



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

**“ΚΑΜΨΗ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΜΗΡΙΑΙΩΝ ΟΣΤΩΝ
ΤΡΩΚΤΙΚΩΝ:
ΑΚΡΙΒΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ”**

Μέρος Α: Πειραματικό πρωτόκολλο

Μέρος Β: Αξιολόγηση και επεξεργασία πειραματικών δεδομένων

Διπλωματική εργασία στην επιστημονική περιοχή της
Εμβιομηχανικής

Ανδριακοπούλου Η. Χαριτίνη

Κούβακα Ν. Άρτεμις

Επιβλέπων Καθηγητής

Δρ. Σ.Κ. Κουρκουλής

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2012

Εξεταστική επιτροπή

Σταύρος Κ. Κουρκουλής, Αναπληρωτής Καθηγητής
Εθνικού Μετσόβιου
Πολυτεχνείου
(Επιβλέπων)

Ισμήνη Δοντά, Καθηγήτρια Ιατρικής Σχολής
Εθνικού Καποδιστριακού
Πανεπιστημίου Αθηνών

Δημήτρης Ευταξιοπούλος, Επίκουρος Καθηγητής
Εθνικού Μετσόβιου
Πολυτεχνείου

Αφιερώνουμε την εργασία μας στις οικογένειές μας

Ευχαριστίες

Πρώτα από όλους θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον καθηγητή και δάσκαλό μας Δρα Κουρκουλή Σταύρο που μας εισήγαγε στο γνωστικό πεδίο της Εμβιομηχανικής και μας έδωσε την ευκαιρία να εκπονήσουμε την Διπλωματική Εργασία μας σ' αυτόν τον κλάδο. Ως επιβλέπων μας ήταν πάντα πρόθυμος και διαθέσιμος να μας προσφέρει βοήθεια και καθοδήγηση.

Θέλουμε πολύ να πούμε ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Δρα Χατζηστέργο Παναγιώτη, διδάκτορα του Τομέα Μηχανικής, η βοήθεια του οποίου στο τεχνικό κομμάτι της εργασίας μας ήταν ανεκτίμητη.

Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την Πολιτικό Μηχανικό κυρία Πάσιου Ερμιόνη, υποψήφια διδάκτορα του Τομέα Μηχανικής, για την πολύτιμη βοήθειά της στη διόρθωση της εργασίας.

Ευχαριστούμε πολύ τη Σχολή Ναυπηγών Μηχανικών του ΕΜΠ και ιδιαίτερα τον Καθηγητή κ. Δ.Παντελή, Διευθυντή του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας για την ευγενική άδεια χρήσης εγκαταστάσεων και εξοπλισμού του εργαστηρίου καθώς και την Χημικό Μηχανικό του εργαστηρίου κυρία Μπουγιούρη Βέρα.

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την κυρία Πετσεπέ Δεσποίνα, απόφοιτη της ΣΕΜΦΕ/ΕΜΠ, η οποία μας πρόσφερε χρήσιμες συμβουλές στο πρόβλημα του ορθού εγκιβωτισμού των δοκιμίων σε ρητίνη, και τον Δρα Μητουσούδη Αθανάσιο για την συνολική υποστήριξή του σε πειραματικά θέματα.

Τέλος, ευχαριστούμε τον κύριο Κούβακα Νικόλαο για την καλλιτεχνική επιμέλεια του εξώφυλλου.

Πρόλογος

Η Εμβιομηχανική είναι η επιστήμη που δημιουργήθηκε από την εξερεύνηση των ζωντανών συστημάτων εφαρμόζοντας τις αρχές διαφόρων κλάδων της μηχανικής (στατική, κινηματική, δυναμική, αντοχή των υλικών, ελαστικότητα, πλαστικότητα, ρεολογία, μηχανική του συνεχούς μέσου, μηχανική των ρευστών, πειραματική μηχανική). Η Εμβιομηχανική έχει ευρύ φάσμα εφαρμογών σε τομείς όπως η κινησιολογία, ο κλάδος της ορθοπαιδικής και της χειρουργικής, ο αθλητισμός και η σχεδίαση ιατρικών εμφυτευμάτων. Εμβιομηχανικοί και ιατροί συνεργάζονται για να πετύχουν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα για τον ασθενή.

Τα οστά είναι υλικά ανισότροπα, σύνθετα, ιξωδοελαστικά και με περίπλοκη γεωμετρία. Επίσης οι μηχανικές τους ιδιότητες εξαρτώνται από την κατάσταση που βρίσκονται και τις συνθήκες διατήρησής τους. Συνεπώς η κλασική θεωρία μηχανικής είναι πολύ δύσκολο να εφαρμοστεί. Οι ερευνητές κάνουν διάφορες παραδοχές για να προσεγγίσουν τη γεωμετρία της διατομής των οστών. Συνήθη μοντέλα είναι η θεώρηση κυκλικής διατομής (δακτυλιοειδή) και η θεώρηση ελλειπτικής διατομής.

Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η σύγκριση των τάσεων που προκύπτουν από τρεις προσεγγίσεις (ακριβής προσέγγιση, προσέγγιση δακτυλιοειδούς διατομής με χρήση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων και προσέγγιση ελαχίστου πάχους).

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και ο προσδιορισμός χαρακτηριστικών μηχανικών ιδιοτήτων και γεωμετρικών μεγεθών του μηριαίου οστού επιμύων υπό κάμψη τριών σημείων καθώς και η σύγκριση και αξιολόγηση διαφορετικών τρόπων εύρεσης της τάσης θραύσης. Ειδικότερα, έγινε σύγκριση των τάσεων που προκύπτουν από τη θεώρηση της ακριβούς διατομής του οστού, τη θεώρηση διατομής του βέλτιστου κυκλικού δακτυλίου και τη θεώρηση κυκλικού δακτυλίου με πάχος το ελάχιστο του κάθε οστού. Οι τάσεις αποτελούν βασικό μέγεθος καθώς είναι το μέτρο της αντοχής του οστού ως υλικό, απαλλαγμένο από άλλους παράγοντες.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν 173 μηριαία οστά θηλυκών επιμύων, τα οποία υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων (πλαίσιο φόρτισης MTS INSIGHT). Η φόρτιση έγινε με αργό ρυθμό (quasi-static) και η κατανομή των τάσεων θεωρήθηκε ακτινική. Παράλληλα έγινε χρήση οπτικού μηκυνσιόμετρου (RTSS_HR VideoExtensometer, Limes) ώστε να εξασφαλιστεί ο ακριβής προσδιορισμός του βέλους κάμψης.

Στην συνέχεια το ένα από τα δύο θραύσματα εγκιβωτίστηκε σε ρητίνη και λειάνθηκε ώστε να καταγραφεί η πλήρης μορφή της διατομής. Η επεξεργασία των εικόνων που λήφθηκαν από στερεοσκόπιο επεξεργάστηκαν με το λογισμικό Solidworks ώστε να προσδιοριστούν τα παρακάτω μεγέθη:

- Το γεωμετρικό κέντρο της διατομής
- Ο άξονας φόρτισης και η εκκεντρότητά του ως προς το γεωμετρικό κέντρο
- Το εμβαδόν της διατομής αστοχίας
- Η εσωτερική και εξωτερική ακτίνα
- Το μέσο και το ελάχιστο πάχος διατομής
- Το κύριο σύστημα αναφοράς
- Οι επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης του κυρίου συστήματος
- Ο ουδέτερος άξονας

- Το σημείο αστοχίας του υλικού

Με τη βοήθεια των παραπάνω μεγεθών κατέστη δυνατός ο υπολογισμός της ακριβούς τάσης αστοχίας των οστών και η σύγκρισή της με άλλες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται συχνά σε επιστημονικές μελέτες ιατρικού και εμβιομηχανικού ενδιαφέροντος.

Η παρούσα μελέτη κατέδειξε ότι η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον ακριβή προσδιορισμό της τάσης θραύσης κρίνεται απαραίτητη καθώς παρατηρήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις σε σχέση με τις προσεγγιστικές μεθόδους που αξιολογήθηκαν.

Abstract

The present study's aim is the calculation and investigation of the mechanical and geometrical characteristics of the rats' femur bone under three-point bending, as well as the comparison and evaluation of different approximations for the fracture stress. In particular, the stresses that were found by the bone's actual section outline assumption, the circular ring of average thickness approximation and the circular ring of minimum thickness approximation were compared. The stresses are a basic index of the strength of the bone as a material, free of other factors.

For this purpose 173 female rats' femoral bones were subjected to three-point bending (load frame MTS INSIGHT). The loading was quasi-static and the stress distribution was considered as radial. Simultaneously, the exact deflection of the bone was calculated with the use of an optical extensometer (RTSS_HR VideoExtensometer, Limes).

Subsequently, one of the two broken fragments of the bone was put into resin and was polished to acquire the exact form of the cross section. The processing of the images taken with the stereoscope was done with the SolidWorks software and the following characteristics were determined:

- The cross section's geometrical centre
- The loading axis and the eccentricity as to the geometrical centre
- The cross section's area
- The inner and outer radius
- The mean and minimum thickness of the cross section
- The second order moments of the principal system
- The neutral axis
- The failure point of the material

Through these characteristics it was possible to calculate the accurate fracture stress of the bones and compare it to other approximations that are commonly used in biomechanical and medical studies.

The present study demonstrated that the accurate stress calculation procedure is necessary, as there were substantial deviations from the approximate methods that were evaluated.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1.....	17
<i>Βασικές έννοιες της Εμβιομηχανικής</i>	<i>17</i>
1.1 Εμβιομηχανική.....	19
1.2 Ιστορική αναδρομή.....	19
1.3 Βασικά στοιχεία ανατομίας και Εμβιομηχανικής του μηριαίου οστού	21
1.4 Μηχανικές ιδιότητες και σύνθεση των οστών.....	26
1.5 Μορφολογικές και δομικές διαφορές μεταξύ μηριαίου οστού στον άνθρωπο και τον επίμουα.....	31
1.6 Εφαρμογές της Εμβιομηχανικής	33
Κεφάλαιο 2.....	35
<i>Στοιχεία Μηχανικής του Παραμορφώσιμου Στερεού και η Θεωρία της Κάμψης [16,17]</i>	<i>35</i>
2.1 Καθαρή κάμψη συμμετρικών δοκών στην ελαστική περιοχή	37
2.2 Καθαρή κάμψη σε επίπεδο που δεν είναι επίπεδο συμμετρίας	40
2.3 Στρέψη λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων.....	45
2.4 Στροφή συστήματος αναφοράς.....	46

2.5 Ελαστική γραμμή	48
Κεφάλαιο 3	51
<i>Πειραματική διαδικασία</i>	51
3.1 Εισαγωγή	53
3.2 Χρησιμοποιούμενος πειραματικός εξοπλισμός της μονάδας Εμβιομηχανικής / ΕΑΥ – ΕΜΠ.....	56
3.3 Πειραματόζωα	58
3.4 Πειραματική διαδικασία.....	59
3.4.1 Πειραματική διαδικασία κάμψης τριών σημείων.....	59
3.4.2 Εγκιβωτισμός δοκιμίων σε ρητίνη	62
Κεφάλαιο 4	65
<i>Επεξεργασία των μετρήσεων</i>	65
4.1 Εισαγωγή	67
4.2.1 Περιγραφή της διαδικασίας εύρεσης των απαραίτητων μεγεθών	67
4.2 Ακριβής προσέγγιση (actual section's outline)	67
4.2.2 Υπολογισμός γωνίας στροφής κύριου συστήματος και εξίσωσης ουδέτερης γραμμής.....	69
4.2.3 Υπολογισμός τάσεων με την ακριβή προσέγγιση.....	72
4.3 Προσέγγιση ομόκεντρων κύκλων με χρήση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων (circular ring of average thickness)	73
4.4 Προσέγγιση δακτυλιοειδούς διατομής ελαχίστου πάχους (circular ring of minimum thickness).....	75

Κεφάλαιο 5	77
<i>Αποτελέσματα</i>	77
5.1 Γραφικές παραστάσεις και πρωτογενή δεδομένα	79
5.2 Πίνακες αποτελεσμάτων	92
5.2.1 Αποτελέσματα τάσεων με την ακριβή προσέγγιση	92
5.2.2 Αποτελέσματα τάσεων με την προσέγγιση ομόκεντρων κύκλων.....	105
5.2.3 Αποτελέσματα τάσεων με την προσέγγιση ελαχίστου πάχους	112
5.2.4 Σύγκριση τάσεων των τριών προσεγγίσεων	119
5.3 Στατιστική επεξεργασία.....	128
5.4 Συμπεράσματα	133
5.5 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	135
Παράρτημα	137
Βιβλιογραφία.....	139

Κεφάλαιο 1

Βασικές έννοιες της Εμβιομηχανικής

1.1 Εμβιομηχανική

Η ανεξάντλητη περιέργεια σχετικά με τις βιολογικές λειτουργίες του ανθρώπινου και άλλων ειδών χρονολογείται από τα αρχαία χρόνια. Οι αρχικές μελέτες συμπεριελάμβαναν απόπειρες για την κατανόηση της λειτουργίας της καρδιάς, των πνευμόνων, του περιφερειακού και του κεντρικού νευρικού συστήματος, των μυών και των αρθρώσεων. Η επιστήμη που δημιουργήθηκε από αυτή την αρχική εξερεύνηση ήταν η μελέτη της μηχανικής των ζωντανών συστημάτων, μια επιστήμη που σήμερα ονομάζουμε *Εμβιομηχανική*. Ο ορισμός της Εμβιομηχανικής δεν είναι απόλυτος και πολλοί συγγραφείς χρησιμοποιούν διαφορετικό. Το σίγουρο είναι ότι η Εμβιομηχανική είναι ένας μικτός κλάδος επιστήμης, για τον οποίο τόσο μηχανικοί όσο και γιατροί ενδιαφέρονται, ο καθένας από τη δικιά του σκοπιά.

Αναφορές σε κείμενα εμβιομηχανικής υπάρχουν από την αρχαιότητα, ωστόσο η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη και η συνεχής απαίτηση για βελτίωση της ποιότητας ζωής των ασθενών οδήγησαν στη σημαντική ανάπτυξή της τα τελευταία χρόνια.

Η Εμβιομηχανική σχετίζεται με πλήθος ιατρικών ειδικοτήτων όπως για παράδειγμα, τη νευρολογία, την καρδιολογία, την αναισθησιολογία. Περισσότερο όμως από κάθε άλλη ειδικότητα της ιατρικής, σχετίζεται με την ορθοπεδική, δεδομένου ότι μελετά τη μηχανική του σώματος.

1.2 Ιστορική αναδρομή

Πρώτος εμβιομηχανικός θεωρείται ο Αριστοτέλης (384-322 π.Χ.) ο οποίος συγκέντρωσε τις παρατηρήσεις του στο πρώτο βιβλίο Εμβιομηχανικής «Περί της κινήσεως των ζώων» όπου αντιμετώπισε τα σώματα των ζώων ως μηχανικά συστήματα.

