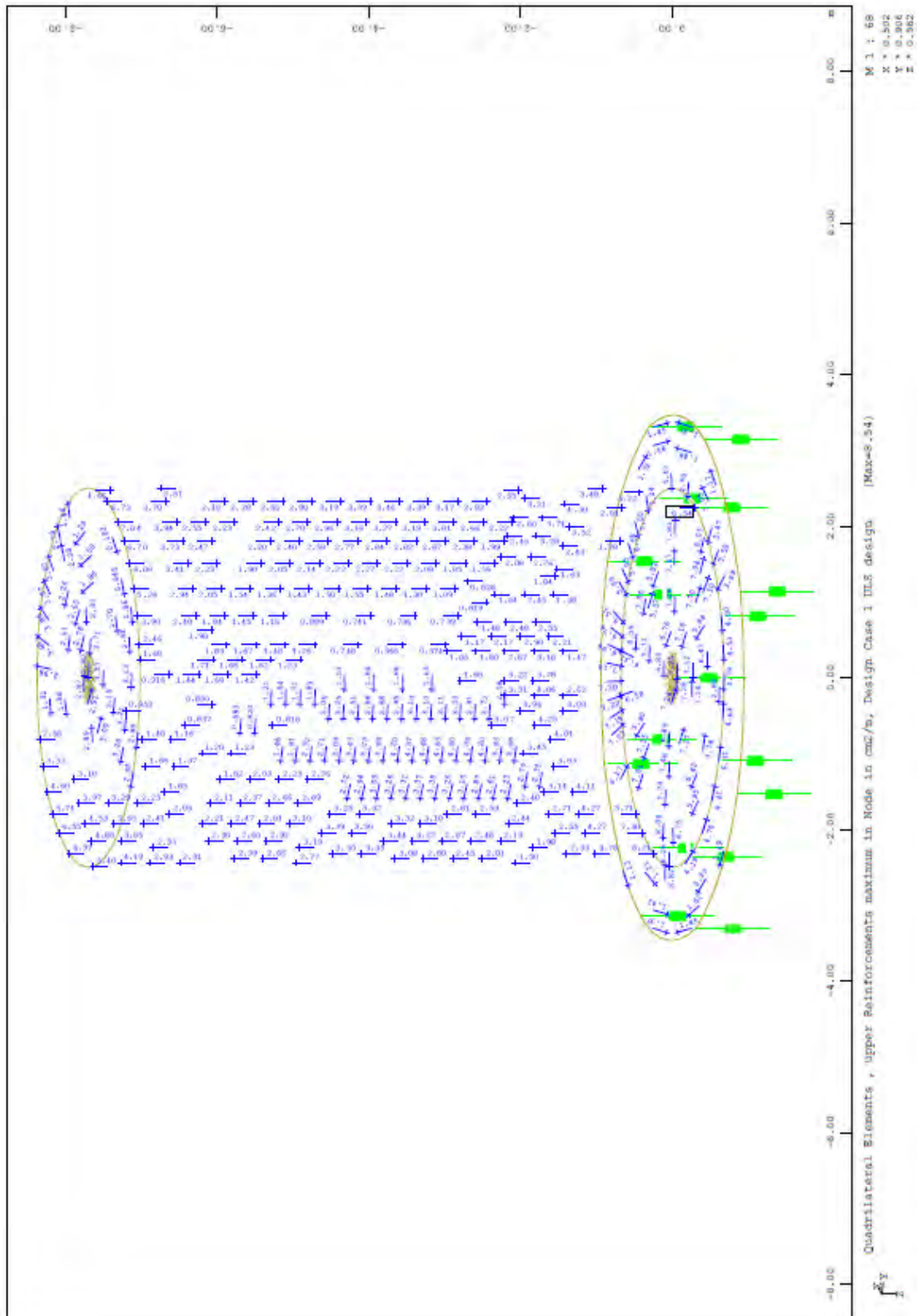
Σχήμα 30: Ο ελάχιστος απαιτούμενος σπλισμός της δεξαμενής (μέγιστος στους κόμβους).



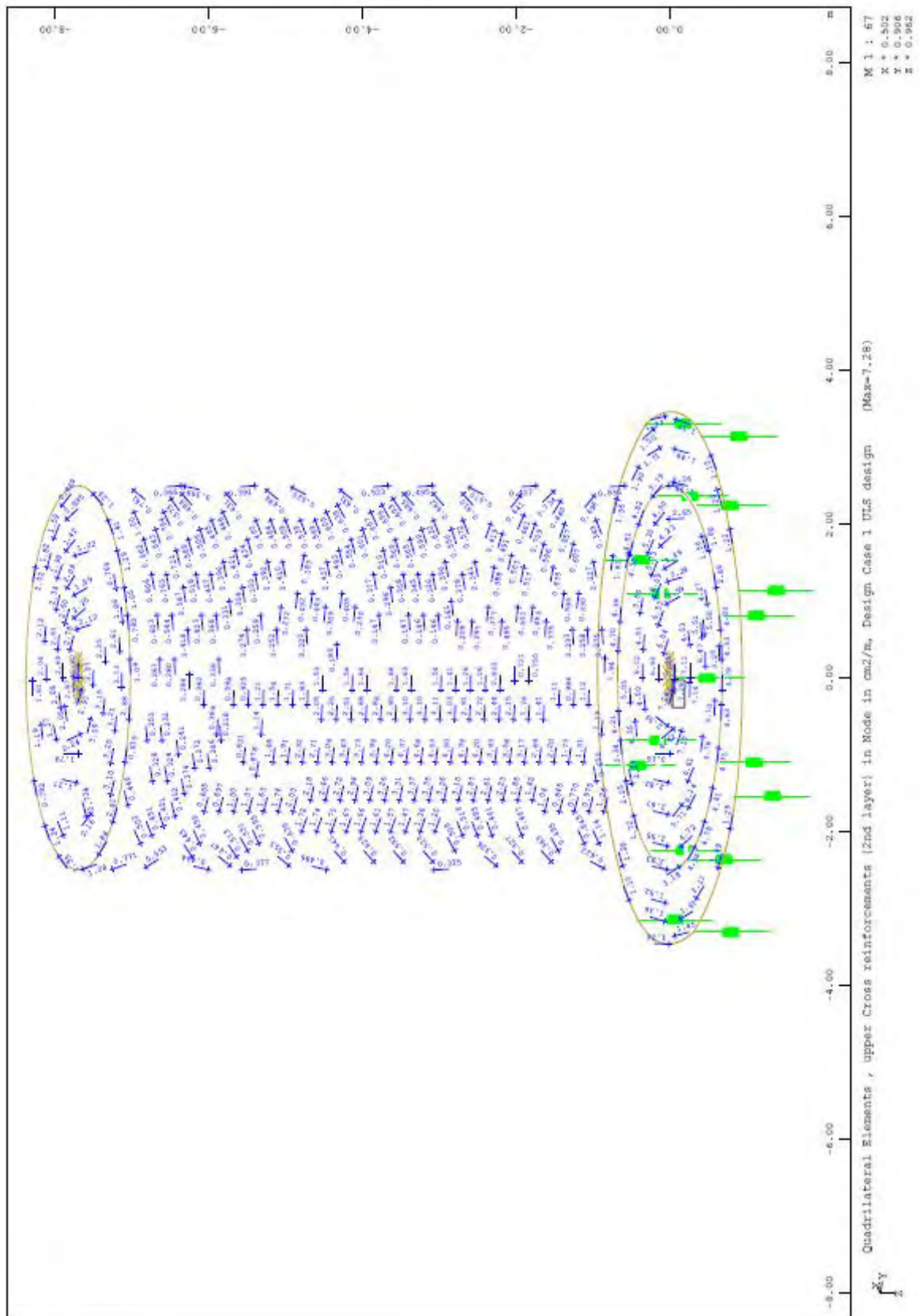
Σχήμα 31: Ο ελάχιστος απαιτούμενος εγκάρσιος σπλισμός της δεξαμενής .



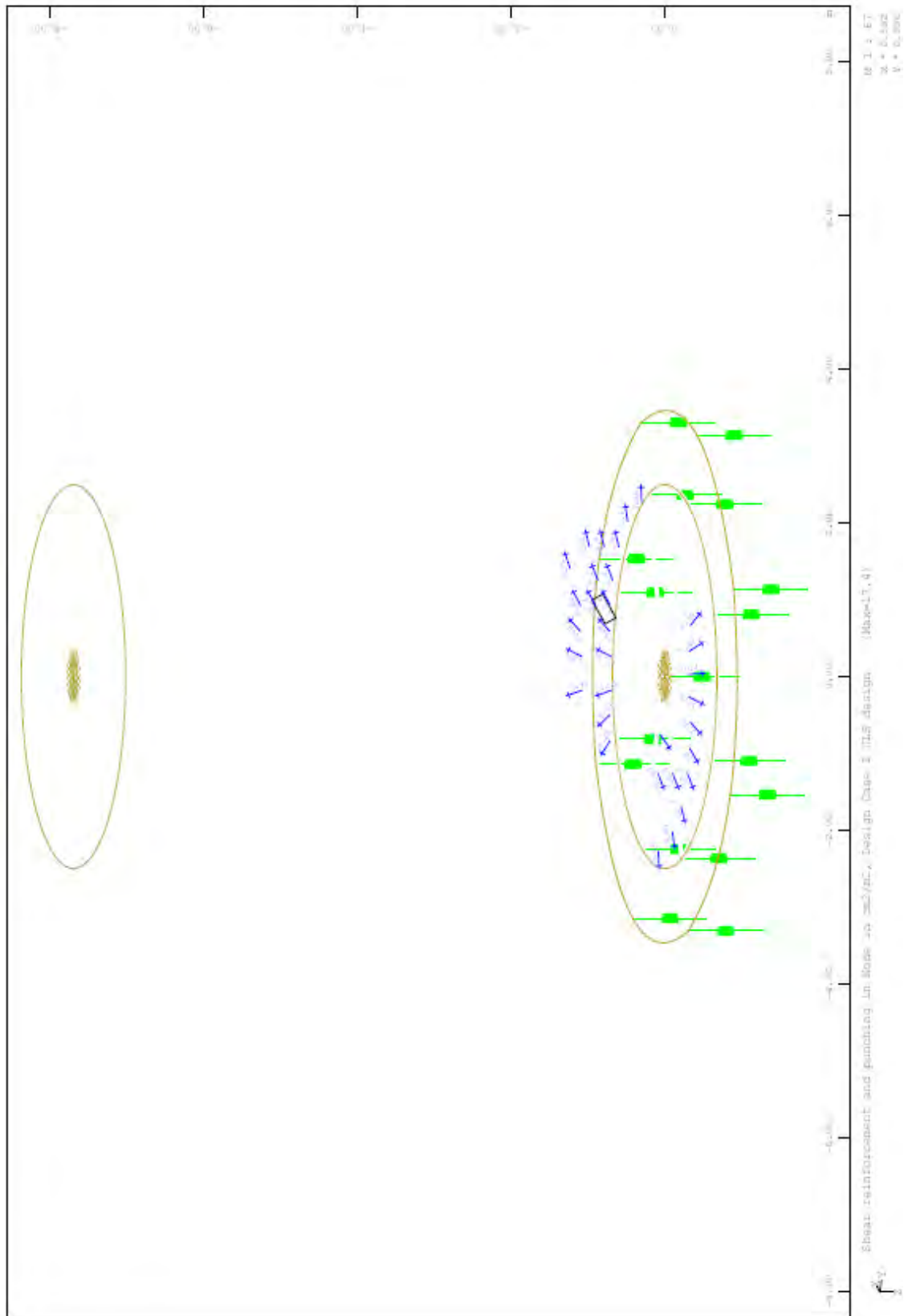
Σχήμα 32: Ο μέγιστος απαιτούμενος κύριος σπλισμός της δεξαμενής.



Σχήμα 33: Ο μέγιστος απαιτούμενος κύριος οπλισμός της δεξαμενής (μέγιστος στους κόμβους).



Σχήμα 34: Ο μέγιστος απαιτούμενος εγκάρσιος οπλισμός της δεξαμενής.



Σχήμα 35: Ο σπλισμός διάτμησης της δεξαμενής .

Ο μέγιστος κύριος οπλισμός είναι $32 \text{ cm}^2/\text{m}$ και ο ελάχιστος $8,54 \text{ cm}^2/\text{m}$. Για λόγους ασφάλειας επιλέγεται κύριος οπλισμός $32 \text{ cm}^2/\text{m}$ που αντιστοιχεί σε ράβδους χάλυβα διαμέτρου 22 mm ανά 20 cm. Για τον εγκάρσιο οπλισμό επιλέγεται $7,28 \text{ cm}^2/\text{m}$ που αντιστοιχεί σε ράβδους χάλυβα διαμέτρου 12 mm ανά 10 cm. Τέλος, τοποθετείται στην βάση της δεξαμενής οπλισμός για να παραλάβει την διάτμηση, που έχει εμβαδόν $17,4 \text{ cm}^2/\text{m}$, δηλαδή, ράβδους διαμέτρου 22mm ανά 20cm.

4.2 Επίλυση κυκλικού δακτυλίου.

Ομοίως με την δεξαμενή, η στατική επίλυση θα γίνει από το PROG ASE και θα είναι μη γραμμική.