Στην εποχή της ρωμαϊκής αυτοκρατορίας ξεχωρίζει ο Γαληνός (131-201 μ.Χ.), έργα του οποίου όπως το «Περί της

λειτουργίας των τμημάτων», εννοώντας αυτά του ανθρώπινου σώματος, και «Περί της κινήσεως των μυών» αποτέλεσαν ευαγγέλια της ιατρικής επιστήμης για τα επόμενα 1400 χρόνια.

Πέρασαν πολλά χρόνια μέχρι την εμφάνιση του Leonardo da Vinci (1452-1519) ως εμβιομηχανικού με τη σύγχρονη έννοια. Η μελέτη του επικεντρώθηκε στη δομή του ανθρώπινου σώματος και της επίδρασής της στις επιδόσεις του. Η ιδιότητά του ως μηχανικός του έδωσε τη δυνατότητα να περιγράψει από τη μηχανική σκοπιά τις δυνάμεις που ασκούν οι μύες και τη λειτουργία των συνδέσμων σε κίνηση και στάση.

Έναν αιώνα αργότερα ο Γαλιλαίος συμβάλλει αποφασιστικά στη θεμελίωση του ανθρώπινου σώματος ως ενιαία μηχανική κατασκευή. Την ίδια εποχή ο Andreas Vesalius δημοσιεύει το βιβλίο του «Περί της δομής του ανθρώπινου σώματος» το οποίο παρουσίαζε πρωτοποριακή εικονογράφηση και απόψεις.

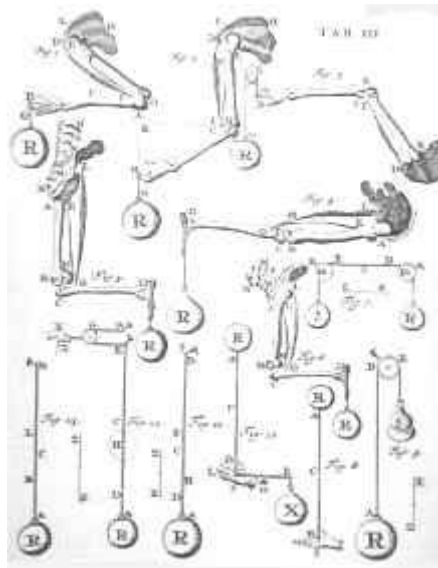
Δεσπόζουσα θέση ανάμεσα στους πατέρες της Εμβιομηχανικής κατέχει ο Ιταλός μαθηματικός και αστρονόμος Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679), ο οποίος σε συνεργασία με τον ιατρό Malphigi, έδωσε μεγάλη ώθηση στην Εμβιομηχανική, θεμελίωσε την ιατροφυσική προσέγγιση της Ιατρικής, υποστηρίζοντας ότι η φυσική και η χημεία είναι τα κλειδιά για την κατανόηση της δομής και της λειτουργίας του σώματος. Σημαντικότερο έργο του είναι το «De Motu Animalium».

Μέχρι τις αρχές του δεύτερου μισού του 19^{ου} αιώνα η βασική εξέλιξη στην Εμβιομηχανική γίνεται στον τομέα της κινησιολογίας, τον οποίο ο Benno Nigg ονόμασε «αιώνα του βαδίσματος». Η εισαγωγή κινηματογραφικών τεχνικών στην μελέτη της κίνησης άνοιξαν το δρόμο στους Christian Wilhelm Braune (1831-1892) και Otto Fischer (1861-1917) να μελετήσουν την ανθρώπινη βάδιση.

Την ίδια περίοδο, έχουμε άνθηση της μηχανικής των υλικών σε Γερμανία και Γαλλία. Υπό το πρίσμα νέων θεωρητικών προσεγγίσεων, όπως της έννοιας των κύριων τάσεων από τον Augustin-Louis Cauchy (1789-1857) και υπό τις επιταγές της βιομηχανικής επανάστασης, Γερμανοί και

Γάλλοι μηχανικοί αναπτύσσουν τα θεωρητικά τους εργαλεία. Αυτό οδήγησε στην αναγέννηση της Εμβιομηχανικής των οστών όταν ο Karl Culmann (1821–1881) και ο Hermann von Meyer (1801-1869) συνέκριναν τη μορφή της κατανομής των τάσεων στο ανθρώπινο ισχίο, με αυτή σε ένα παρόμοιου σχήματος βραχίονα.

Επηρεασμένος από τα συμπεράσματα των Culmann και Meyer, ο Tullius Wolff διατύπωσε το 1892 τον κλασικό και ομώνυμο νόμο που λέει ότι: Κάθε αλλαγή στη μορφή και λειτουργία ή μόνο στην λειτουργία ενός οστού έχει σαν επακόλουθο την πρόκληση συγκεκριμένων αλλαγών στην εσωτερική δομή και αρχιτεκτονική του, καθώς και αλλαγών στην εξωτερική του μορφή [1].



Εικόνα 1.2.1: Απόσπασμα από τους υπολογισμούς του Alfonso Borelli [2].

1.3 Βασικά στοιχεία ανατομίας και Εμβιομηχανικής του μηριαίου οστού

Το μηριαίο οστόν είναι το μακρύτερο οστό στο ανθρώπινο σώμα. Πρέπει να αναπτυχθεί κατάλληλα σε όλο του το μήκος για να επιτρέψει οργανωμένη μυοσκελετική δραστηριότητα στο ισχίο και το γόνατο. Μικρές αλλά και μεγάλες αλλαγές

στην ανάπτυξη προκαλούμενες από τραυματισμό μπορεί να αλλάξουν την μορφολογία του φυσιολογικού οστού και των αρθρώσεων με αποτέλεσμα να επηρεαστεί η εμβιομηχανική μιας συγκεκριμένης άρθρωσης ή ακόμα και ολόκληρων των κάτω άκρων.

Το μηριαίο οστόν είναι ένα σημαντικό κατασκευάσμα μέσα στο ανθρώπινο σώμα και μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει δύο ξεχωριστές λειτουργίες. Ενεργεί επιτρέποντας στο βάρος του άνω μέρους του σώματος να μεταφερθεί από την άρθρωση του ισχίου στην άρθρωση του γόνατος. Επίσης παίζει το ρόλο ενός κατασκευάσματος γύρω από το οποίο οι μύες ενεργούν για να προσδώσουν κίνηση στις αρθρώσεις του ισχίου και του γόνατος. Πειραματικές μελέτες δείχνουν ότι κατά την βάρδια και στάση στο ένα πόδι, *in-vivo* δυνάμεις αντίδρασης που κυμαίνονται στο 200% με 250% του βάρους του σώματος εμφανίζονται στις αρθρώσεις του ισχίου και του γόνατος, με τις μεγαλύτερες δυνάμεις να εμφανίζονται κατά τη διάρκεια δραστηριοτήτων όπως τρέξιμο καθώς και ανάβαση και κατάβαση κλιμάκων.

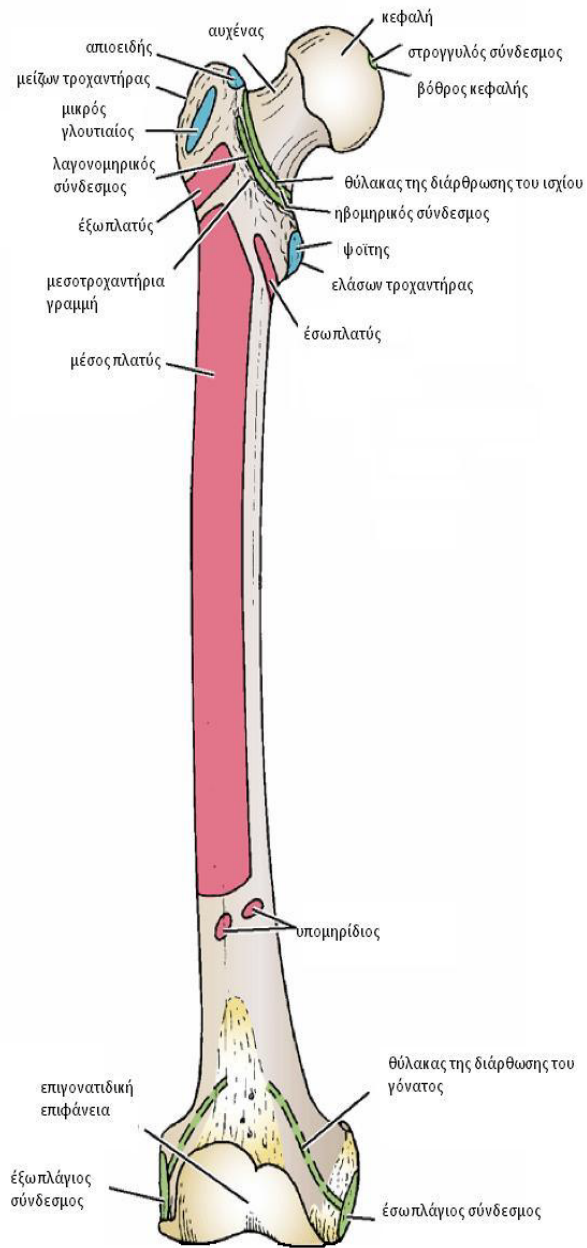
Το άνω άκρο του μηριαίου οστού εμφανίζει την κεφαλή, τον αυχένα και το ελάσσωνα και μείζονα τροχαντήρα. Η κεφαλή αποτελεί περίπου τα 2/3 σφαίρας και συντάσσεται με την κοτύλη του ανώνυμου οστού σχηματίζοντας την άρθρωση του ισχίου. Στο κέντρο της κεφαλής υπάρχει ένα μικρό εντύπωμα, το βοθρίο της κεφαλής, για την κατάφυση του στρογγυλού συνδέσμου. Μέρος της αιμάτωσης της κεφαλής μεταφέρεται κατά μήκος του συνδέσμου αυτού.

Ο αυχένος συνδέει την κεφαλή με το σώμα και φέρεται προς τα κάτω, έξω και πίσω, σχηματίζοντας γωνία περίπου 125° (ελαφρώς μικρότερη στην γυναίκα) με τον επιμήκη άξονα του σώματος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγεθος αυτής της γωνίας μπορεί να μεταβληθεί από παθολογικές κατάστασεις.

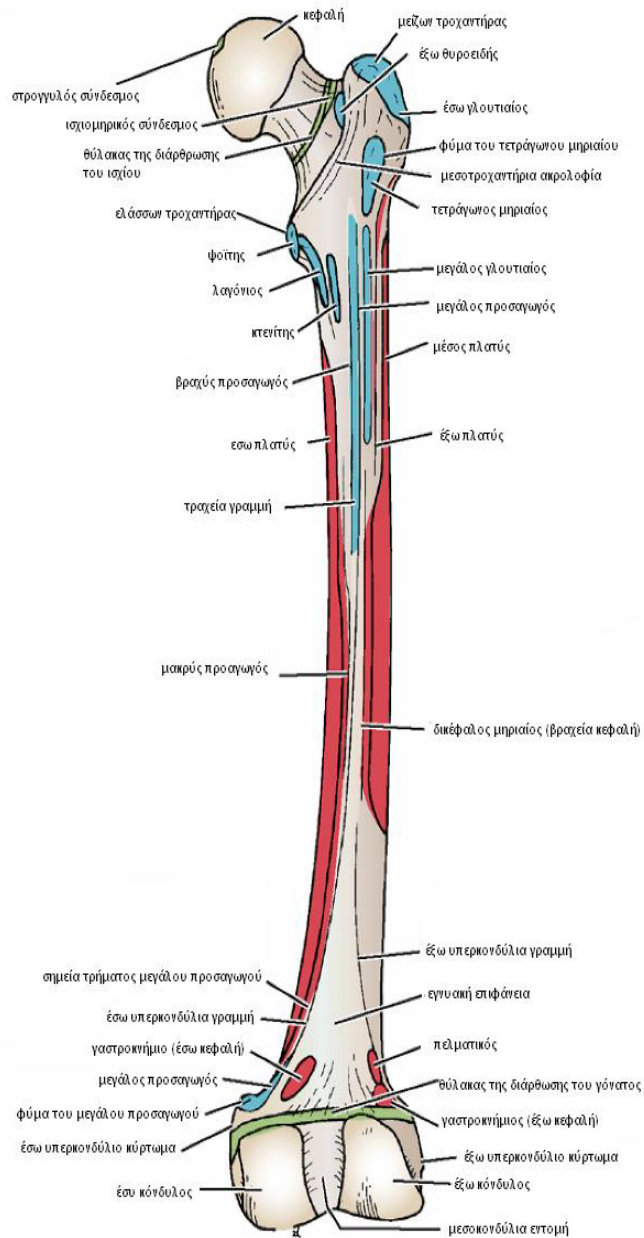
Οι τροχαντήρες, μείζων και ελάσσων, είναι προεξοχές που βρίσκονται στην περιοχή όπου ενώνεται ο αυχένος με το σώμα. Προς τα εμπρός οι τροχαντήρες συνδέονται με την μεσοτροχαντήρια γραμμή, ενώ προς τα πίσω, ανάμεσα στους δύο τροχαντήρες, υπάρχει η μεσοτροχαντήρια ακρολοφία, πάνω στην οποία βρίσκεται το φύμα του τετράγωνου μηριαίου.

ου. Το σώμα του μηριαίου οστού είναι υπόκυρτο προς τα εμπρός. Η πρόσθια επιφάνεια του είναι ομαλή και υποστρογγυλή, αλλά η οπίσθια επιφάνεια εμφανίζει την τραχεία γραμμή. Προς τα άνω και προς τα κάτω τα χείλη της τραχείας γραμμής αποκλίνουν. Το έσω χείλος συνεχίζει προς τα κάτω ως έσω υπερκονδύλια γραμμή και τελειώνει στο φύμα του μεγάλου προσαγωγού μυός. Το έξω χείλος συνεχίζει προς τα κάτω και συνδέεται με την έξω υπερκονδύλια γραμμή. Στην οπίσθια επιφάνεια του σώματος του μηριαίου οστού, κάτω από το μείζονα τροχαντήρα, υπάρχει το γλουτιαίο τράχυσμα, το οποίο συνεχίζεται προς τα κάτω με την τραχεία γραμμή στο κάτω μέρος του, το σώμα πλαταίνει και, προς τα πίσω, σχηματίζει μια τριγωνική επιφάνεια, που λέγεται ιγνυακή επιφάνεια.

Το κάτω άκρο του μηριαίου οστού εμφανίζει τον έσω και έξω κόνδυλο οι οποίοι προς τα πίσω χωρίζονται με τη μεσοκονδύλια εντομή. Οι πρόσθιες επιφάνειες των κονδύλων συνδέονται με μια αρθρική επιφάνεια, τη μηριαία τροχιλία η οποία χρησιμεύει για την σύνταξη με την οπίσθια επιφάνεια της επιγονατίδας. Οι δύο κόνδυλοι συμμετέχουν στο σχηματισμό της άρθρωσης του γόνατος. Πάνω από τους κόνδύλους βρίσκονται το έσω και έξω υπερκονδύλιο κύρτωμα. Το φύμα του μεγάλου προσαγωγού μυός συνεχίζεται με το έσω υπερκονδύλιο κύρτωμα [3].