+PROG ASE

HEAD LOAD CASE 2

SYST PROB NONL ITER 200 TOL 0.001

LC 2

GRP -

END

+PROG ASE

HEAD LOAD CASE 3

SYST PROB NONL ITER 200 TOL 0.001

LC 3

GRP -

END

+PROG ASE

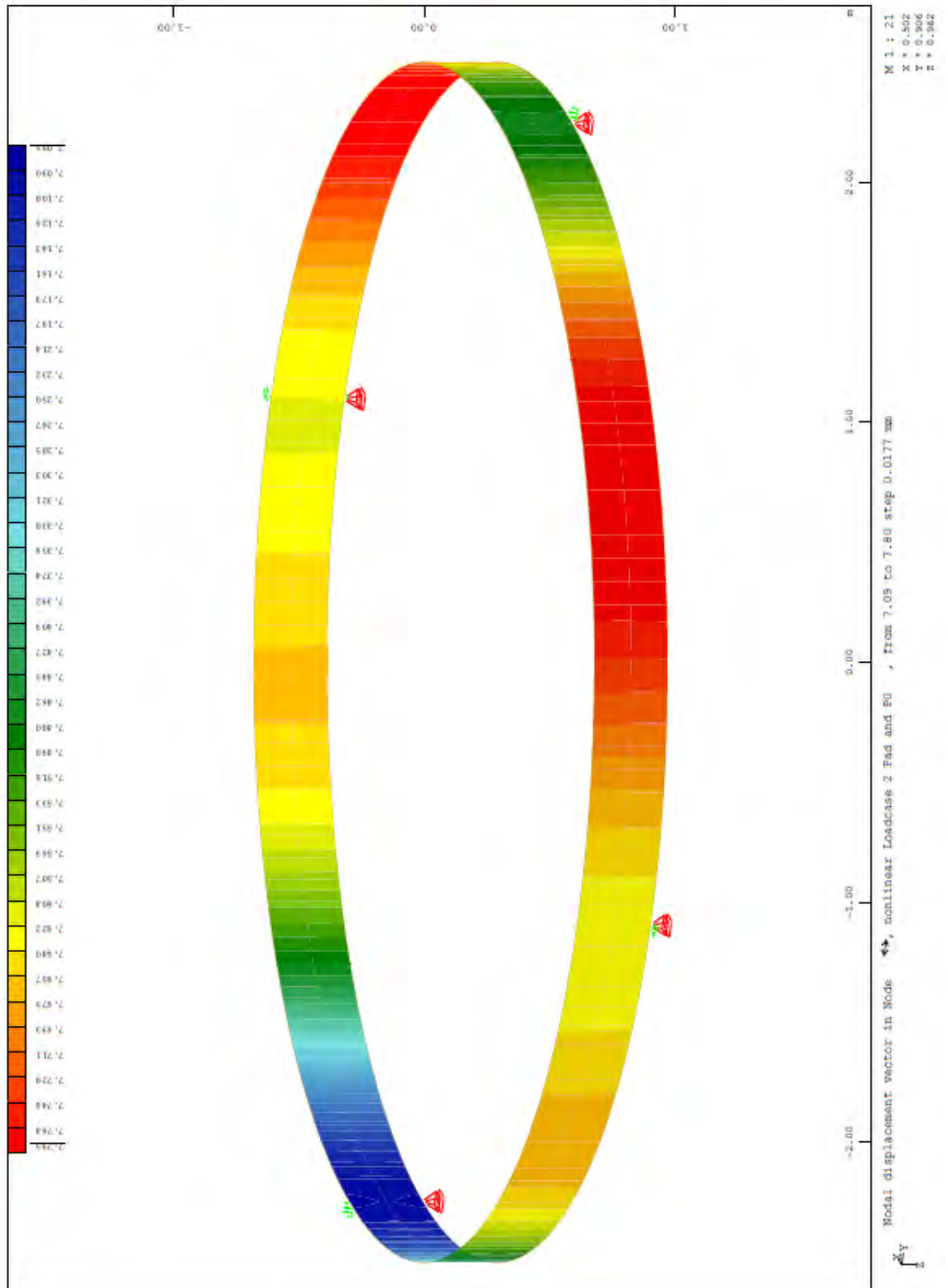
HEAD LOAD CASE 4

SYST PROB NONL ITER 200 TOL 0.001

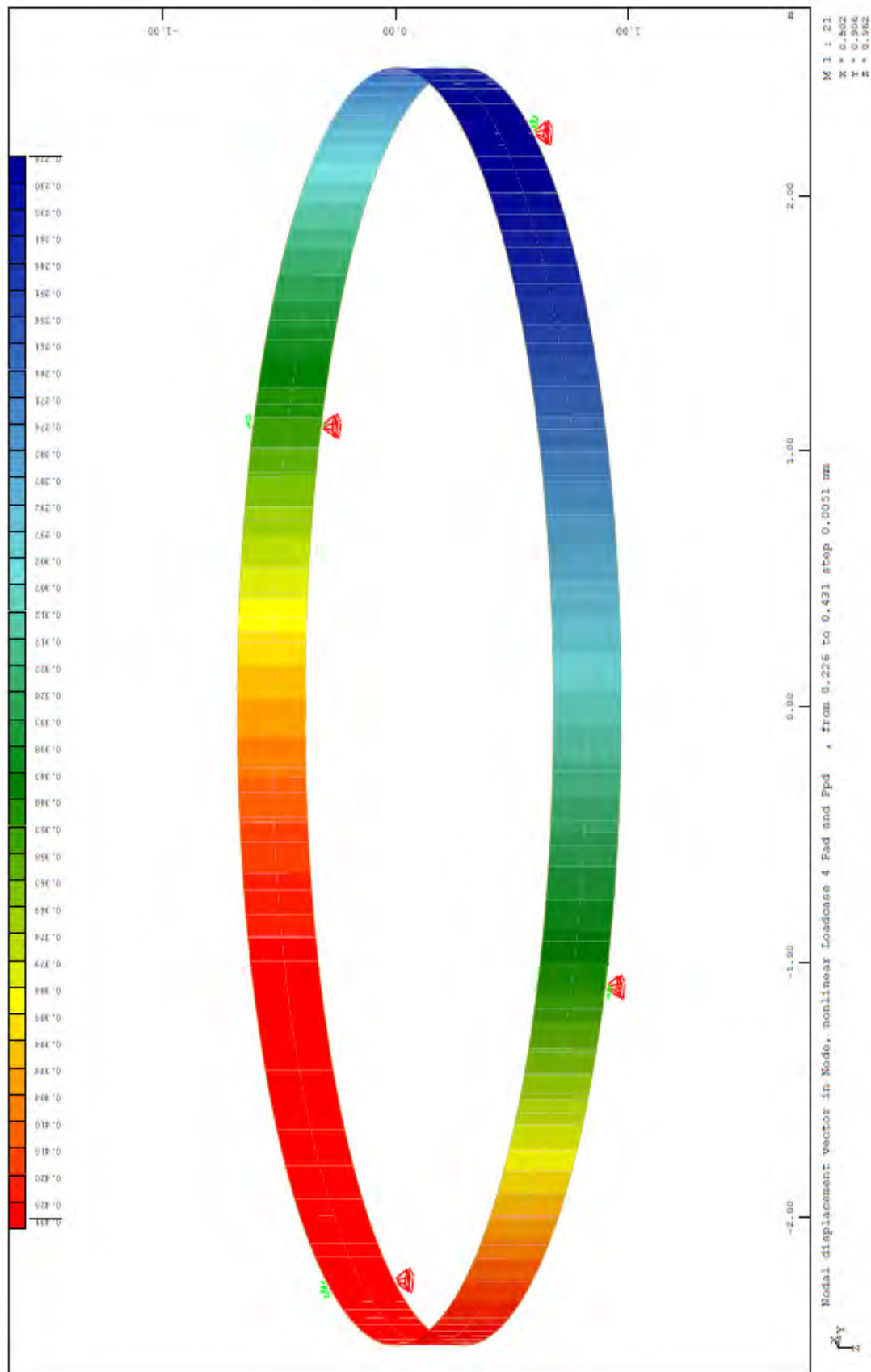
LC 4

GRP -

END



Σχήμα 36: Μετατόπιση κυκλικού δακτυλίου για την φόρτιση LC 2.



Σχήμα 37: Μετατόπιση κυκλικού δακτυλίου για την φόρτιση LC 4.

4.2.1 Διαστασιολόγηση κυκλικού δακτυλίου.

Η διαστασιολόγηση γίνεται, ομοίως με πριν, με το PROG BEMESS και τα αποτελέσματα δίνουν το εμβαδόν του οπλισμού που απαιτείται σύμφωνα με τον κανονισμό που γίνεται η επίλυση. Επίσης, η διαστασιολόγηση γίνεται στην κατάσταση αστοχίας (ULS Design).