Εικόνα 1.3.1: Μύες και σύνδεσμοι που προσφύονται στην πρόσθια επιφάνεια του μηριαίου οστού. (σελ. 560 [3])



Εικόνα 1.2.2: Μύες και σύνδεσμοι που προσφύονται στην οπίσθια επιφάνεια του μηριαίου οστού. (σελ. 560 [3])

1.4 Μηχανικές ιδιότητες και σύνθεση των οστών

Το οστό είναι ένα ιξωδοελαστικό υλικό του οποίου οι μηχανικές ιδιότητες επηρεάζονται από το ρυθμό παραμόρφωσης. Οι ελαστικές ιδιότητες του οστού οφείλονται στην ύπαρξη κολλαγόνου το οποίο του δίνει την ικανότητα να δεχθεί εφελκυστικά φορτία. Το οστό είναι επίσης ψαθυρό υλικό και η αντοχή του εξαρτάται από το μηχανισμό φόρτισης. Η ψαθυρότητα του οστού οφείλεται στα μεταλλικά του συστατικά που του δίνουν την ικανότητα να δεχθεί θλιπτικά φορτία [4,5,6].

Το οστό είναι ένα σύνθετο υλικό που αποτελείται από μεταλλικά στοιχεία, πρωτεΐνες, νερό, κύτταρα και άλλα μακρομόρια. Η σύνθεσή του ποικίλλει ανάλογα με το ανατομικό σημείο, ηλικία, διαίτα και την ύπαρξη παθολογικής κατάστασης. Γενικά όμως, πε-



ρίπου το 90% της οργανικής μητρας του οστού είναι κολλαγόνο και το κύριο συστατικό της μεταλλικής του φάσης είναι ο υδροξυαπατίτης. Το κολλαγόνο έχει χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, καλή εφελκυστική αντοχή και κακή θλιπτική αντοχή. Ο υδροξυαπατίτης είναι ένα ψαθυρό υλικό με καλή θλιπτική αντοχή. Αυτός ο συνδυασμός δημιουργεί ένα ανισότροπο υλικό με μεγάλη αντοχή σε θλίψη, μικρότερη σε διάτμηση και ενδιάμεση στον εφελκυσμό.

Εικόνα 1.3.1: Κεφαλή ισχίου, διακρίνονται το φλοιώδες και το σπογγώδες οστό [7].

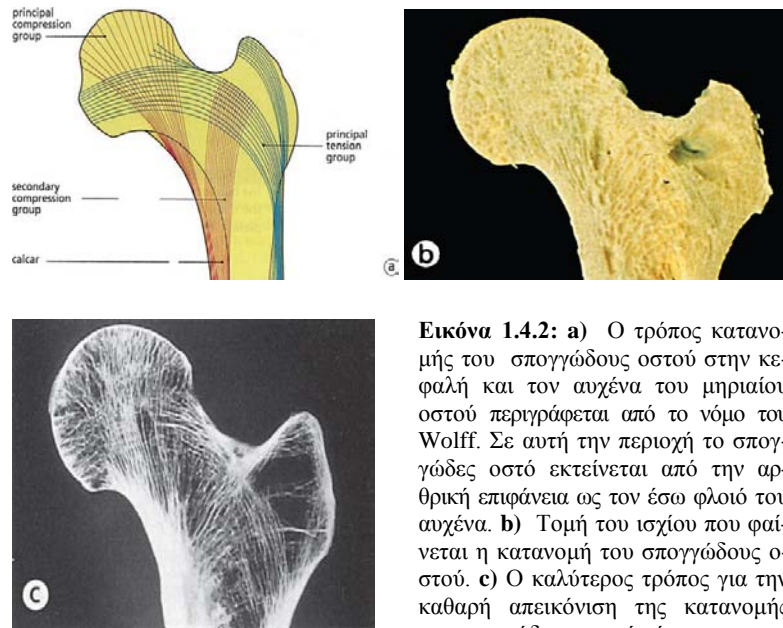
Τα μεταλλικά στοιχεία καθορίζουν το μέτρο ελαστικότητας του φλοιώδους οστού. Το φλοιώδες οστό έχει μεγάλη αντοχή σε στρέψη, ενώ το σπογγώδες οστό σε θλίψη και διάτμηση. Το σπογγώδες οστό είναι 25% πιο πυκνό, 10% πιο άκαμπτο και 500% πιο ελατό από το φλοιώδες οστό. Η πυκνότητα του σπογγώδους οστού ποικίλλει ανάλογα με την ανατομική θέση του οστού και την ηλικία, και τέτοιες διακυμάνσεις έχουν άμεσο αντίκτυπο στις μηχανικές ιδιότητες του ιστού.

Το φλοιώδες οστό σχηματίζει το εξωτερικό τοίχωμα όλων των οστών και το σπογγώδες οστό βρίσκεται στο εσωτερικό των οστών. Στο φλοιώδες οστό, η κύρια κατασκευαστική μονάδα είναι ο οστεώνας ή Αβερσιανό σύστημα. Το σπογγώδες οστό αποτελείται από λεπτές στρώσεις και ράβδους σπογγώδους οστού. Οι διαφορές στην βασική αρχιτεκτονική του σπογγώδους και του φλοιώδους οστού φαίνονται στην εικόνα 1.4.1.

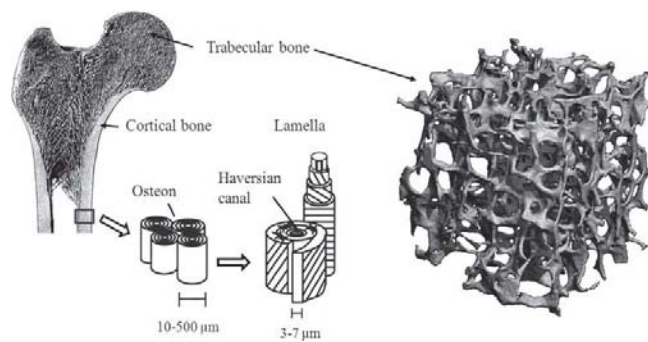
Ο νόμος του Wolff ορίζει ότι η δομή του οστού μεταβάλλεται ανάλογα με τα ασκούμενα φορτία. Για παράδειγμα, οι ίνες του σπογγώδους οστού στην κεφαλή και τον αυχένα του ισχίου (εικόνα 1.4.2) κατανομούνται έτσι ώστε να αντέξουν τις τυπικές φορτίσεις που δέχεται το ισχίο από καθημερινές δραστηριότητες. Και οι δύο ομάδες σπογγώδων ινών που θλίβονται είναι συγκεντρωμένες στο εγγύς και έσω φλοιό, επιτρέποντάς του να αντέξει τις θλιπτικές δυνάμεις που του ασκούνται κατά τη διάρκεια του βαδίσματος. Σε ορισμένες παθολογικές καταστάσεις ο νόμος του Wolff δεν ισχύει καθώς το οστό χάνει την ικανότητα ανακατασκευής ανάλογα με τις τάσεις [8].

Οι μηχανικές ιδιότητες του φλοιώδους οστού εξαρτώνται τόσο από το είδος της μηχανικής φόρτισης όσο και από την κατεύθυνσή της (ανισότροπο υλικό). Σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα για ανθρώπινα και βόεια δοκίμια μηρού και κνήμης [9] η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας του φλοιώδους οστού υπό θλίψη κυμαίνονται από 133 μέχρι 295 MPa (μέσος όρος 200 ± 36 MPa) και από 14,7 μέχρι 34,3 GPa (μέσος όρος $23 \pm 4,8$ GPa) αντίστοιχα. Η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητάς του υπό εφελκυσμό κυμαίνονται από 92 μέχρι 188 MPa (μέσος όρος 141 ± 28 MPa) και από 7,1 μέχρι 28,2 (μέσος όρος $19,6 \pm 6,2$ GPa), αντίστοιχα. Η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητάς του για πειράματα στρέψης κυμαίνονται από 53 μέχρι 188 MPa (μέσος όρος 65 ± 9 MPa) και από 3,1 μέχρι 3,7 GPa, αντίστοιχα. Η εφελκυστική αντοχή είναι περίπου τα 2/3 της θλιπτικής αντοχής. Η στρεπτική αντοχή ισούται περίπου με το 1/3-1/2 της αξονικής αντοχής όπως βρέθηκε από πειράματα κάμψης, εφελκυσμού ή θλίψης. Το μέτρο ελαστικότητας σε στρέψη ισούται περίπου με το 1/6-1/5 του αξονικού μέτρου ελαστικότητας. Η αντοχή σε

κάμψη και το μέτρο ελαστικότητας του φλοιώδους οστού κυμαίνεται από 35 μέχρι 283 MPa και από 5 μέχρι 23 GPa, αντίστοιχα.



Εικόνα 1.4.2: α) Ο τρόπος κατανομής του σπογγώδους οστού στην κεφαλή και τον αυχένα του μηριαίου οστού περιγράφεται από το νόμο του Wolff. Σε αυτή την περιοχή το σπογγώδες οστό εκτείνεται από την αρθρική επιφάνεια ως τον έσω φλοιό του αυχένα. β) Τομή του ισχίου που φαίνεται η κατανομή του σπογγώδους οστού. γ) Ο καλύτερος τρόπος για την καθαρή απεικόνιση της κατανομής του σπογγώδους οστού είναι η ακτινογραφία του δοκιμίου. (σελ. 64 [8])



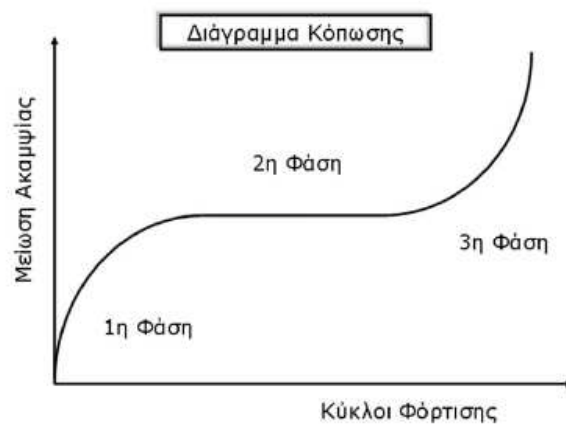
Εικόνα 1.4.3: Υπάρχουν διαφορές στην ιεραρχία δόμησης μεταξύ του φλοιώδους (αριστερά) και του σπογγώδους οστού. (δεξιά, προσφορά της SCANCO Medical AG, Switzerland (σελ. 70 [10])

Η αντοχή του οστού επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες όπως:

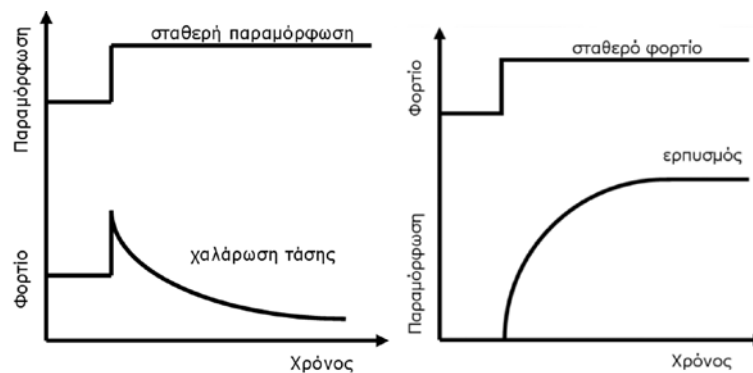
1. Τον τύπο της φόρτισης. Δυνάμεις εφελκυσμού δημιουργούν εγκάρσια κατάγματα, θλιπτικές δυνάμεις λοξά και στροφικές σπειροειδή.
2. Την κατεύθυνση της φόρτισης. Το οστό είναι ανισότροπο υλικό και επομένως οι ιδιότητές του εξαρτώνται από τον άξονα κατά τον οποίο φορτίζεται. Είναι ισχυρότερο στον επιμήκη άξονά του σε σχέση με τον εγκάρσιο.
3. Το ρυθμό φόρτισης. Μία γρήγορη φόρτιση προκαλεί αύξηση του μέτρου ελαστικότητας και της μέγιστης δύναμης.
4. Την κατάσταση του υλικού. Οι μηχανικές ιδιότητες του υγρού οστού διαφέρουν από αυτές του ξηρού.

Ένα υλικό ονομάζεται ισότροπο όταν έχει τις ίδιες ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις. Το οστό παρουσιάζει διαφορετικές ιδιότητες όταν φορτιστεί σε διαφορετικές κατευθύνσεις, ιδιότητα που το καθιστά ανισότροπο. Τα ανισότροπα υλικά που έχουν διαφορετικές ιδιότητες και στους τρεις άξονες καλούνται ορθότροπα, ενώ αν έχουν τις ίδιες ιδιότητες στους δύο άξονες καλούνται εγκαρσώς ισότροπα. Οι οστεώνες είναι εγκαρσώς ισότροπες δομές. Το μέτρο ελαστικότητάς και η αντοχή του οστού διαφέρουν ανάλογα με την περιοχή που ελέγχεται και το είδος της φόρτισης. Το οστό είναι ασθενέστερο στον εφελκυσμό παρά στην θλίψη. Η επαναλαμβανόμενη φόρτιση οδηγεί στην πρόκληση βλαβών που δεν αποκαθίστανται και αποκαλείται κόπωση. Η καμπύλη κόπωσης του οστού παρουσιάζει τρεις φάσεις (εικόνα 1.4.4). Στην πρώτη φάση (0%-15% του μέγιστου αριθμού κύκλων φόρτισης) η ακαμψία του οστού μειώνεται γρήγορα εξαιτίας της δημιουργίας ρωγμών. Στη δεύτερη φάση (15%-90%) του μέγιστου αριθμού κύκλων φόρτισης) η απώλεια ακαμψίας είναι σταθερή, ενώ στην τρίτη φάση (>90% του μέγιστου αριθμού κύκλων φόρτισης) προκαλείται μηχανική αστοχία του οστού. Όριο κόπωσης είναι η μέγιστη τάση υπό την οποία ένα υλικό δεν θα αστοχήσει όταν υποβληθεί σε

απεριόριστους κύκλους φορτίσεων, ενώ αντοχή στην κόπωση είναι το μέγιστο φορτίο που μπορεί να επιβληθεί σε ένα κύκλο πριν υποστεί θραύση. Το οστό έχει την δυνατότητα αποκατάστασης ρωγμών που δημιουργούνται στο φλοιό σαν αποτέλεσμα φόρτισης. Εάν διακοπεί η λειτουργία της ανακατασκευής εντός δύο ετών το οστό θα οδηγηθεί σε μηχανική αστοχία λόγω κόπωσης.



Εικόνα 1.4.4: Διάγραμμα κόπωσης οστού σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση. (σελ. 15 [14])



Εικόνα 1.4.5 Τα φαινόμενα χαλάρωσης τάσης και ερπυσμού που χαρακτηρίζουν την ιξωδοελαστική συμπεριφορά του οστού. Στον ερπυσμό η φόρτιση του οστού διατηρείται σταθερή, αλλά η παραμόρφωση σταθεροποιείται και παραμένει αμετάβλητη μετά την πάροδο ορισμένου χρονικού διαστήματος. Στο φαινόμενο της χαλάρωσης τάσης η παραμόρφωση διατηρείται σταθερή με αποτέλεσμα την μείωση της προκαλούμενης τάσης μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα. (σελ. 16 [14])

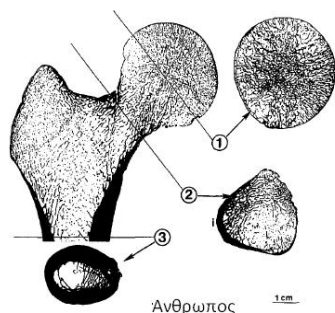
Το οστό είναι ιξωδοελαστικό υλικό, δηλαδή η μηχανική τους συμπεριφορά είναι εξαρτώμενη του χρόνου, ιδιότητα που οφείλεται στην εσωτερική τριβή του υλικού [11-13]. Ερπυσμός είναι η παραμόρφωση που υφίσταται ένα υλικό όταν υπόκειται σε σταθερή φόρτιση ενώ υστέρηση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ενώ ένα υλικό παραμορφώνεται όταν αρθεί η δύναμη που εξασκείται επανέρχεται στην αρχική κατάσταση με διαφορετική διαδρομή (εικόνα 1.4.5). Η απώλεια ενέργειας μεταξύ των δύο καταστάσεων οφείλεται στην εσωτερική τριβή του υλικού. Τα ιξωδοελαστικά υλικά είναι σκληρότερα και ανθεκτικότερα σε υψηλό ρυθμό φόρτισης. Όσο ταχύτερος είναι ο ρυθμός φόρτισης, τόσο μεγαλύτερη είναι η απορρόφηση ενέργειας πριν από την πρόκληση κατάγματος. Το φορτίο θραύσης του ανθρώπινου μηριαίου οστού αυξάνει κατά 20% όταν αυξηθεί ο ρυθμός φόρτισης κατά 50 φορές. Η επιμήκυνση που είναι δυνατό να αντέξει το οστό είναι αντίστροφα ανάλογη με το χρόνο εφαρμογής της δύναμης [14].

1.5 Μορφολογικές και δομικές διαφορές μεταξύ μηριαίου οστού στον άνθρωπο και τον επίμυα

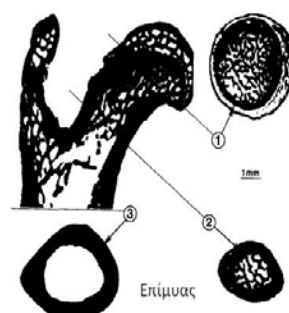
Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο ζωικό μοντέλο για την μελέτη της οστικής απώλειας, της δομής και αντοχής του οστού καθώς και για την αξιολόγηση των οφελών διαφόρων θεραπευτικών στρατηγικών για την βελτίωση της οστικής μάζας και αντοχής είναι το μοντέλο επίμυων που έχουν υποστεί ωθηκτομή για την μελέτη της οστεοπόρωσης μετά την εμμηνόπαυση. Ωστόσο υπάρχουν μορφολογικές και δομικές διαφορές του ανθρώπινου και του επίμυα μηριαίου οστού, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα μιας μελέτης σύγκρισης ιστοανατομικών και δομικών χαρακτηριστικών του αυχένα του ισχίου.

Εκτός από διαφορετικές εμβιομηχανικές ιδιότητες, υπάρχει και μια σημαντική διαφορά στην μικροανατομία και ανατομία του εγγύς μηριαίου σε ανθρώπους και επίμυες. Το πο-

σοστό του φλοιώδους οστού είναι πολύ υψηλότερο στους επίμυες (72,5%) σχετικά με τους ανθρώπους (12,5%). Επίσης, το φλοιώδες οστό στον μηριαίο αυχένα στους επίμυες είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο, ενώ στους ανθρώπους υπάρχει μια σημαντική διαφορά στην ποσότητα του φλοιώδους οστού μεταξύ του άνω μισού του μηριαίου αυχένα με πάχος μόνο 0,3mm, και του κάτω μισού του αυχένα με πάχος 6mm. Ωστόσο, η απουσία αβερσιανού συστήματος και οστεώνων στους επίμυες κάνει την σύγκριση μεταξύ αναδιαμόρφωσης του φλοιώδους οστού ανάμεσα στους επίμυες και τους ανθρώπους αδύνατη. Οι άνθρωποι έχουν πολύ περισσότερο σπογγώδες οστό στον μηριαίο αυχένα (22,7% μέσος όρος) σχετικά με τους επίμυες (6,8%). Επιπλέον, το σπογγώδες οστό στον μηριαίο αυχένα του ανθρώπου είναι μη ομοιόμορφα κατανεμημένο μεταξύ του κέντρου του οστού και της περιφέρειάς του. Ο προσανατολισμός του σπογγώδους οστού στον μηριαίο αυχένα είναι σημαντικά διαφορετικός ανάμεσα στους ανθρώπους και τους επίμυες υποδεικνύοντας (α) διαφορές στις εμβιομηχανικές ιδιότητες του εγγύς μηριαίου (β) και ότι το σπογγώδες οστό του μηριαίου αυχένα στους επίμυες ίσως έχει λιγότερη σημασία, όσον αφορά την αντοχή, σε σύγκριση με τους ανθρώπους. Τα ανθρώπινα δοκίμια εμφάνισαν σημαντικές διαφορές στη δομή του σπογγώδους οστού μεταξύ σπογγώδων εφελκυσόμενων ινών και των θλιβόμενων ινών. Το σπογγώδες οστό εμφανίζει καθαρό προσανατολισμό που αποτελείται από στρώματα, ράβδους και δοκίδες γύρω από τον ουδέτερο άξονα του οστού. Παρ' όλο που οι άνθρωποι και οι επίμυες έχουν περίοστεο που καλύπτει τον μηριαίο αυχένα, και από το καθένα λείπει η μυική σύνδεση στα ενδοθυλακικά σημεία του μηριαίου αυχένα, οι επίμυες, σε αντίθεση με τους ανθρώπους, έχουν την ικανότητα να προσαρμόζουν γρήγορα το πάχος του φλοιού και να αυξάνουν την αδράνεια για να ανταποκριθούν στις μηχανικές ανάγκες με περιριστική απόθεση. Ωστόσο, ανεξάρτητα από τις δομικές διαφορές, ο τρόπος απώλειας σπογγώδους οστού είναι παρόμοιος ανάμεσα στους ηλικιωμένους ανθρώπους και στους ηλικιωμένους επίμυες [15].



Εικόνα 1.5.1: Μικροακτινογραφήματα του ανθρώπινου μηριαίου οστού που απεικονίζουν ολόκληρο το διαμήκες τμήμα του εγγύς μηριαίου και διατομές που δείχνουν την (1) υπό ινιακή, (2) αυχενιαία και (3) τη περιοχή μηριακής διάφυσης. Σημειώνεται η διαφορά στο πάχος του φλοιώδους μεταξύ του κάτω (1) και άνω (2) μισού του αυχένα. Επίσης σημειώνεται η ανομοιόμορφη κατανόμη του σπογγώδους οστού μεταξύ του κέντρου και της περιφέρειας στην αυχενική διατομή. (σελ. 262 [15])



Εικόνα 1.5.2: Μικροακτινογραφήματα του μηριαίου οστού επίμας που απεικονίζουν ολόκληρο το διαμήκες τμήμα του εγγύς μηριαίου και διατομές που δείχνουν την (1) υπό ινιακή, (2) αυχενιαία και (3) τη περιοχή μηριακής διάφυσης. Το πάχος του φλοιώδους περιβλήματος είναι παρόμοιο καθ'όλη τη διατομή του αυχένα (1=κάτω μισό του μηριαίου αυχένα). (σελ. 262 [15])

1.6 Εφαρμογές της Εμβιομηχανικής

Τα πεδία μελέτης της Εμβιομηχανικής εκτείνονται από τους εσωτερικούς μηχανισμούς δράσης ενός κυττάρου ως την κίνηση και την ανάπτυξη των άκρων και ως τις μηχανικές ιδιότητες των μαλακών ιστών και οστών. Καθώς αποκτούμε καλύτερη κατανόηση της φυσιολογικής συμπεριφοράς των ζωντανών ιστών, οι ερευνητές είναι ικανοί να προωθήσουν το πεδίο της μηχανικής των ιστών αλλά και να αναπτύξουν βελτιωμένες θεραπείες για ένα μεγάλο φάσμα παθολογικών κατστάσεων.

Η Εμβιομηχανική επίσης εφαρμόζεται στην μελέτη του ανθρώπινου μυοσκελετικού συστήματος όπου χρησιμοποιούνται δυναμικά πατώματα για τη μελέτη των δυνάμεων αντίδρασης εδάφους και υπέρυθρη βιντεοσκόπηση για την καταγραφή των τροχιών των δεκτών που είναι συνδεδεμένοι

πάνω στο ανθρώπινο σώμα για την τριδιάστατη μελέτη της κίνησης. Η έρευνα επίσης χρησιμοποιεί ηλεκτρομυογραφία (EMG) για την μελέτη της ενεργοποίησης των μυών. Έτσι είναι δυνατή η διερεύνηση των αποκρίσεων των μυών στις εξωτερικές δυνάμεις και τις διαταραχές.

Η Εμβιομηχανική χρησιμοποιείται ευρέως στην ορθοπαιδική βιομηχανία για τον σχεδιασμό ορθοπαιδικών εμφυτευμάτων για ανθρώπινες αρθρώσεις, εξωτερικούς τρόπους στήριξης και άλλους ιατρικούς σκοπούς.

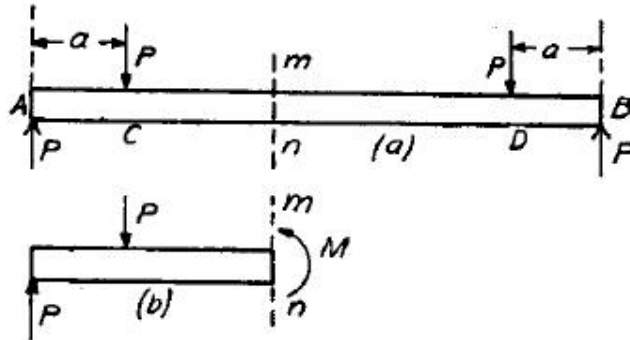
Μεγάλο εύρος εφαρμογών έχει και στον αθλητισμό, όπου οι νόμοι της μηχανικής εφαρμόζονται για την καλύτερη κατανόηση της αθλητικής επίδοσης, τη βελτίωσή της, καθώς και για τη μείωση των τραυματισμών.

Κεφάλαιο 2

*Στοιχεία Μηχανικής του Παραμορφώσιμου
Στερεού και η Θεωρία της Κάμψης [16,17]*

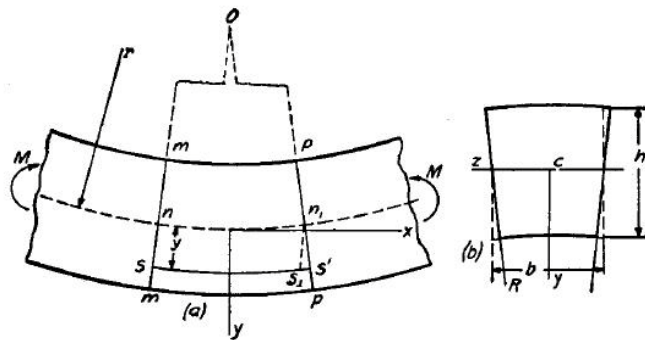
2.1 Καθαρή κάμψη συμμετρικών δοκών στην ελαστική περιοχή

Καθαρή κάμψη ονομάζεται η φόρτιση κατά την οποία δημιουργούνται δύο ίσες και αντίθετες ροπές που δρουν στο ίδιο διαμήκες επίπεδο. Σε αυτή την περίπτωση οι διατμητικές τάσεις είναι μηδενικές και μόνο οι ορθές είναι παρούσες. Ένα παράδειγμα καθαρής κάμψης είναι η κάμψη τεσσάρων σημείων (εικόνα 2.1.1).



Εικόνα 2.1.1: (α) Δοκός υπό κάμψη τεσσάρων σημείων, (β) Τομή σε τυχαίο σημείο της δοκού. (σελ. 88 [17])

Από συμμετρία οι αντιδράσεις είναι ίσες με P . Κάνοντας μια τομή mn σε ένα τυχαίο σημείο της δοκού ανάμεσα στα σημεία C και D και εξετάζοντας το αριστερό μέλος, διαπιστώνεται ότι οι εσωτερικές δυνάμεις σε αυτή τη διατομή (που οφείλονται στο δεξί μέλος) πρέπει να είναι ίσες με δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις. Για την απλή περίπτωση δοκού που έχει διάμηκες επίπεδο συμμετρίας η κάμψη θα γίνει στο επίπεδο που δρουν οι εξωτερικές ροπές. Αν η δοκός είναι ορθογώνιας διατομής (εικόνα 2.1.2) οι κάθετες γραμμές mm και pp θα μείνουν ευθείες και θα περιστρέφονται μένοντας κάθετες στις ίνες της δοκού.



Εικόνα 2.1.2: (α) Διαμήκης τομή δοκού που υπόκειται σε κάμψη, (β) Εγκάρσια τομή δοκού που υπόκειται σε κάμψη. (σελ. 89 [17])

Η παρακάτω θεωρία κάμψης βασίζεται στην υπόθεση ότι όχι μόνο οι γραμμές mm και pp παραμένουν ευθείες αλλά και ότι όλη η εγκάρσια διατομή της δοκού παραμένει επίπεδη. Κατά την διάρκεια της κάμψης οι διατομές mm και pp στρέφονται μεταξύ τους με άξονες κάθετους στο επίπεδο κάμψης έτσι ώστε η κυρτή πλευρά να υπόκειται σε εφελκυσμό και η κοίλη σε θλίψη. Η ίνα nn_1 ονομάζεται ουδέτερος άξονας. Ο ουδέτερος άξονας δεν υπόκειται σε κανενός είδους καταπόνηση. Η επιμήκυνση $s's_1$ κάθε ίνας σε απόσταση y από τον ουδέτερο άξονα βρίσκεται σχεδιάζοντας την γραμμή n_1s_1 παράλληλη στην διατομή mm . Συμβολίζοντας με r την ακτίνα καμπυλότητας και χρησιμοποιώντας την ιδιότητα όμοιων τριγώνων (τρίγωνα non_1 και s_1n_1s') η παραμόρφωση της ίνας ss' είναι:

$$\epsilon_x = \frac{s's_1}{nn_1} = \frac{y}{r}$$

Φαίνεται ότι η παραμόρφωση των ινών είναι ανάλογη της απόστασης από τον ουδέτερο άξονα και αντιστρόφως ανάλογη της ακτίνας καμπυλότητας.