+PROG BEMESS

ECHO FULL FULL

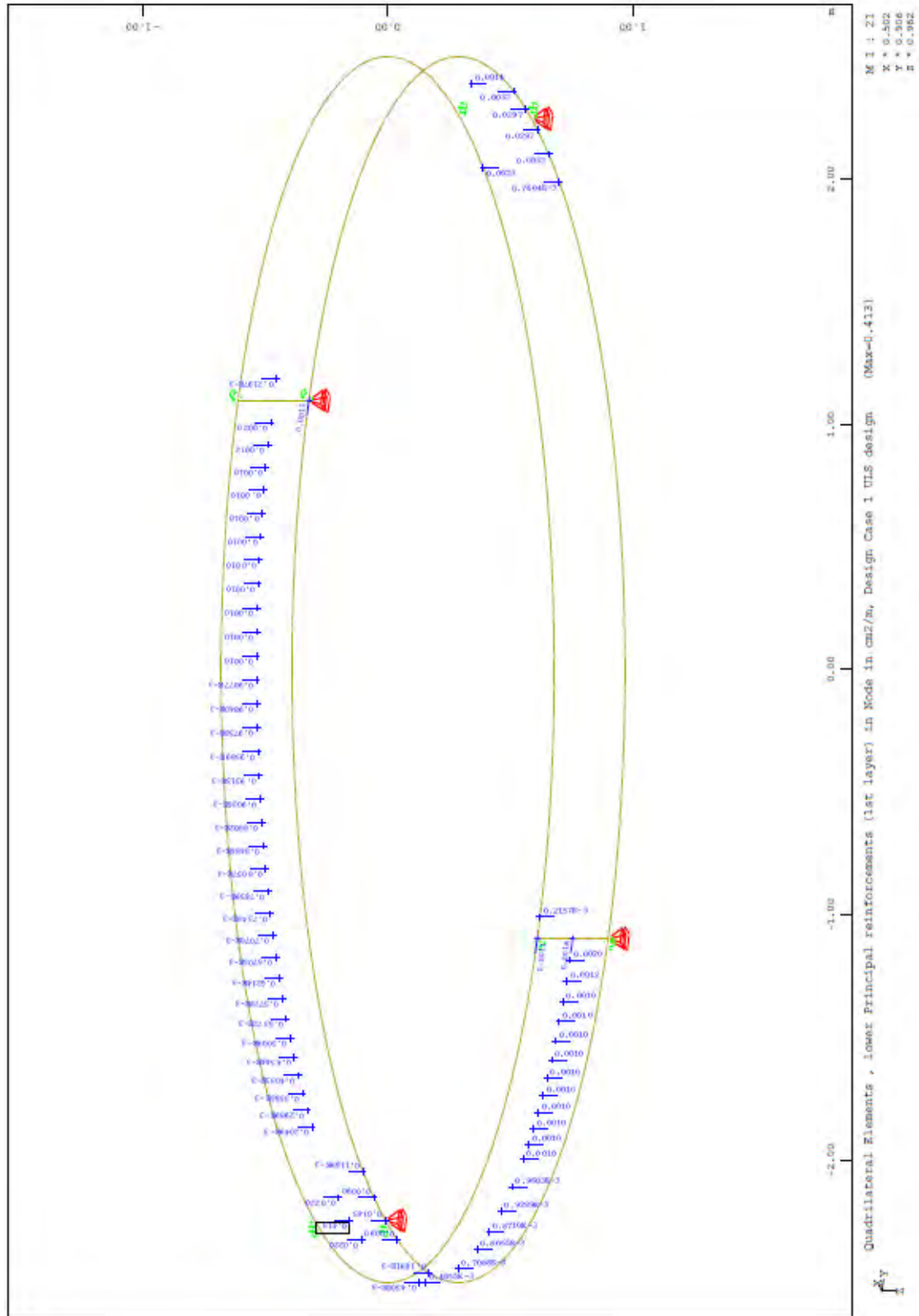
CTRL TYPE ULTI RMOD SAVE TENS 0 PFAI 2

LC 2,3,4

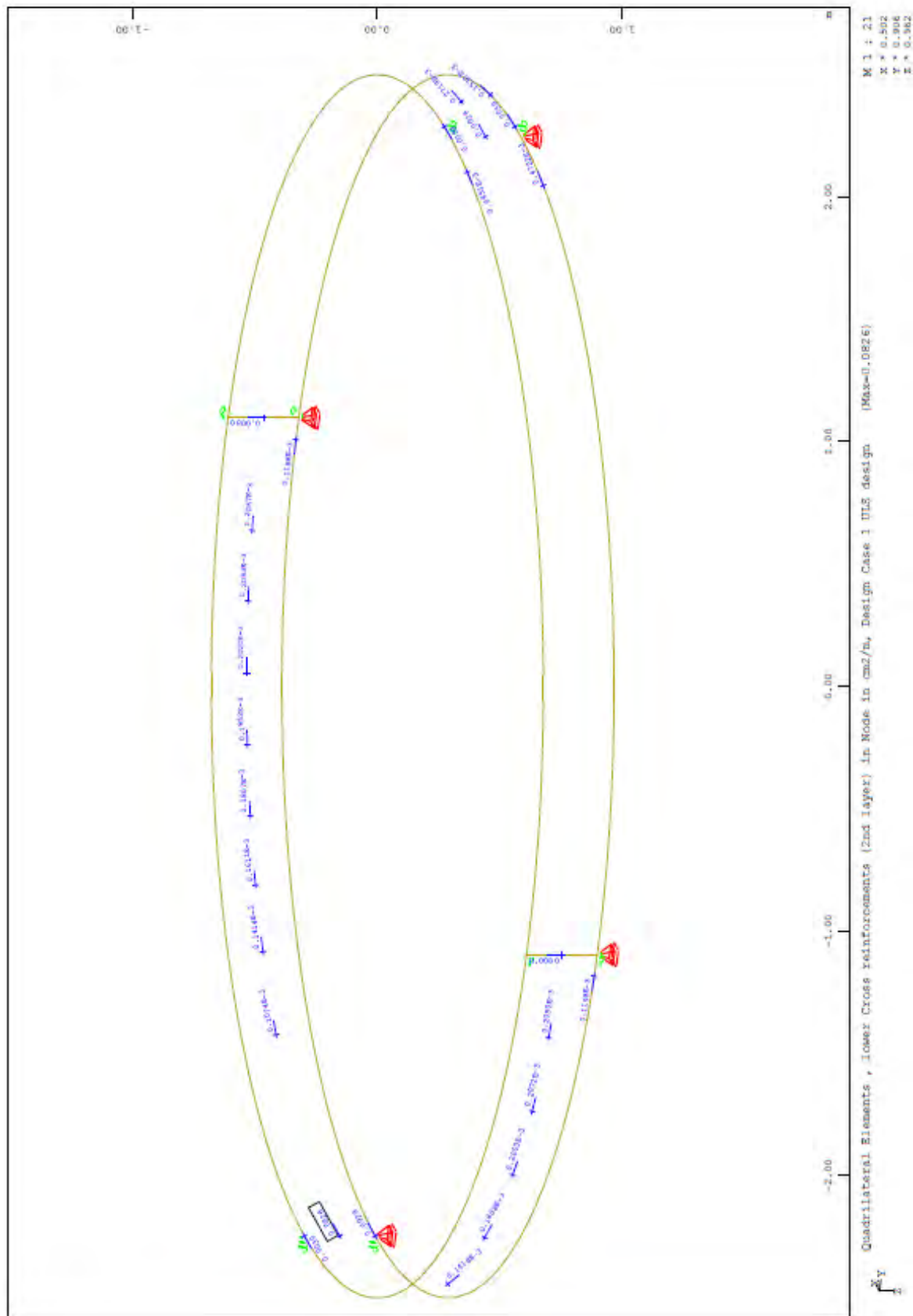
DIRE X 0.0 Y 0.0 Z 0.0

GRP -

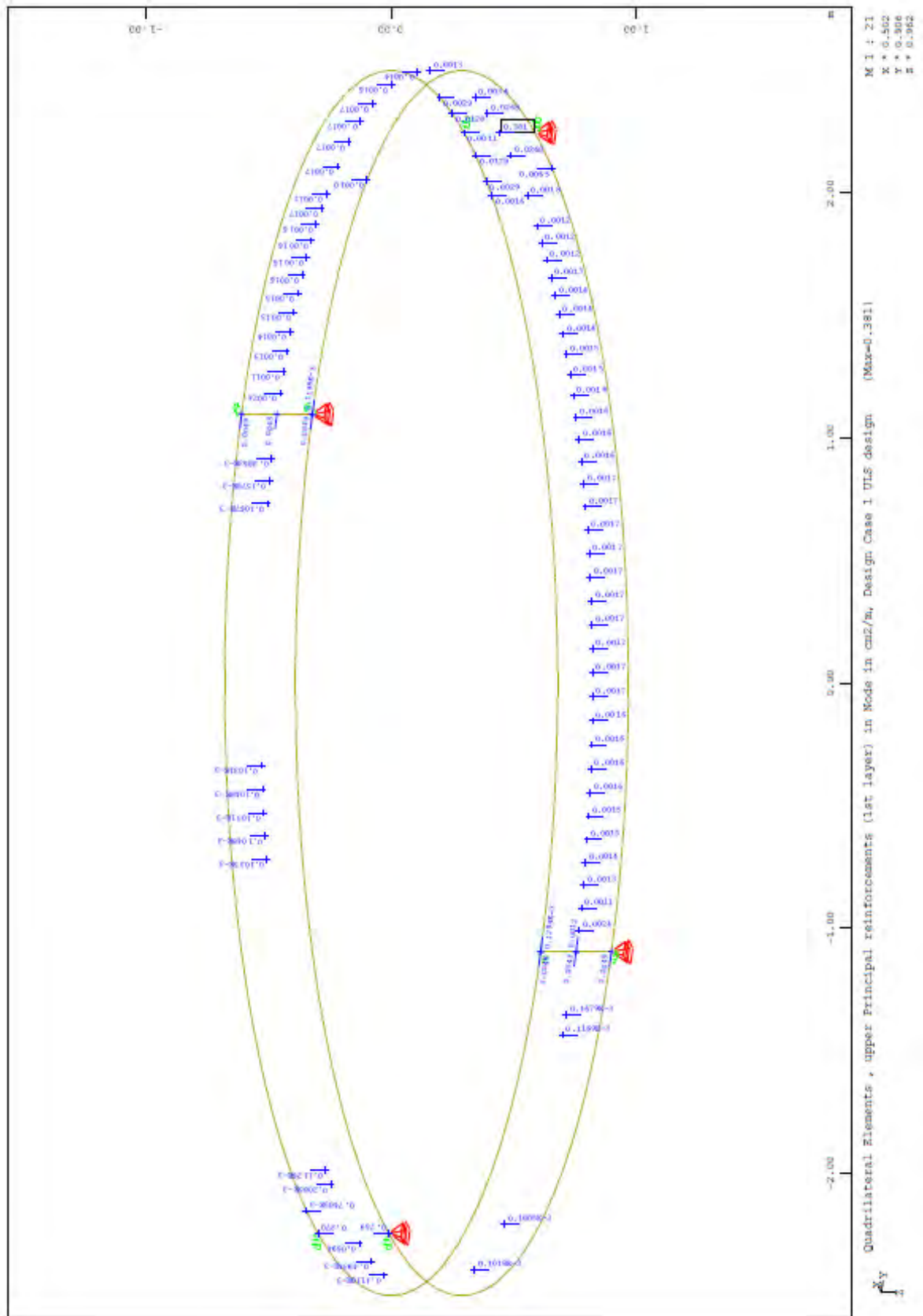
END



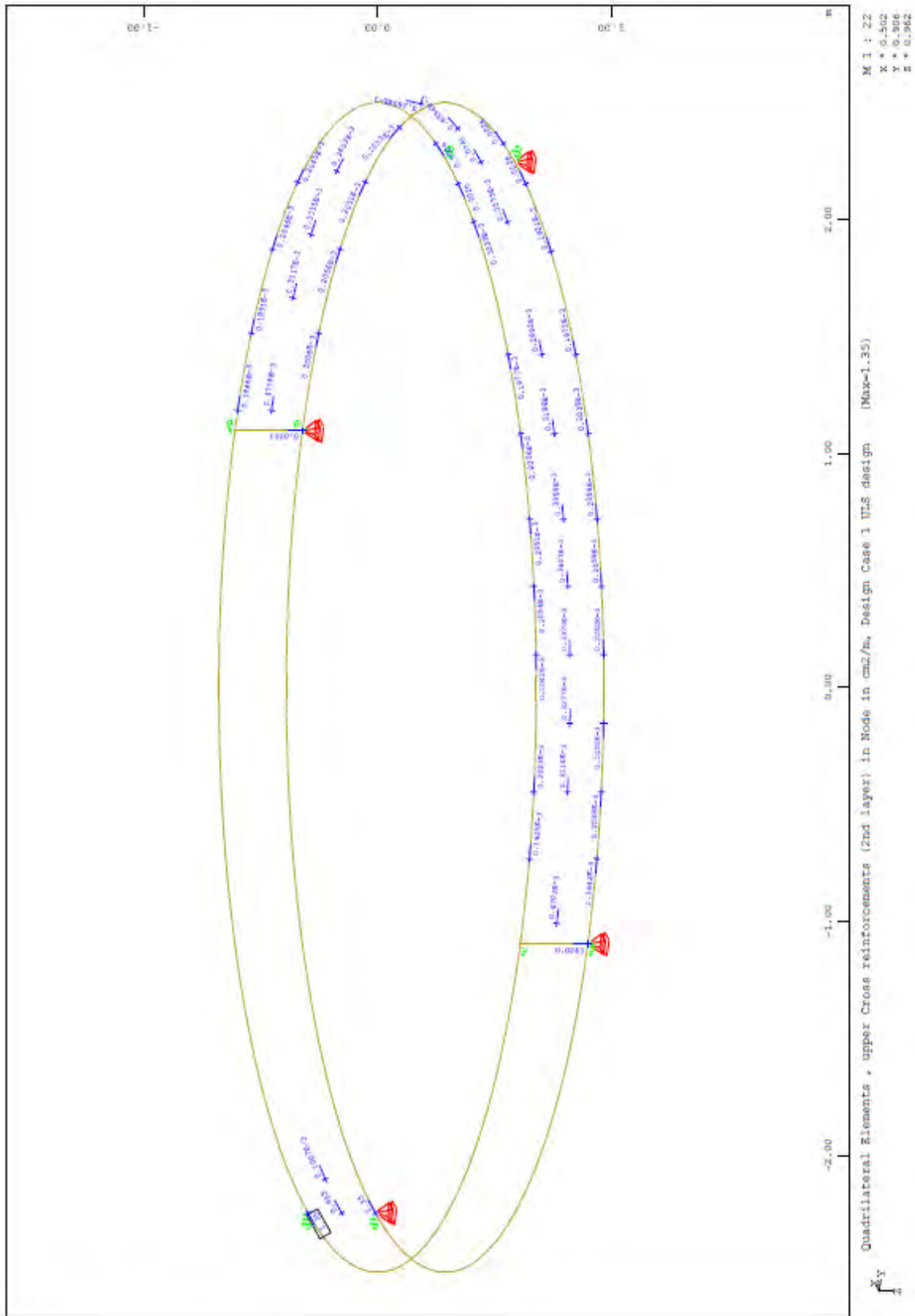
Σχήμα 38:Ο ελάχιστος απαιτούμενος κύριος σπλισμός του κυκλικού δακτυλίου .



Σχήμα 39:Ο ελάχιστος απαιτούμενος εγκάρσιος οπλισμός του κυκλικού δακτυλίου.



Σχήμα 40:Ο μέγιστος απαιτούμενος κύριος σπλισμός του κυκλικού δακτυλίου.