Κατά τη φόρτιση το σχήμα της διατομής αλλάζει, οι δύο κάθετες πλευρές του ορθογωνίου γίνονται επικλινείς (εικόνα 2.1.2 b) και η παραμόρφωση κατά τον άξονα z της διατομής δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon_z = -\mu\varepsilon_x = -\mu\frac{y}{r}$$

όπου μ ο λόγος Poisson. Εξαιτίας αυτής της παραμόρφωσης οι ίνες της διατομής που είναι παράλληλες στον άξονα z καμπυλώνονται. Η ακτίνα καμπυλότητας τους R θα είναι μεγαλύτερη από την ακτίνα r και' αναλογία του ε_x που είναι αριθμητικά μεγαλύτερο από το ε_z . Έτσι:

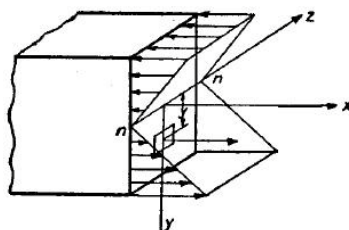
$$R = \frac{r}{\mu}$$

Επειδή το υλικό βρίσκεται στην ελαστική περιοχή, σύμφωνα με τον νόμο του Hooke ισχύει ότι:

$$\sigma_x = \varepsilon_x E = \frac{Ey}{r} \quad (2.1.1)$$

Η κατανομή των τάσεων σ_x φαίνεται στην εικόνα 2.1.3. Η τάση είναι ανάλογη της απόστασης y από την αφόρτιστη ίνα. Θεωρώντας dA μια στοιχειώδη επιφάνεια της διατομής, σε απόσταση y από τον ουδέτερο άξονα, η δύναμη που δρα στην επιφάνεια dA είναι ίση με

$$\sigma_x dA = \frac{Ey}{r} dA$$



Εικόνα 2.1.3: Κατανομή τάσεων σε εγκάρσια διατομή δοκού. (σελ. 90 [17])

Όλες οι δυνάμεις που κατανέμονται στην εγκάρσια διατομή αλληλοαναιρούνται και άρα η συνολική δύναμη είναι ίση με μηδέν.

$$\int \frac{Ey}{r} dA = \frac{E}{r} \int y dA = 0$$

Συνεπώς η στατική ροπή πρώτης τάξης είναι μηδενική και άρα ο ουδέτερος άξονας περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Η ροπή της δύναμης που δρα στο στοιχείο dA είναι $\frac{Ey}{r} y dA$. Η συνολική ροπή στην διατομή είναι:

$$\int \frac{Ey^2}{r} dA = \frac{EI_z}{r} = M \quad \Leftrightarrow \quad \frac{1}{r} = \frac{M}{EI_z} \quad (2.1.2)$$

όπου $I_z = \int y^2 dA$ είναι η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

Από την σχέση αυτή φαίνεται ότι η καμπυλότητα είναι ανάλογη της καμπτικής ροπής και αντιστρόφως ανάλογη της ποσότητας EI_z που καλείται στιβαρότητα. Απαλείφοντας το r από τις εξισώσεις (2.1.1) και (2.1.2) καταλήγουμε στην γνωστή σχέση:

$$\sigma_x = \frac{My}{I_z} \quad (2.1.3)$$

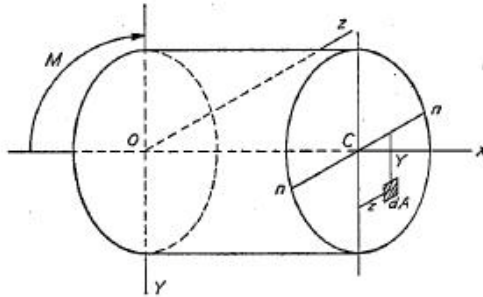
Στην εξίσωση αυτή η ροπή είναι θετική όταν τα κοίλα είναι προς τα πάνω και η απόσταση y είναι θετική κάτω από τον ουδέτερο άξονα.

Τα παραπάνω ισχύουν όχι μόνο για ορθογώνια αλλά για οποιαδήποτε διατομή που έχει ένα διαμήκες επίπεδο συμμετρίας και η οποία υπόκειται σε καθαρή κάμψη. Οι μέγιστες εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις αναπτύσσονται στις ακραίες ίνες.

2.2 Καθαρή κάμψη σε επίπεδο που δεν είναι επίπεδο συμμετρίας

Έστω τώρα ότι ο άξονας nn της εικόνας 2.2.1 είναι κάθετος στο επίπεδο xy . Η δύναμη που δρα στο στοιχειώδες εμβαδόν dA είναι $\frac{Ey}{r} dA$. Οι εξισώσεις ισοροπίας είναι:

$$\frac{E}{r} \int_A y dA = 0, \quad \frac{E}{r} \int_A y^2 dA = M, \quad \frac{E}{r} \int_A yz dA = 0$$

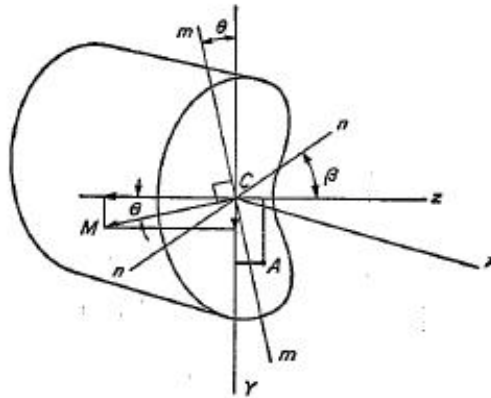


Εικόνα 2.2.1: Κυλινδρική δοκός σε κάμψη. (σελ. 227 [16])

Η πρώτη εξίσωση δηλώνει ότι ο ουδέτερος άξονας περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Η δεύτερη εξίσωση καθορίζει την καμπυλότητα και η τρίτη ότι οι y και z άξονες είναι οι κύριοι άξονες του συστήματος και συνεπώς τα επίπεδα xy και xz είναι κύρια επίπεδα. Αυτό υποδεικνύει ότι στην γενική περίπτωση καθαρής κάμψης το επίπεδο της κάμψης συμπίπτει με το επίπεδο που δρα το ζεύγος των ροπών μόνο αν το τελευταίο είναι ένα από τα κύρια επίπεδα της δοκού.

Αν το επίπεδο στο οποίο δρα το ζεύγος των ροπών δεν περνάει από έναν κύριο άξονα τότε η τρίτη εξίσωση δεν ικανοποιείται. Επομένως ο ουδέτερος άξονας δεν θα είναι κάθετος στο επίπεδο των δύο ροπών. Στην περίπτωση λοιπόν που το ζεύγος των ροπών δρα σε ένα αξονικό επίπεδο mm της δοκού (εικόνα 2.2.2) το διάνυσμα της ροπής M μπορεί να αναλυθεί σε δυο συνιστώσες που δρουν στα δύο κύρια επίπεδα. Η τάση λόγω κάμψης θα δίνεται από τη παρακάτω σχέση η οποία είναι γνωστή ως σχέση Bernoulli-Euler:

$$\sigma = \frac{M \cos \theta}{I_z} y + \frac{M \sin \theta}{I_y} z \quad (2.2.1)$$



Εικόνα 2.2.2: Ανάλυση ροπής στο επίπεδο yz του κυρίου συστήματος αναφοράς. (σελ. 229 [16])

Εξισώνοντας την τάση αυτή με το μηδέν βρίσκουμε τον ουδέτερο άξονα.

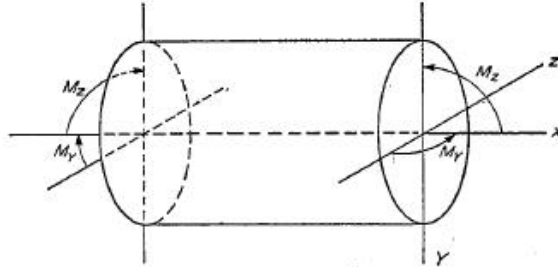
$$\frac{y \cos \theta}{I_z} + \frac{z \sin \theta}{I_y} = 0$$

$$\tan \beta = -\frac{y}{z} = \frac{I_z}{I_y} \tan \theta$$

Η εφαπτομένη β καθορίζει την κλίση του ουδέτερου άξονα και είναι γενικά διαφορετική από την γωνία θ . Οι δύο γωνίες είναι ίσες μόνο αν $\theta=0$ ή αλλιώς $I_z = I_y$.

Οι τύποι του Swain

Μερικές φορές είναι προτιμότερο να μην αναλύουμε την ροπή σε συνιστώσες αλλά να την χρησιμοποιούμε αυτούσια. Έστω λοιπόν οι ροπές M_z και M_y που δρουν σε δύο αυθαίρετα και κάθετα μεταξύ τους επίπεδα xy και xz αντίστοιχα (εικόνα 2.2.3).



Εικόνα 2.2.3: Δοκίμιο που υφίσταται διπλή κάμψη από τα ζεύγη ροπών M_z και M_y . (σελ. 230 [16])

Έστω ότι η κάμψη γίνεται στο xy επίπεδο έτσι ώστε ο ουδέτερος άξονας να είναι παράλληλος στον άξονα z . Συμβολίζοντας με r_y την ακτίνα καμπυλότητας, η καμπτική τάση θα είναι:

$$\sigma_x = \frac{E y}{r_y}$$

και οι ροπές

$$M_z = \int_A y \sigma_x dA = \frac{E I_z}{r_y}, \quad M_y = - \int_A z \sigma_x dA = - \frac{E I_{yz}}{r_y}$$

Στην περίπτωση που η κάμψη γίνεται στο επίπεδο xz τότε η τάση θα είναι:

$$\sigma_x = - \frac{E z}{r_z}$$

και οι ροπές

$$M_y = \frac{E I_y}{r_z}, \quad M_z = - \frac{E I_{yz}}{r_z}$$

Στην γενική περίπτωση που η κάμψη γίνεται και στα δύο επίπεδα τότε οι συνολικές ροπές δίνονται από το άθροισμα των επιμέρους:

$$M_y = \frac{EI_y}{r_z} - \frac{EI_{yz}}{r_y}, \quad M_z = \frac{EI_z}{r_y} - \frac{EI_{yz}}{r_z} \quad (2.2.2)$$

Αν το ζεύγος των ροπών δρα μόνο στο επίπεδο xy τότε $M_z = 0$ και άρα:

$$\frac{EI_y}{r_z} - \frac{EI_{yz}}{r_y} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{1}{r_z} = \frac{1}{r_y} \frac{I_{yz}}{I_y} \quad (2.2.3)$$

Από τις εξισώσεις (2.2.2) και (2.2.3)

$$M_z = \frac{1}{r_y} \frac{E(I_z I_y - I_{yz}^2)}{I_y}$$

$$\frac{1}{r_y} = \frac{M_z I_y}{E(I_z I_y - I_{yz}^2)}, \quad \frac{1}{r_z} = \frac{M_z I_{yz}}{E(I_z I_y - I_{yz}^2)}$$

Οι τάσεις που δημιουργούνται από το ζεύγος των ροπών M_z είναι:

$$\sigma_x = \frac{E y}{r_y} - \frac{E z}{r_z} = \frac{M_z}{I_z I_y - I_{yz}^2} (I_y y - I_{yz} z) \quad (2.2.4)$$

Και για τις M_y

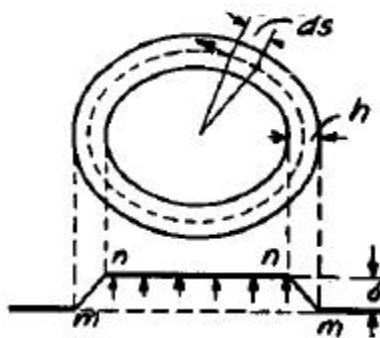
$$\sigma_x = \frac{M_y}{I_z I_y - I_{yz}^2} (I_{yz} y - I_z z) \quad (2.2.5)$$

Οι σχέσεις (2.2.4) και (2.2.5) ονομάζονται τύποι του Swain.

2.3 Στρέψη λεπτότοιχων κυλινδρικών δοκιμίων

Στην εικόνα 2.3.1 το εξωτερικό και το εσωτερικό σύνορο της διατομής δεν είναι στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο. Τα σύνορα ενώνονται μεταξύ τους μέσω της επιφάνειας mn . Αν το πάχος της διατομής είναι μικρό η καμπυλότητα της επιφάνειας μπορεί να αγνοηθεί έτσι ώστε οι γραμμές mn να θεωρούνται ευθείες. Η κλίση της είναι σταθερή και ίση με δ/h , όπου δ είναι η διαφορά των επιπέδων των δύο συνόρων και h το πάχος, το οποίο μπορεί να διαφέρει κατά μήκος της διατομής. Το επίπεδο mn υποδεικνύει την ανισότροπη κατανομή των διατμητικών τάσεων (λόγω στρέψης) στην επιφάνεια της διατομής. Οι τάσεις αυτές είναι αριθμητικά ίσες με την κλίση της επιφάνειας mn .

$$\tau = \frac{\delta}{h} \quad (2.3.1)$$



Εικόνα 2.3.1: Εγκάρσια τομή λεπτότοιχου κυλινδρικού δοκιμίου.
(σελ. 278 [17])

Επομένως η διατμητική τάση είναι αντιστρόφως ανάλογη του πάχους της διατομής.

Ο όγκος που περιέχεται ανάμεσα στις επιφάνειες mn και np υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μια κεντρική γραμμή στην διατομή που αναπαριστάται από την διακεκομμένη γραμμή

που φαίνεται στην εικόνα 2.3.1. Αν A είναι η επιφάνεια που περικλείεται από την γραμμή αυτή και το εσωτερικό (ή εξωτερικό) σύνορο τότε ο όγκος $mmnh$ είναι ίσος με $A\delta$ και άρα η συνολική στρεπτική ροπή είναι ίση με:

$$M_t = 2A\delta \quad (2.3.2)$$

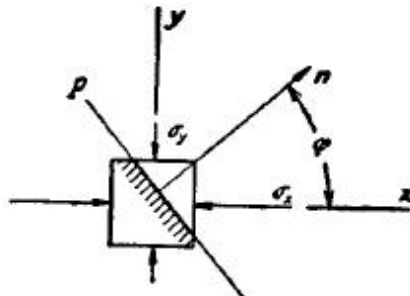
Από τις εξισώσεις (2.3.1) και (2.3.2)

$$\tau = \frac{M_t}{2Ah} \quad (2.3.3)$$

Αυτή η εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των διατμητικών τάσεων λόγω στρέψης σε κυλινδρικά δοκίμια με δακτυλιοειδή διατομή.

2.4 Στροφή συστήματος αναφοράς

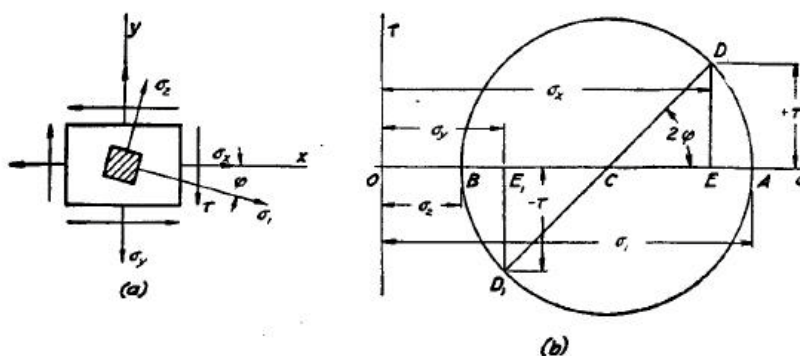
Στην εικόνα 2.4.1 οι τάσεις σ_x και σ_y , που δρουν στα κάθετα επίπεδα x και y είναι η μέγιστη και η ελάχιστη ορθή τάση αντίστοιχα.