Σχήμα 41: Ο μέγιστος απαιτούμενος εγκάρσιος οπλισμός του κυκλικού δακτυλίου.

Ο μέγιστος κύριος οπλισμός είναι $0,431 \text{ cm}^2/\text{m}$. Ο οπλισμός είναι πολύ μικρός οπότε επιλέγεται να τοποθετηθεί $2 \text{ cm}^2/\text{m}$ που αντιστοιχεί σε ράβδους χάλυβα διαμέτρου 8 mm ανά 25 cm. Για τον εγκάρσιο οπλισμό επιλέγεται $1,35 \text{ cm}^2/\text{m}$ που θα τοποθετηθεί για κατασκευαστικούς λόγους οπλισμός διαμέτρου 8 mm ανά 25 cm. Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της κυκλικής δεξαμενής παρατηρείται υποόπλιση της κατασκευής, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι μια τέτοια προσέγγιση δεν είναι ασφαλής. Επιπλέον, αυτή η προσέγγιση δεν δίνει τον οπλισμό που απαιτείται στην βάση της δεξαμενής για την παραλαβή της διάτμησης.

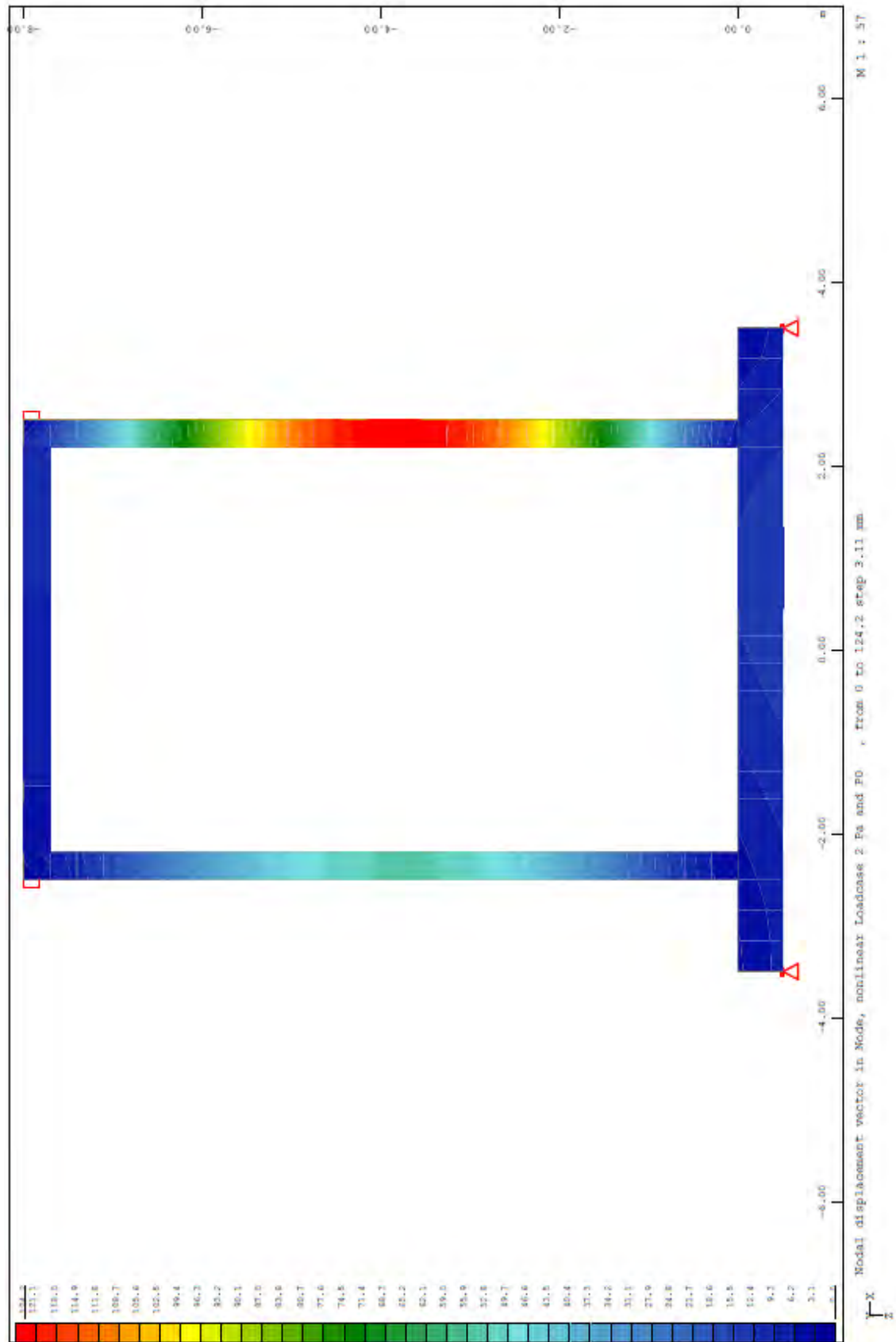
4.3 Επίλυση πλαισίου.

Ομοίως με την δεξαμενή, η στατική επίλυση θα γίνει από το PROG ASE και θα είναι μη γραμμική.

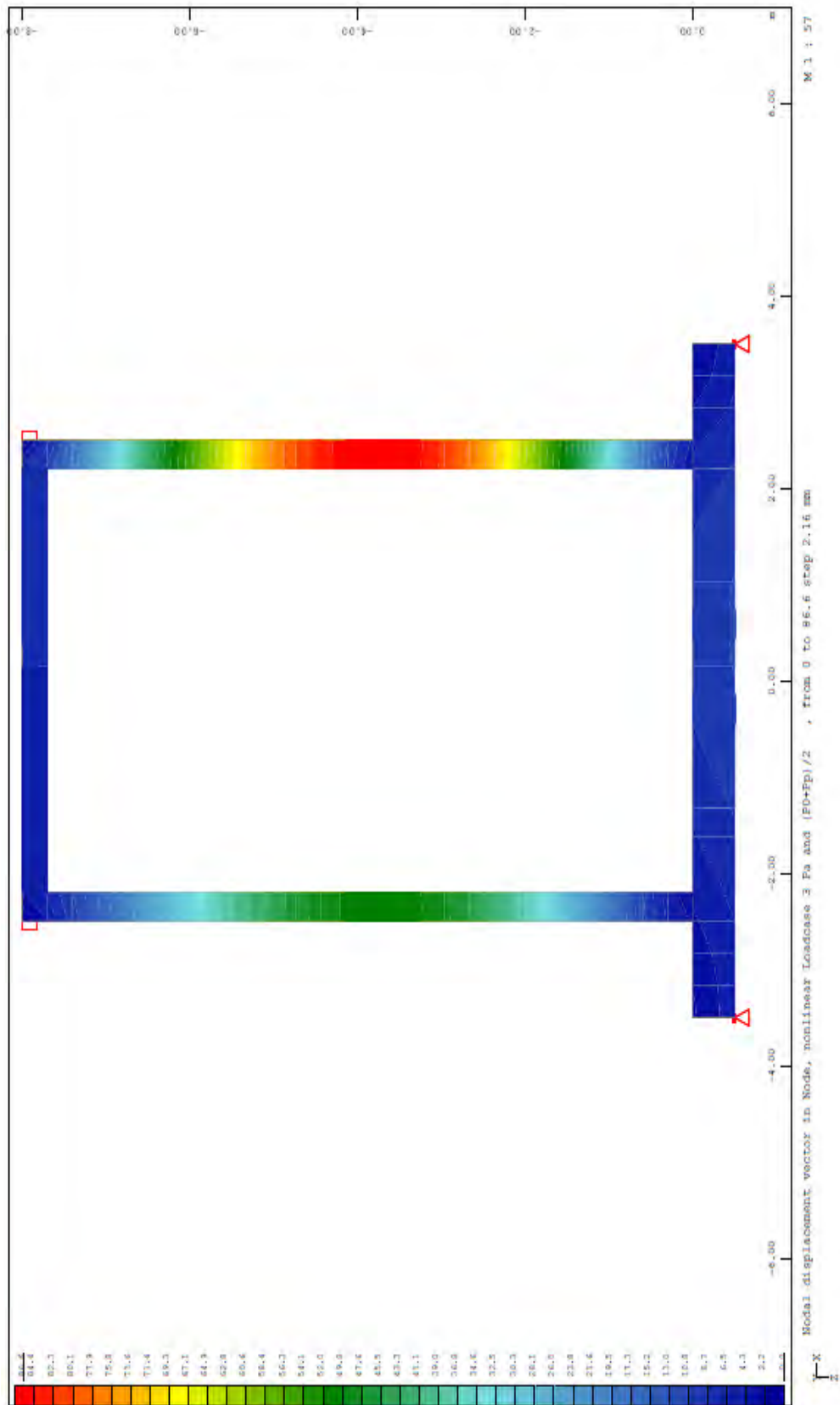
```
+PROG ASE
HEAD LOAD CASE 2
SYST PROB NONL ITER 200 TOL 0.001
LC 2
GRP -
END
```

```
+PROG ASE
HEAD LOAD CASE 3
SYST PROB NONL ITER 200 TOL 0.001
LC 3
GRP -
END
```

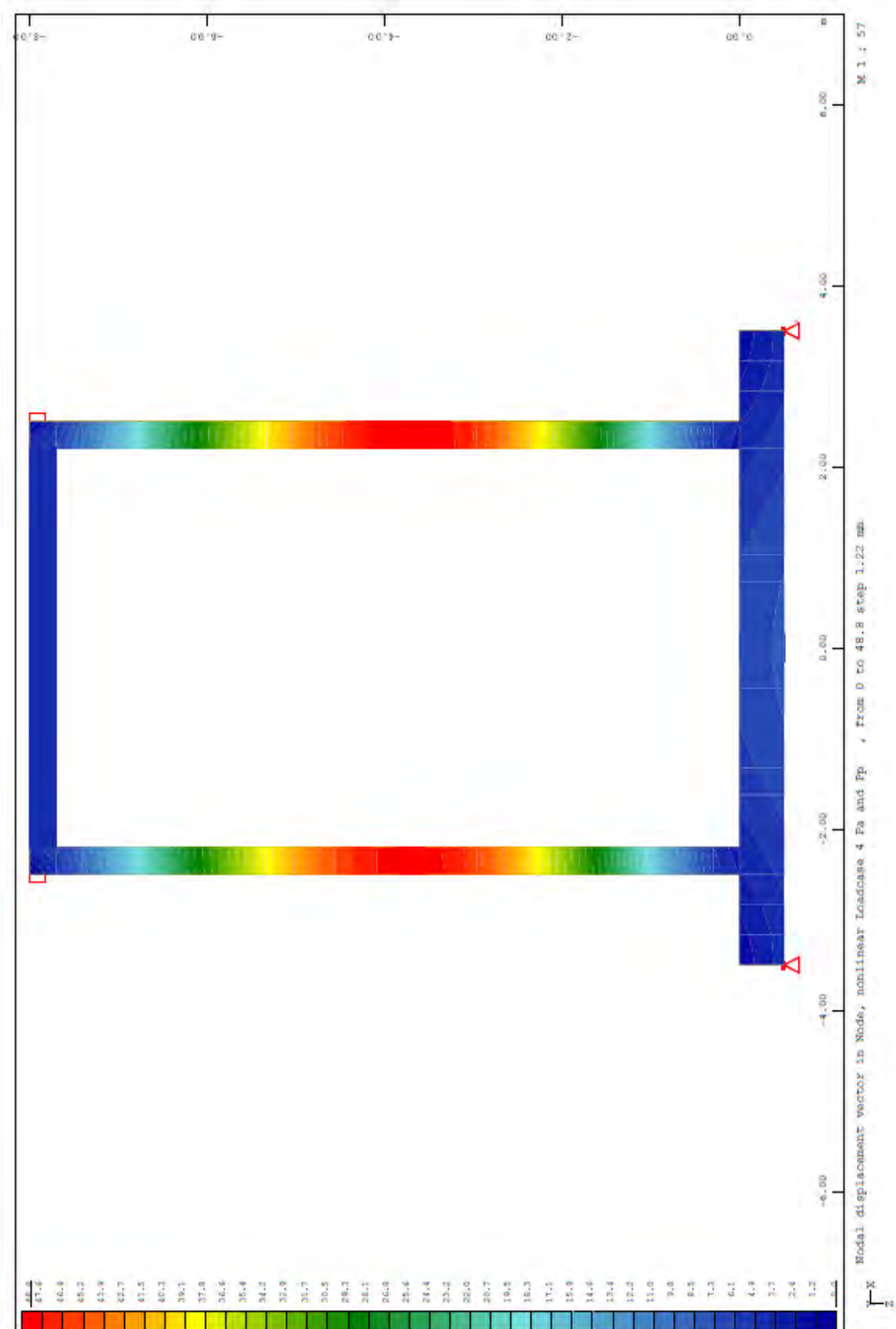
```
+PROG ASE
HEAD LOAD CASE 4
SYST PROB NONL ITER 200 TOL 0.001
LC 4
GRP -
END
```



Σχήμα 42: Μετατόπιση πλαισίου για την φόρτιση LC 2.



Σχήμα 43: Μετατόπιση πλαισίου για την φόρτιση LC 3.



Σχήμα 44: Μετατόπιση πλαισίου για την φόρτιση LC 4.

4.3.1 Διαστασιολόγηση πλαισίου.

Η διαστασιολόγηση γίνεται, ομοίως με πριν, με το PROG BEMESS και τα αποτελέσματα δίνουν το εμβαδόν του οπλισμού που απαιτείται σύμφωνα με τον κανονισμό που γίνεται η επίλυση. Επίσης, η διαστασιολόγηση γίνεται στην κατάσταση αστοχίας (ULS Design).