Εικόνα 2.4.1: Στροφή συστήματος αναφοράς. (σελ. 46 [17])

Για όλα τα κεκλιμένα επίπεδα, όπως το επίπεδο pn , η τιμή της ορθής τάσης σ_n βρίσκεται μέσα σε αυτά τα όρια. Το σύστημα xy ονομάζεται κύριο σύστημα αναφοράς καθώς σε αυτούς τους άξονες δεν δρουν διατμητικές τάσεις παρά μόνο κύριες.

Αν τώρα είναι γνωστές οι τάσεις σε ένα μη κύριο σύστημα αναφοράς είναι δυνατόν να προσδιοριστεί το κύριο σύστημα στο οποίο δρα και η μέγιστη τιμή της ορθής τάσης. Ο πιο απλός τρόπος να γίνει αυτό είναι χρησιμοποιώντας τον κύκλο του Mohr. Έστω λοιπόν δοκός με ορθογώνια διατομή (εικόνα 2.4.2 a). Οι τάσεις σ_x και σ_y δεν είναι κύριες καθώς στο σύστημα xy δρουν και διατμητικές τάσεις. Για να κατασκευαστεί ο κύκλος του Mohr (εικόνα 2.4.2 b) είναι απαραίτητα τα σημεία $D(\sigma_x, \tau)$ και $D_1(\sigma_y, -\tau)$. Αυτά τα δύο σημεία αναπαριστούν τις τάσεις που δρουν στα δύο κάθετα επίπεδα xy και το μήκος DD_1 την διάμετρο του κύκλου των τάσεων. Η τομή της διαμέτρου DD_1 με τον άξονα σ είναι το κέντρο C του κύκλου. Τα σημεία τομής A, B του κύκλου με τον άξονα σ καθορίζουν την τιμή της μέγιστης και της ελάχιστης ορθής τάσης οι οποίες είναι οι κύριες τάσεις του συστήματος και συμβολίζονται με σ_1 και σ_2 .



Εικόνα 2.4.2: (a) Στροφή στο κύριο σύστημα αναφοράς, (b) Ο κύκλος του Mohr. (σελ. 47 [17])

Χρησιμοποιώντας τον κύκλο εξάγονται οι τύποι για τον υπολογισμό των σ_1 και σ_2 :

$$\sigma_1 = \overline{OA} = \overline{OC} + \overline{CD} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (2.4.1)$$

$$\sigma_2 = \overline{OB} = \overline{OC} - \overline{CD} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (2.4.2)$$

Οι τύποι αυτοί λέγονται τύποι στροφής του συστήματος. Η γωνία DCA είναι διπλάσια της γωνίας φ που σχηματίζει η κύρια τάση σ_1 με τον άξονα x (εικόνα 2.4.2 α). Επειδή η στροφή της διαμέτρου DD_1 κατά 2φ μέχρι να συναντήσει τον άξονα x έγινε δεξιόστροφα, και η στροφή του συστήματος xy (για να συναντήσει το κύριο σύστημα αξόνων) θα γίνει δεξιόστροφα. Ισχύει ότι:

$$|\tan 2\varphi| = \frac{\overline{DE}}{\overline{CE}}$$

Η γωνία φ σε αυτή την περίπτωση είναι αρνητική καθώς η στροφή του συστήματος είναι δεξιόστροφη. Άρα:

$$\tan 2\varphi = -\frac{\overline{DE}}{\overline{CE}} = -\frac{2\tau}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (2.4.3)$$

Η μέγιστη διατμητική τάση δίνεται από την ακτίνα του κύκλου και είναι:

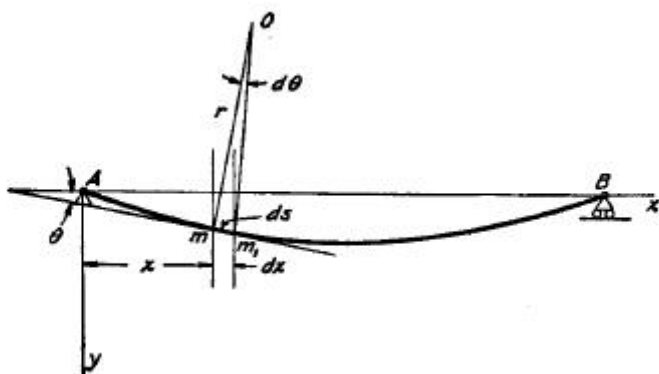
$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (2.4.4)$$

Με τις εξισώσεις (2.4.1)-(2.4.4) είναι δυνατός ο υπολογισμός των μέγιστων ορθών και διατμητικών τάσεων που δρουν σε δύο κάθετα επίπεδα.

2.5 Ελαστική γραμμή

Εκτός από τις τάσεις που δημιουργούνται από τα φορτία, μεγάλη σημασία έχουν και τα αποτελέσματα αυτών των φορτίων.

Έστω ότι η καμπύλη AmB της εικόνας 2.5.1 αναπαριστά το σχήμα της δοκού ύ μετά την κάμψη. Όλη η παρακάτω διαδικασία είναι βασισμένη στην υπόθεση ότι η βύθιση



Εικόνα 2.5.1: Σχήμα παραμορφωμένης δοκού μετά από κάμψη. (σελ. 134 [17])

(μετατόπιση προς τα κάτω) σε κάθε σημείο της δοκού

εξαρτάται μόνο από την καμπτική ροπή M σε αυτό το σημείο. Σε αυτή την περίπτωση η καμπυλότητα και η ροπή συνδέονται με την ίδια σχέση όπως στην καθαρή κάμψη (εξίσωση 2.1.2). Έστω το στοιχειώδες μήκος της δοκού mm_1 και θ η γωνία που σχηματίζει η εφαπτομένη της καμπύλης AmB με τον άξονα x . Η γωνία $d\theta$ είναι η γωνία που σχηματίζεται από τις κάθετες ευθείες στα m και m_1 . Το σημείο τομής O των ευθειών αυτών είναι το κέντρο καμπυλότητας και καθορίζει το μήκος r της ακτίνας καμπυλότητας. Ισχύει ότι:

$$ds = r d\theta \quad \Leftrightarrow \quad \frac{1}{r} = \left| \frac{d\theta}{ds} \right|$$

Θετική μεταβολή του στοιχειώδους μήκους ds προκαλεί αρνητική μεταβολή της γωνίας $d\theta$. Έτσι το σωστό πρόσημο της παραπάνω σχέσης είναι:

$$\frac{1}{r} = - \frac{d\theta}{ds} \quad (2.5.1)$$

Στην πράξη αυτή η καμπυλότητα είναι τόσο μικρή που το μήκος ds μπορεί να θεωρηθεί ευθεία. Έτσι:

$$ds \approx dx, \quad \theta \approx \tan\theta = \frac{dy}{dx} \quad (2.5.2)$$

Από (2.5.1) και (2.5.2)

$$\frac{1}{r} = -\frac{d^2y}{dx^2} \quad (2.5.3)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.1.2) και (2.5.3):

$$EI_z \frac{d^2y}{dx^2} = -M \quad (2.5.4)$$

Ολοκληρώνοντας την παραπάνω σχέση προκύπτει η βύθιση. Τα άκρα του ολοκληρώματος εξαρτώνται κάθε φορά από το πρόβλημα που μελετάται.

Κεφάλαιο 3

Πειραματική διαδικασία

3.1 Εισαγωγή

Μέσω της πρόσφατης τεχνολογικής προόδου, η διαθέσιμη μεθοδολογία έρευνας για τον χαρακτηρισμό και την αξιολόγηση του σκελετού έχει βελτιωθεί σημαντικά. Αντί να είμαστε ικανοί να εξάγουμε μόνο απλές ιδιότητες και χαρακτηριστικά των οστών –όπως η οστική πυκνότητα ή οι εξωτερικές διαστάσεις– σήμερα μπορούμε ακόμα και να εκπονήσουμε έρευνες γονιδιώματος σε προσπάθεια να ανακαλύψουμε την γενετική προέλευση της ευθραυστότητας των οστών. Παρά το γεγονός ότι τα οστά έχουν πρωταρχικά αναπτυχθεί για να επιτρέψουν την αποτελεσματική κίνηση του σώματος, και ανάλογα η δομή των οστών και η επακόλουθη δομική ακαμψία και αντοχή απεικονίζει τον τελικό φαινότυπο του σκελετού, η μελέτη της δομικής αντοχής δεν είναι ακόμα διαδεδομένη μεταξύ των ερευνητών.

Η πιο δημοφιλής μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό των εμβιομηχανικών ιδιοτήτων των μακρών οστών, και συγκεκριμένα της διάφυσης του μηριαίου οστού, είναι η κάμψη τριών σημείων. Οι λόγοι υπέρ αυτής της τεχνικής είναι το κατάλληλο μέγεθος του οστού, η καλή προσβασιμότητα κατά τη διάρκεια της χειρουργικής επέμβασης για την παραλαβή του οστού, καλά τεκμηριωμένο και επικυρωμένο πρωτόκολλο δοκιμών και εκτενής βιβλιογραφία για λόγους σύγκρισης. Για προφανείς ανατομικούς και πρακτικούς λόγους το μηριαίο οστό συνήθως τοποθετείται πάνω στην συσκευή δοκιμής στην επίπεδη οπίσθια επιφάνειά του και δοκιμάζεται στην εμπροσθοπίσθια (anteroposterior, AP) διεύθυνση.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο επιμύων που έχουν υποστεί ωθηκεκτομή για την μελέτη της οστεοπόρωσης μετά την εμμηνόπαυση. Μελετήθηκαν 88 θηλυκοί Wistar επίμυες οι οποίοι είχαν χωριστεί στις εξής έξι ομάδες:

i. Ομάδα ελέγχου χωρίς ωθηκεκτομή, η οποία αποτελείται από 12 επίμυες, όπου δεν υποβλήθηκαν σε χειρουργική ή φαρμακευτική παρέμβαση.

Οι υπόλοιπες ωθηκεκτομήθηκαν υπό γενική αναισθησία και άσηπτες συνθήκες:

- ii. Ομάδα ελέγχου με ωοθηκεκτομή**, η οποία αποτελείται από 13 επίμυες και δεν έλαβε θεραπεία,
- iii. Ομάδα A low**, η οποία αποτελείται από 15 επίμυες και έλαβε θεραπεία με εκχύλισμα *Amphimas pterocarroides* σε συγκέντρωση 50 mg/ml.
- iv. Ομάδα A high**, η οποία αποτελείται από 16 επίμυες και έλαβε θεραπεία με εκχύλισμα *Amphimas pterocarroides* σε συγκέντρωση 150 mg/ml.
- v. Ομάδα B low**, η οποία αποτελείται από 16 επίμυες και έλαβε θεραπεία με τις φαινολικές ενώσεις του κρασιού σε συγκέντρωση 50 mg/ml.
- vi. Ομάδα B high**, η οποία αποτελείται από 16 επίμυες και έλαβε θεραπεία με τις φαινολικές ενώσεις του κρασιού σε συγκέντρωση 150 mg/ml.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο προσδιορισμός χαρακτηριστικών μηχανικών και γεωμετρικών μεγεθών του μηριαίου οστού των επίμυων της κάθε ομάδας καθώς και η σύγκριση και αξιολόγηση διαφορετικών τρόπων εύρεσης της τάσης θραύσης. Η μελέτη των μηχανικών χαρακτηριστικών θα γίνεται μέσω του πειράματος της κάμψης τριών σημείων. Πλέον συγκεκριμένα μέσω της συγκεκριμένης εργασίας επιδιώκεται ο προσδιορισμός της αντοχής και της στιβαρότητας του οστίτη ιστού με τη βοήθεια της πειραματικής μέτρησης των κάτωθι μηχανικών παραμέτρων:

- α. Δύναμη θραύσης
- β. Στιβαρότητα (κλίση του διαγράμματος δύναμης-βύθισης)
- γ. Τάση θραύσεως θεωρώντας την ακριβή γεωμετρία του οστού
- δ. Απορροφούμενη ανά μονάδα όγκου ιστού ενέργεια παραμορφώσεων
- ε. Μέγιστη βύθιση (μέγιστο βέλος κάμψης) του οστού (τη στιγμή της αστοχίας)

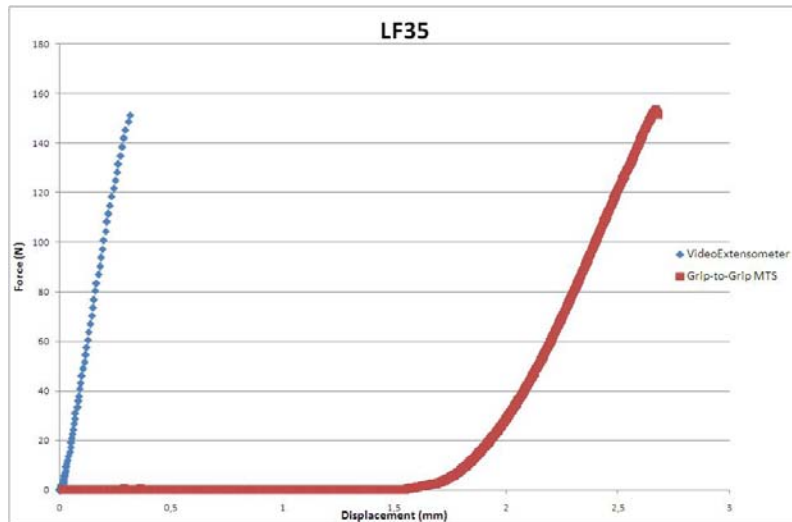
Για τον προσδιορισμό του βέλους κάμψης του οστού χρησιμοποιήθηκαν οπτικά μέσα (οπτικό μυκηνοσκόπιο με τεχνολογία Laser). Σε άλλες μελέτες ο προσδιορισμός της σχέ-

σης φορτίου-βέλους κάμψης γινόταν μέσω της μετατροπής της καμπύλης φορτίο-χρόνος για σταθερό ρυθμό φόρτισης από τη μηχανή [18] και για τον κατευθείαν προσδιορισμό της παραμόρφωσης με τη χρήση μηκυνσιομέτρων [19]. Το ίδιο το πλαίσιο φόρτισης μας δίνει πληροφορία για την μετατόπιση του εμβόλου προς τα κάτω, όμως αυτή η μετατόπιση δεν αντιστοιχεί στο πραγματικό βέλος κάμψης. Λόγοι που εισάγουν σφάλματα σε αυτή την πληροφορία είναι οι εξής:

- α. Το έμβολο δεν έρχεται σε επαφή με το οστόν από την αρχή του πειράματος
- β. Το έμβολο περιβάλλεται από ένα πλαστικό κύλινδρο ο οποίος δεν είναι ανένδοτος
- γ. Το οστόν πιθανότατα θα περιστραφεί πάνω στις αρπάγες μέχρι να πάρει την τελική του θέση λόγω της ανατομίας του.

Με τη χρήση του οπτικού μηκυνσιόμετρου εξασφαλίζουμε τον προσδιορισμό του βέλους κάμψης με μεγάλη ακρίβεια, χωρίς να αγγίζουμε το δοκίμιο. Ταυτόχρονα λαμβάνουμε και την πληροφορία της διαμέτρου του οστού στην διατομή αστοχίας, η οποία θα μας χρησιμεύσει αργότερα στην ανάλυση της ακριβούς γεωμετρίας του οστού για τον προσδιορισμό της διεύθυνσης φόρτισης.

Στις μέχρι τώρα παρόμοιες [20,21] μελέτες μηχανικών ιδιοτήτων οστών για τον προσδιορισμό της τάσης αστοχίας γίνεται η θεώρηση κυκλικής ή ελλειπτικής διατομής. Η πραγματικότητα όμως απέχει αρκετά από αυτή τη θεώρηση. Η δεύτερη φάση του εγκιβωτισμού σε ρητίνη των δοκιμίων αποσκοπεί στην μελέτη της ακριβούς γεωμετρίας της διατομής αστοχίας για τον καλύτερο προσδιορισμό των επιφανειακών ροπών δεύτερης τάξης, του εμβαδού της διατομής του οστού και της διεύθυνσης φόρτισης.



Γράφημα 3.1.1: Διαφορές στα διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης της MTS και του οπτικού μηκυσιόμετρου.

3.2 Χρησιμοποιούμενος πειραματικός εξοπλισμός της μονάδας Εμβιομηχανικής / ΕΑΥ – ΕΜΠ

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω εξοπλισμός:

- Ψηφιακή φωτογραφική μηχανή για την τεκμηρίωση των δοκιμών
- Διάταξη βιντεοσκόπησης
- Ηλεκτρομηχανικό πλαίσιο φόρτισης (MTS INSIGHT 1KN). Το συγκεκριμένο πλαίσιο είναι ειδικά σχεδιασμένο για πειράματα εμβιομηχανικής
- Διάταξη στήριξης μακρών δοκιμών (με ειδικά στρογγυλεμένες ακμές που απέχουν μεταξύ τους 20mm) για την συγκράτηση τους και την ορθή επιβολή του φορτίου
- Οπτικό μηκυσιόμετρο (RTSS_HR Video Extensometer, Limes)
- Διάταξη μέτρησης διαστάσεων
- Ηλεκτρονικός υπολογιστής με κατάλληλο λογισμικό (Testworks 4, RTSS Control & Analysis Software)

- Μηχανή λείανσης LaboPol 5 (Struers) για την λείανση των εγκιβωτισμένων σε ρητίνη δοκιμίων
- Στερεοσκόπιο LEICA MZ6

Επίσης χρησιμοποιήθηκαν και τα εξής αναλώσιμα:

- Ρητίνη Versocit-2 (Struers) και Eprofix (Struers) για τον εγκιβωτισμό των δοκιμίων
- Πλαστελίνη

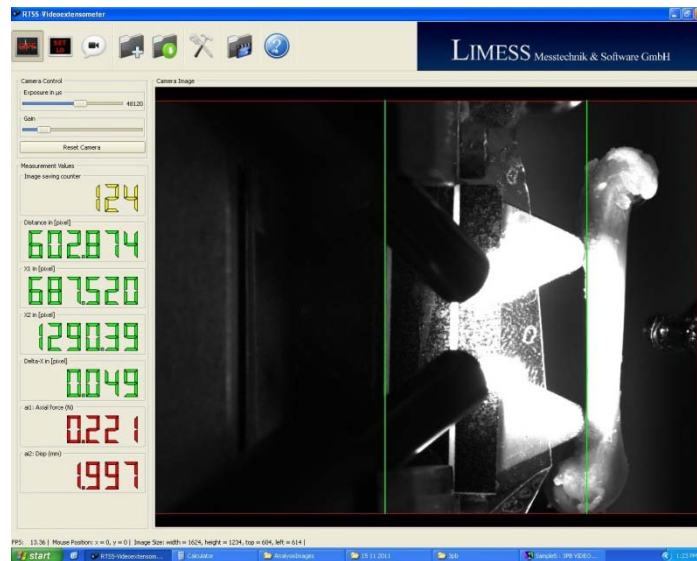
Πάνω στο ηλεκτρομηχανικό πλαίσιο φόρτισης έγινε το πείραμα της κάμψης τριών σημείων. Το πλαίσιο έχει την δυνατότητα ακριβούς καταγραφής του ασκούμενου φορτίου στο δοκίμιο κάθε χρονική στιγμή μέσω κατάλληλης εξαιρετικά ευαίσθητης δυναμοκυψελίδας (load cell) η οποία έχει ευαισθησία 0,01 N. Την πληροφορία αυτή χρησιμοποιήσαμε για τον καθορισμό του φορτίου αστοχίας.

Το οπτικό μηκυνσιόμετρο είναι μια διάταξη που επιτρέπει την μέτρηση αποστάσεων χωρίς επαφή με το δοκίμιο. Χρησιμοποιώντας δείκτες που ανιχνεύουν διαφορές στο contrast της εικόνας μπορεί και μετράει τις διαφορές στην απόσταση (εικόνα 3.2.1). Ρυθμίζοντας τις συνθήκες φωτισμού πετυχαίνουμε την καλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις.

Η πλαστελίνη χρησιμοποιήθηκε για τον όσο πιο κάθετο εγκιβωτισμό των δοκιμίων στη ρητίνη. Τα δύο είδη ρητινών που χρησιμοποιήθηκαν Versocit-2 (Struers) και Eprofix (Struers) είναι ρητίνες με χρόνο στερεοποίησης δέκα λεπτά και δώδεκα ώρες αντίστοιχα.

Το στερεοσκόπιο είναι ένα οπτικό όργανο ακριβείας που χρησιμοποιεί τη μεγέθυνση για την καλύτερη απεικόνιση των αντικειμένων και λεπτομερειών του. Η στερεοσκοπία χρησιμοποιείται για την παρατήρηση της επιφάνειας του δείγματος και υποδηλώνει την τρισδιάστατη αντίληψη των αντικειμένων, δηλαδή την αναγνώριση της πληροφορίας βάθους που υπάρχει στα πραγματικά αντικείμενα. Στο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, LEICA MZ6, η μέγιστη μεγέθυνση που μπορεί να επιτύχει είναι x64. Η μεγέθυνση που χρησιμο-

πο ήθηκε για όλα τα δοκίμια ήταν x20. Το λογισμικό λειτουργίας που χρησιμοποιήθηκε είναι το Image-Pro Plus.



Εικόνα 3.2.1: Το περιβάλλον εργασίας του προγράμματος RTSS Control & Analysis Software. Είναι εμφανείς οι δείκτες αναφοράς για την μέτρηση της απόστασης.

3.3 Πειραματόζωα

Τα πειραματόζωα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν θηλυκοί επίμνες Wistar, ηλικίας 10 μηνών οι οποίοι προέρχονται από τον ίδιο προμηθευτή. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις του Κέντρου Πειραματικής Χειρουργικής του Ιδρύματος Ιατροβιολογικής Έρευνας της Ακαδημίας Αθηνών, εξετάστηκε και εγκρίθηκε από την κτηνιατρική υπηρεσία της Νομαρχίας Αθηνών, όπως απαιτείται από τις ελληνικές νομικές απαιτήσεις για τον πειραματισμό με ζώα. Οι επίμνες συντηρήθηκαν σύμφωνα με τον οδηγό για την φροντίδα και χρήση πειραματόζωων και τις σχετικές συστάσεις της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Όλα τα ζώα στην μονάδα επι-

βλέπονταν τακτικά χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα επίβλεψης υγείας, σύμφωνα με τις συστάσεις της Ομοσπονδίας Συλλόγων Ευρωπαϊκής Επιστήμης Πειραματόζωων.

Όλοι οι κλωβοί βρίσκονταν σε δωμάτια απαλλαγμένα από παθογόνους παράγοντες σε θερμοκρασία δωματίου $24 \pm 2^\circ\text{C}$, σε σχετική υγρασία $55 \pm 10\%$, με 12ωρο κύκλο φωτισής, ένταση φωτός 300 Lux μετρημένη ένα μέτρο πάνω από το δάπεδο στην μέση του δωματίου και σε θετική πίεση 0,6 Pa. Όλοι οι επίμυες είχαν ελεύθερη πρόσβαση σε φιάλες με νερό βρύσης καθώς και σε τροφή. Οι κλίνες σε κάθε κλωβό αποτελούνταν από ~140 γραμμάρια φυτικής ουσίας (corncob bedding, Rehofix MK 2000, J. Rettenmaier & So Rosenberg, Germany). Μία φορά την εβδομάδα γίνονταν αλλαγή των κλωβών και των κρεβατιών.

3.4 Πειραματική διαδικασία

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε χωρίζεται σε δύο φάσεις, την κύρια πειραματική διαδικασία της κάμψεως τριών σημείων των οστών και τον μετέπειτα εγκιβωτισμό τους σε ρητίνη.

3.4.1 Πειραματική διαδικασία κάμψης τριών σημείων

Τα πειράματα διεξήχθησαν από 15 Νοεμβρίου 2011 έως 30 Μαρτίου 2012. Την ημέρα των πειραμάτων τα δοκίμια απόψυχονταν για μία ώρα σε θερμοκρασία δωματίου και παρέμεναν τυλιγμένα στις εμποτισμένες με φυσικό ορό γάζες τους, εκτός από την περίοδο των μετρήσεων. Κάθε ζεύγος οστών (αριστερό και δεξό του ίδιου πειραματόζωου) υποβλήθηκαν σε κάμψη την ίδια μέρα και η σειρά πειραμάτων κάθε ζευγαριού δοκιμίων καθορίστηκε από την ημερομηνία ευθανασίας του πειραματόζωου, ξεκινώντας από αυτά που θανατώθηκαν πρώτα. Τα δοκίμια ήταν αποθηκευμένα σε

κλειστά δοχεία στους -20°C , διαδικασία που έχει αποδειχθεί ότι δεν επιφέρει σημαντικές αλλοιωσεις στα μηχανικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων [22].

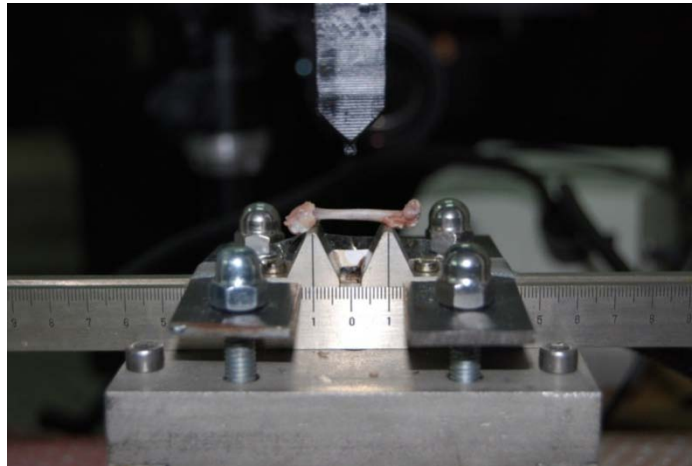
Τα δοκίμια κωδικοποιήθηκαν με αποκλειστικό κωδικό που αντιστοιχεί στο πρωτόκολλο της εμβιομηχανικής RF (right femur) για τα δεξιά μηριαία οστά και LF (left femur) για τα αριστερά μηριαία οστά και αύξοντα αριθμό που αντιστοιχεί σε κάθε πειραματόζωο.

Αφού καθαρίστηκαν από τυχόν μαλακούς ιστούς που θα αλλοίωναν την λήψη των μετρήσεων έγινε η τεκμηρίωση του κάθε δοκιμίου με φωτογράφιση της εμπρόσθιας και της οπίσθιας πλευράς καθώς και η σημείωση οποιασδήποτε αξιολογής ανατομικής παρατήρησης. Στη συνέχεια σημειώνονταν το μέσο του δοκιμίου και ακολουθούσε η τοποθέτηση στις θέσεις στήριξης του πλαισίου φόρτισης MTS INSIGHT οι οποίες απείχαν 20mm πάντα με τον ίδιο τρόπο, βάσει των ανατομικών του χαρακτηριστικών.

Έπειτα επιβλήθηκε η φόρτιση στο κέντρο της διάφυσης του οστού στο προσθιο-οπίσθιο επίπεδο μέσω της μετατόπισης του εμβόλου υπό οιονεί στατικές συνθήκες (quasi-static loading conditions) και συγκεκριμένα με ρυθμό επιβολής της μετατόπισης ίσο με 1 mm/min. Ειδικός πλαστικός κύλινδρος διαμέτρου 2 mm είχε τοποθετηθεί στο έμβολο του πλαισίου φόρτισης έτσι ώστε να ασκηθεί το φορτίο χωρίς να προκαλούνται βλάβες στο οστόν κατά την επιβολή του φορτίου. Ταυτόχρονα τέθηκε σε συγχρονισμένη λειτουργία η διάταξη μέτρησης των βελών κάμψεως μετατοπίσεων εξ απόστασεως (non-contact) μέσω του οπτικού μηκυσιομέτρου. Αλλάζοντας τις συνθήκες φωτισμού του εργαστηρίου καθώς και τις ρυθμίσεις φωτεινότητας της κάμερας του μηκυσιομέτρου πετύχαμε την βέλτιστη δυνατή μέτρηση. Το πείραμα βιντεοσκοπούνταν και ταυτόχρονα φωτογραφιζόταν. Ο ρυθμός λήψης φωτογραφιών από το μηκυσιοόμετρο ήταν 1Hz. Επειδή το δοκίμιο υπάρχει περίπτωση να αλλάξει θέση πάνω στις αρπάγες μέχρι να πάρει την τελική του θέση κατά την εφαρμογή της φόρτισης, όταν το εφαρμοζόμενο φορτίο στο δοκίμιο έφτανε τα 10 N περίπου η κάθοδος του εμβόλου διακόπτονταν και με ένα μολύβι σημειωνόταν πάνω στο δοκίμιο μια βοηθήτική στον προσδιορισμό της διεύθυνση

φόρτισης γραμμή. Έπειτα η φόρτιση συνεχιζόταν μέχρι τη θραύση του δοκιμίου, η οποία σηματοδοτεί και την ολοκλήρωση του πειράματος. Όλα τα δεδομένα του κάθε πειράματος καταγράφονταν μέσω των προγραμμάτων TestWorks 4, το οποίο ελέγχει το πλαίσιο φόρτισης και το RTSS Control & Analysis Software, το οποίο ελέγχει το οπτικό μηκυσιόμετρο.

Ακολούθησε η φωτογράφιση του σπασμένου δοκιμίου από την εμπρόσθια και την οπίσθια πλευρά, η σημείωση οποιασδήποτε αξιολογής παρατήρησης σχετικά με το δοκίμιο και τη ροή της διαδικασίας και η τοποθέτησή του ξανά στην ψύξη.