+PROG BEMESS

ECHO FULL FULL

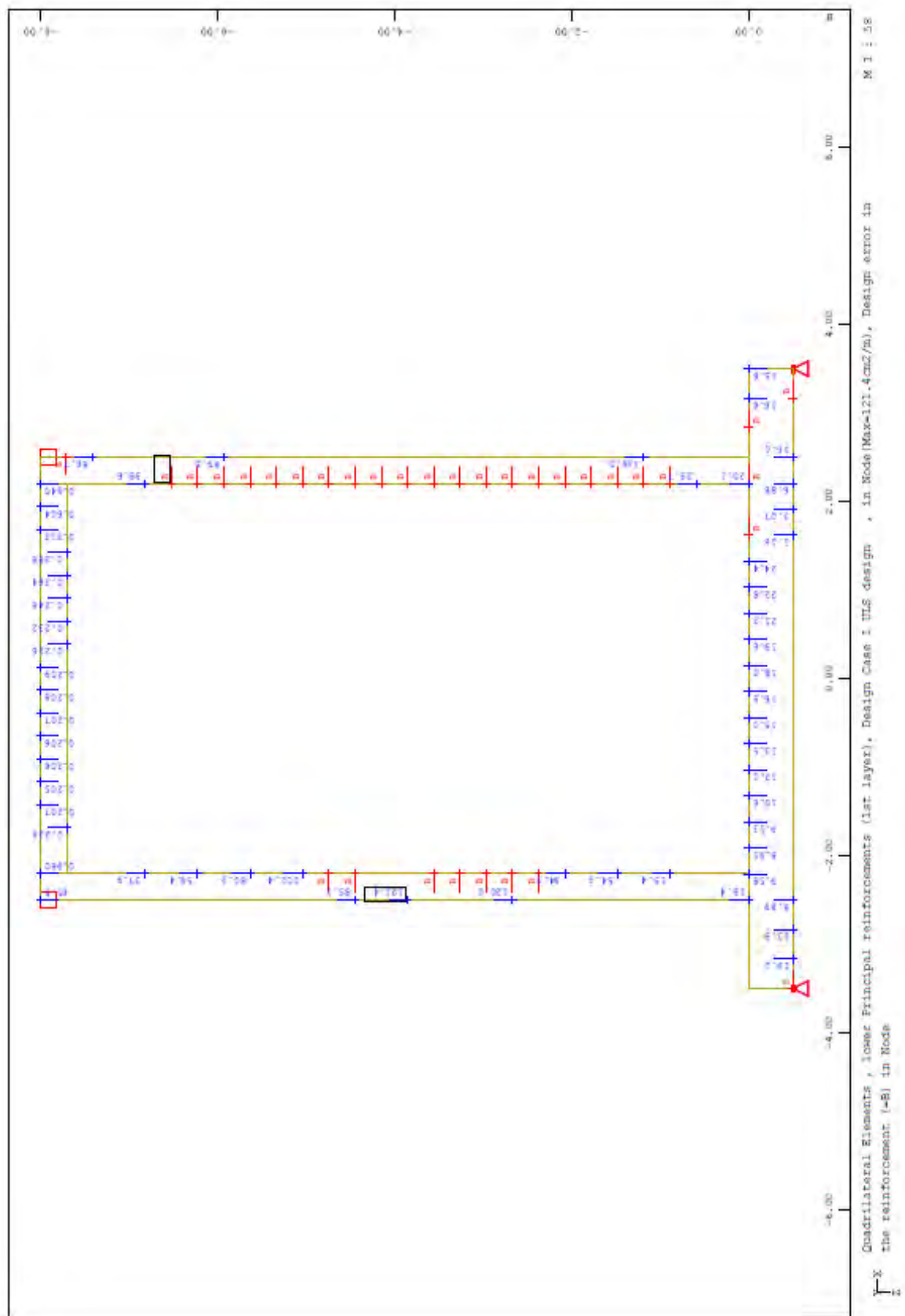
CTRL TYPE ULTI RMOD SAVE TENS 0 PFAI 2

LC 2,3,4

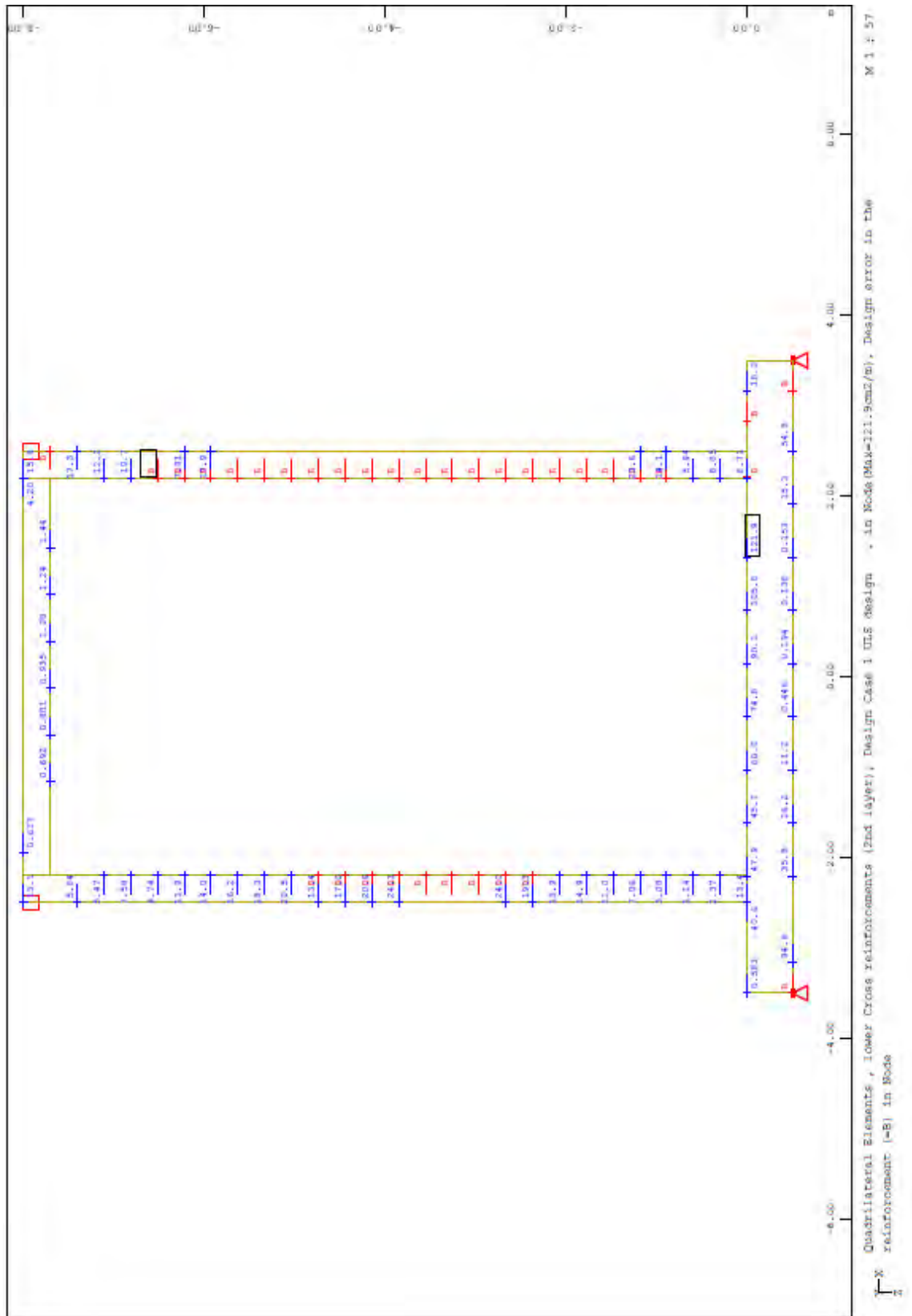
DIRE X 0.0 Y 0.0 Z 0.0

GRP -

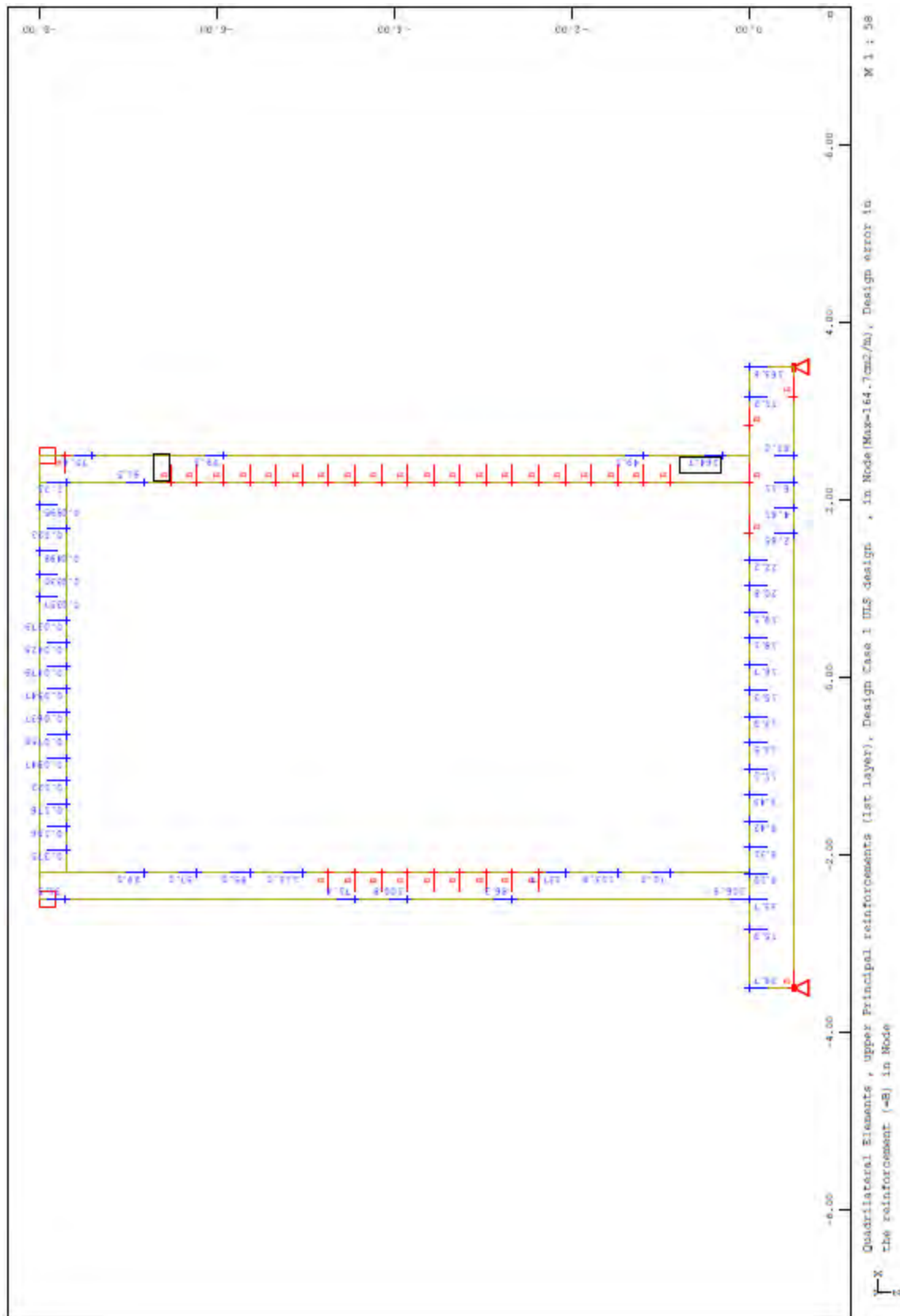
END



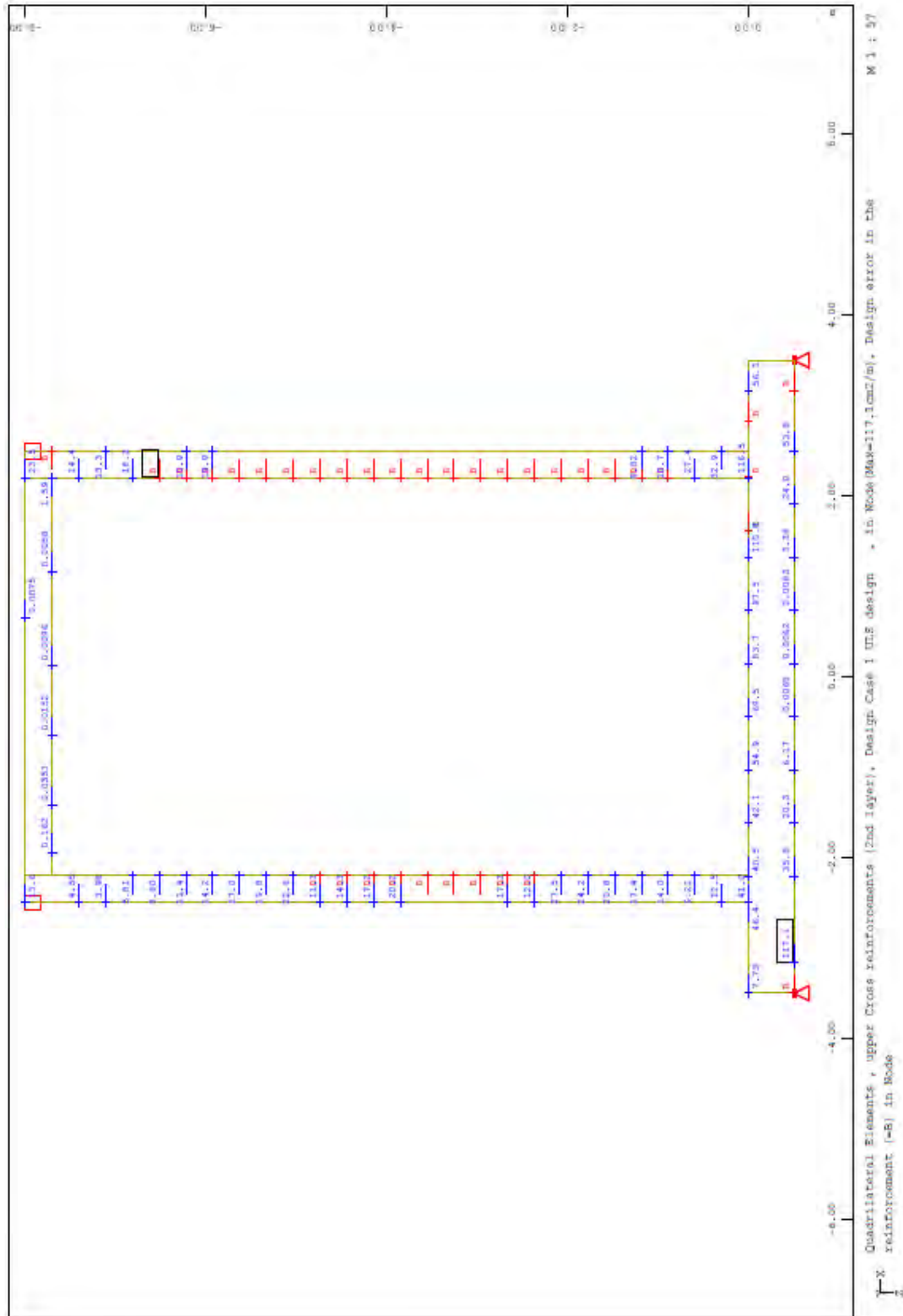
Σχήμα 45:Ο ελάχιστος απαιτούμενος κύριος σπλισμός του πλαισίου.



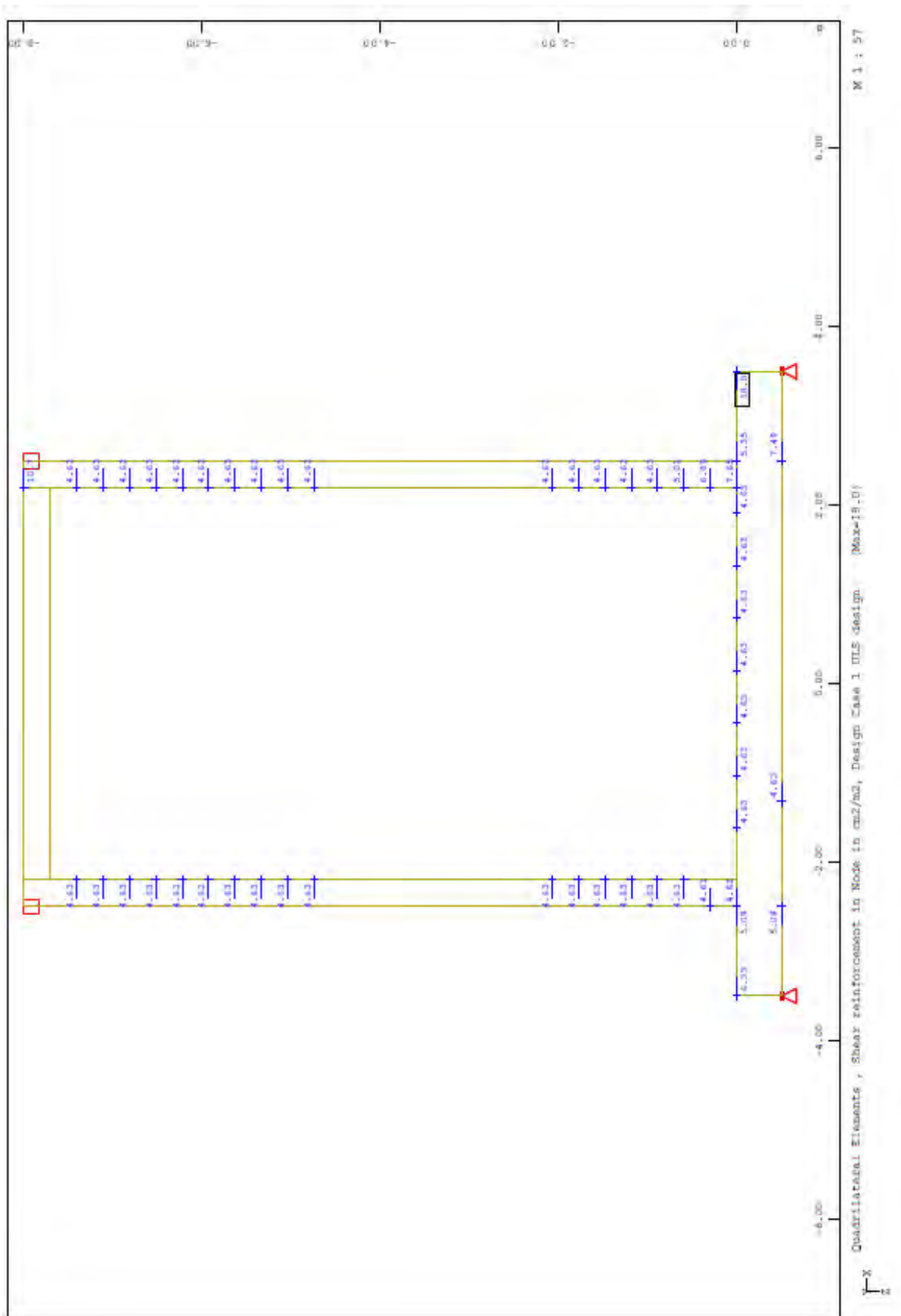
Σχήμα 46: Ο ελάχιστος απαιτούμενος εγκάρσιος σπλισμός του πλαισίου.



Σχήμα 47: Ο μέγιστος απαιτούμενος κύριος σπλισμός του πλαισίου.



Σχήμα 48:Ο μέγιστος απαιτούμενος εγκάρσιος οπλισμός του πλαισίου.



Σχήμα 49: Ο οπλισμός διάτμησης του πλαισίου του πλαισίου .

Από την διαστασιολόγηση που γίνεται από το πρόγραμμα προκύπτει ότι το εμβαδόν του οπλισμού που απαιτείται είναι πολύ μεγάλο, της τάξεως του $165 \text{ cm}^2/\text{m}$. Μόνο ο οπλισμός διάτμησης που τοποθετείται στην βάση είναι λογικός και πολύ κοντά σε αυτόν της επίλυσης της δεξαμενής. Αυτό συμβαίνει γιατί οι διαστάσεις των στοιχείων του πλαισίου είναι πολύ μικρές και δεν αντέχουν το σύνολο των φορτίων που ασκείται.

4.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων.

Συνοπτικά, από την ανάλυση της κυκλικής υπόγειας δεξαμενής προέκυψε μέγιστη μετακίνηση $313,8 \text{ mm}$ για την φόρτιση LC2, η αντίστοιχη μετακίνηση στον κυκλικό δακτύλιο είναι $7,80 \text{ mm}$ ενώ, στο πλαίσιο $124,2 \text{ mm}$. Η δε μέγιστη ροπή στην κυκλική δεξαμενή είναι $259,2 \text{ KNm}$ και παρουσιάζεται στην φόρτιση LC2, στο πλαίσιο είναι $232,2 \text{ KNm}$, ενώ στον κυκλικό δακτύλιο είναι απειροστή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1. Συμπεράσματα.

Από την ανάλυση που προηγήθηκε προκύπτει ότι για την μελέτη και διαστασιολόγηση μιας υπόγειας κυκλικής δεξαμενής είναι προτιμότερο και πιο ασφαλές να χρησιμοποιείται η σύνθετη μέθοδος προσομοίωσης παρά οι δύο απλουστευμένες. Με βάση, λοιπόν, τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην παραπάνω ενότητα, μια υπόγεια κυκλική δεξαμενή που μελετάτε χωρίς την παρουσία της πίεσης του υγρού αποθήκευσης και έχει διαστάσεις , διάμετρο 5m και ύψος 8m θα έχει κύριο σπλισμό 22/20cm ,εγκάρσιο σπλισμό 12/10cm και σπλισμό στη βάση της δεξαμενής για την παραλαβή των διατμητικών τάσεων 22/20cm. Επιπλέον, είναι σκόπιμο να τονιστεί ότι η δεξαμενή ήταν άδεια για να μελετηθούν οι ωθήσεις και να γίνει η διαστασιολόγηση της δεξαμενής χωρίς την ευεργετική επίδραση των πιέσεων στο εσωτερικό της δεξαμενής λόγω του υγρού αποθήκευσης. Τέλος, εάν η δεξαμενή ήταν γεμάτη τότε το εμβαδόν του απαιτούμενου σπλισμού θα ήταν μικρότερο , αλλά θα έπρεπε να γίνει περεταίρω έρευνα στις καθιζήσεις του εδάφους λόγω του βάρους του υγρού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- **Αιμίλιος Μ. Κωμοδρόμος** (2009). *Υπολογιστική Γεωτεχνική Μηχανική*. Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
- **Αιμίλιος Μ. Κωμοδρόμος** (2012). *Θεμελιώσεις-Αντιστηρίξεις*. Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
- **Κυριαζής Δ. Πιτιλάκης** (2010). *Γεωτεχνική Σεισμική Μηχανική*. Εκδόσεις ΖΗΤΗ.
- Eurocode 8: Seismic Design of Buildings.
- Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance-Part 4: Silos, tanks and pipelines.
- **Γιάννης Ν. Ψυχάρης** (2004). *Βασικές διατάξεις Ευρωκώδικα 8*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Δομοστατικής.
- **W. K. TSO** and **A. GHOBARAH** Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, McMaster University. Hamilton, Ont., Canada L8S 4L7, **S. K. YEE** STELCO Incorporated, Hamilton, Ont., Canada L8N 3T1 : Received January 19, 1984. *Seismic design forces for cylindrical tanks on ground*. Article in Canadian Journal of Civil Engineering · February 2011
- **Praveen K. Malhotra**, Senior Res. Scientist Factory Mutual Research, Norwood, MA, USA, **Thomas Wenk**, Civil Eng. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland, **Martin Wieland**, Dr. Electrowatt Engineering Ltd, Zurich, Switzerland. *Simple Procedure for Seismic Analysis of Liquid-Storage Tanks*. Article in Structural Engineering International 10(3):197-
- Sofistik Manual, Version 2014, Software Version SOFiSTiK 2014, by SOFiSTiK AG, Oberschleissheim, Germany.