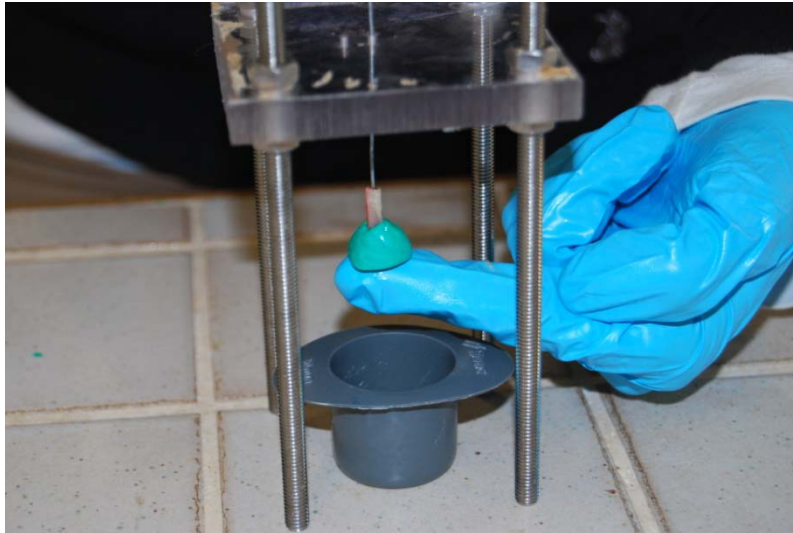
Εικόνα 3.4.1.1: Η τοποθέτηση των δοκιμίων πάνω στις αρπάγες του πλαισίου φόρτισης



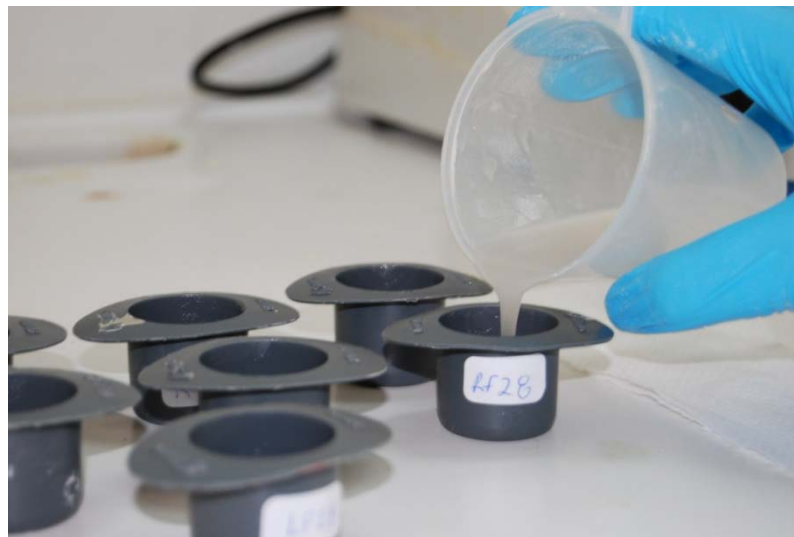
Εικόνα 3.4.1.2: Η διάταξη του οπτικού μηκυσιόμετρου και του πλαισίου φόρτισης

3.4.2 Εγκιβωτισμός δοκιμίων σε ρητίνη

Στη δεύτερη φάση του της πειραματικής διαδικασίας μελετήθηκε η ακριβής γεωμετρία και διατομή του οστού που αστόχησε κατά τη διαδικασία της κάμψης. Για αυτό τον λόγο επιλέχθηκε το ένα από τα δύο μέρη του σπασμένου οστού και συγκεκριμένα το μέρος του γόνατος. Δοκίμια που είχαν σπάσει μακριά από το σημείο φόρτισης κοντά στους κόνδυλους του γόνατος εγκιβωτίστηκαν σε ρητίνη από την μεριά του ισχίου. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν κάθετα με τη βοήθεια πλαστελίνης σε μικρά κυλινδρικά δοχεία τα οποία γεμίστηκαν με ρητίνη. Έπειτα το σύμπλοκο οστό-ρητίνη αφαιρέθηκε από τα δοχεία και λειάνθηκαν σε μηχανήμα λείανσης. Με αυτό τον τρόπο αφαιρέθηκαν οι διάφορες προεξοχές στην επιφάνεια του σπασμένου οστού για να φανεί καλά η ακριβής γεωμετρία και διατομή του. Στην διάρκεια της λείανσης προσέξαμε να φύγουμε όσο το δυνατό λιγότερο από την διατομή αστοχίας του οστού για μεγαλύτερη ακρίβεια στην εξαγωγή των τάσεων. Μετά την λείανση, με χρήση του προγράμματος Image-Pro Plus, ακολούθησε η φωτογράφιση του κάθε δοκιμίου με το στερεοσκόπιο LEICA MZ6 σημειώνοντας την ανάλογη κλίμακα του 1mm πάνω στην φωτογραφία.



Εικόνα 3.4.2.1: Τοποθέτηση του σπασμένου δοκιμίου στο δοχείο μέσω διάταξης καθετότητας.



Εικόνα 3.4.2.2: Διαδικασία γεμίσματος των δοχείων με ρητίνη.



Εικόνα 3.4.2.3: Φωτογραφία δοκιμίου εγκιβωτισμένου σε ρητίνη μετά από τη λείανση.

Κεφάλαιο 4

Επεξεργασία των μετρήσεων

4.1 Εισαγωγή

Οι περισσότερες μελέτες χρησιμοποιούν προσέγγιση κυκλικής, ελλειπτικής, δακτυλιοειδούς κυκλικής ή δακτυλιοειδούς ελλειπτικής διατομής για τον υπολογισμό της τάσης αστοχίας. Η παρούσα έρευνα είναι αφιερωμένη στην αξιολόγηση κάποιων από αυτών των μεθόδων. Η σύγκριση των τάσεων των που υπολογίστηκαν με τις προσεγγίσεις με τις τάσεις που προκύπτουν από την ακριβή προσέγγιση θα μας δείξει αν τα αποτελέσματα αυτών των προσεγγίσεων είναι ικανοποιητικά ή αν κρίνεται απαραίτητος ο εγκιβωτισμός των οστών σε ρητίνη.

4.2 Ακριβής προσέγγιση (actual section's outline)

4.2.1 Περιγραφή της διαδικασίας εύρεσης των απαραίτητων μεγεθών

Όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 3.4.2 τα θραυσμένα δοκίμια εγκιβωτίστηκαν σε ρητίνη και φωτογραφήθηκαν. Μετά την εισαγωγή της φωτογραφίας κάθε δοκιμίου στο πρόγραμμα SolidWorks ακολούθησε ο ορισμός της εξωτερικής και εσωτερικής περιμέτρου της διατομής του οστού μέσω μιας πολυωνυμικής καμπύλης και ο προσδιορισμός της αντιστοιχίας pixel-εκατοστού στην κλίμακα του SolidWorks. Έπειτα δημιουργήθηκε μια προβολή της διατομής του οστού σύμφωνα με τον προηγούμενο σχεδιασμό της εξωτερικής και εσωτερικής περιμέτρου της διατομής του οστού μέσω του οποίου προσδιορίστηκε το γεωμετρικό κέντρο της. Από την φωτογραφία ήταν εμφανές το σημαδεμένο σημείο φόρτισης οπότε το επόμενο βήμα ήταν η ένωση του κέντρου του σημείου φόρτισης με το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Για τον προσδιορισμό του άξονα φόρτισης ορίσαμε ένα

επίπεδο κάθετο στο επίπεδο της διατομής που περνάει από το κέντρο του σημείου φόρτισης και πάνω σε αυτό το επίπεδο σημειώθηκε η προβολή της εξωτερικής περιμέτρου της διατομής και το μήκος της, δηλαδή η διάμετρος που καταγράφει το οπτικό μηκυσιόμετρο. Από τις φωτογραφίες του οπτικού μηκυσιόμετρου προσδιορίστηκε η εξωτερική διάμετρος της διατομής του οστού παίρνοντας δύο μετρήσεις σε pixel της διαμέτρου δεξιά και αριστερά από το έμβολο και βρίσκοντας το μέσο όρο τους (Εικόνα 4.2.1.1). Με πολλαπλασιασμό με την αναλογία pixel-εκατοστού που αντιστοιχεί στις φωτογραφίες του οπτικού μηκυσιόμετρου βρέθηκε η εξωτερική διάμετρος του οστού σε εκατοστά. Με πολλαπλασιασμό της εξωτερικής διαμέτρου του οστού σε εκατοστά με την αναλογία pixel-εκατοστού του SolidWorks βρέθηκε η ζητούμενη διάμετρος του οστού στο SolidWorks. Στριβώντας το προαναφερθέν επίπεδο γύρω από το κέντρο του σημείου φόρτισης και κάθετα στο επίπεδο της διατομής βρέθηκε ο άξονας φόρτισης, δηλαδή η διάμετρος η οποία αντιστοιχεί στην διάμετρο από τις φωτογραφίες του οπτικού μηκυσιόμετρου. Σε όλες τις περιπτώσεις ο άξονας φόρτισης δεν περνούσε από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Στη συνέχεια ακολούθησε η παράλληλη μεταφορά του επιπέδου του άξονα φόρτισης ώστε να περνά από το γεωμετρικό κέντρο. Έπειτα μετρήθηκε και η απόσταση μεταξύ των δύο παράλληλα μετατοπισμένων επιπέδων (εκκεντρότητα), ποσότητα που θα χρειαστεί στον υπολογισμό της στρεπτικής ροπής για τον υπολογισμό των διατμητικών τάσεων. Με κέντρο το γεωμετρικό κέντρο της διατομής, άξονα των y τη διεύθυνση φόρτισης και z άξονα αυτόν που είναι κάθετος στην διατομή τοποθετήθηκε ένα σύστημα συντεταγμένων σύμφωνα με το οποίο προσδιορίστηκαν οι επιφανειακές ροπές αδρανείας δευτέρας τάξης. Με βάση τη θεωρία, εφαρμόστηκε ο τύπος στροφής σε κύριο σύστημα συντεταγμένων το οποίο τοποθετήθηκε και αυτό πάνω στη διατομή. Η εύρεση και σχεδιασμός της ουδέτερης γραμμής ακολούθησε. Με παράλληλη μεταφορά της μέχρι να συναντήσει το μακρινότερο σημείο της εξωτερικής διαμέτρου του οστού (το οποίο κινδυνεύει περισσότερο να αστοχήσει) βρέθηκαν οι συντε-

ταγμένες του κρίσιμου σημείου αστοχίας ως προς το κύριο σύστημα συντεταγμένων.



Εικόνα 4.2.1.1: Φωτογραφία από το οπτικό μηκυνσιόμετρο όπου σημειώνονται οι διάμετροι του οστού δεξιά και αριστερά του εμβόλου. Η διάμετρος που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της διεύθυνσης φόρτισης αντιστοιχεί στο μέσο όρο τους.

4.2.2 Υπολογισμός γωνίας στροφής κύριου συστήματος και εξίσωσης ουδέτερης γραμμής

Η εξίσωση που δίνει την γωνία στροφής για εύρεση του κύριου συστήματος συντεταγμένων είναι η ακόλουθη

$$\tan 2\omega_p = \frac{2I_{xy}}{I_{yy} - I_{xx}}$$

όπου I_{xx} και I_{yy} οι ροπές αδρανείας δευτέρας τάξης ως προς το αρχικό σύστημα αναφοράς. Λύνοντας ως προς ω_p βρίσκουμε τη γωνία στροφής. Το πρόσημο στην γωνία στροφής υποδεικνύει την φορά στροφής. Θετικό πρόσημο σημαίνει φορά αριστερόστροφη και αρνητικό πρόσημο φορά δεξιόστροφη. Η εικόνα (4.2.2.1) δείχνει ένα δοκίμιο με θετική γωνία στροφής.

Σε αυτή την περίπτωση η εξίσωση ουδέτερης γραμμής προκύπτει ως εξής. Αρχικά γίνεται η ανάλυση του φορτίου P στις συνιστώσες P_y και P_x πάνω στους άξονες του κύριου συστήματος,

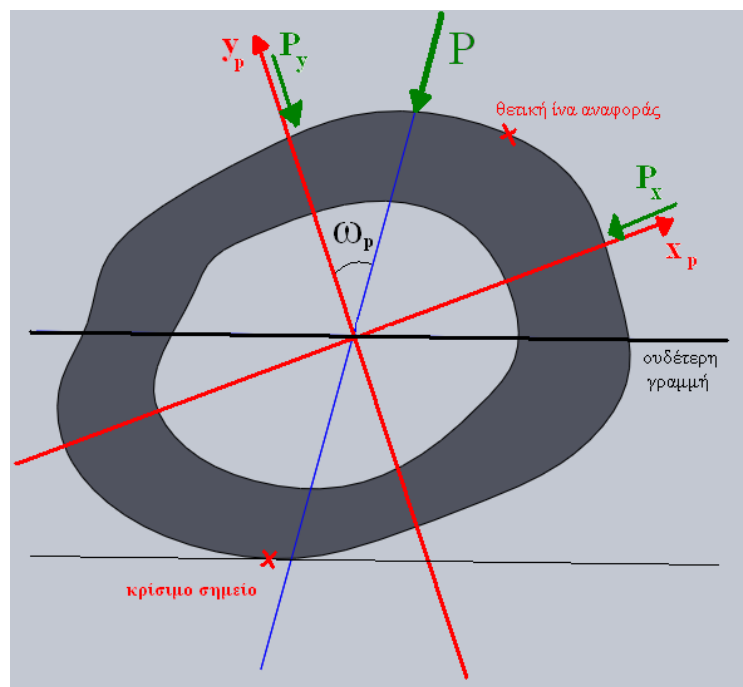
$$P_y = P \cos \omega_p$$

$$P_x = P \sin \omega_p$$

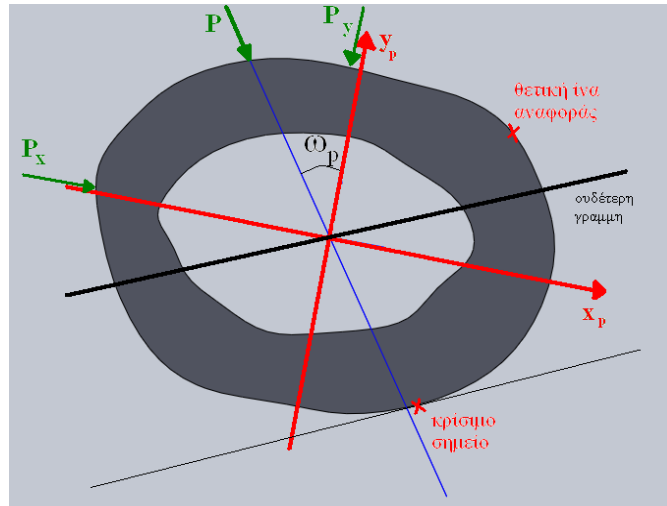
Οι κύριες τάσεις του συστήματος δίνονται από τον παρακάτω τύπο:

$$\sigma_{zz} = -\frac{P \cos\left|\omega_p\right|\frac{L}{4}}{I_{x_p x_p}} y - \frac{P \sin\left|\omega_p\right|\frac{L}{4}}{I_{y_p y_p}} x = 0 \quad (4.2.2.1)$$

όπου L το μήκος μεταξύ των δύο αρπαγών και $I_{x_p x_p}$, $I_{y_p y_p}$ οι κύριες επιφανειακές ροπές αδρανείας δευτέρας τάξης και x και y οι συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου ως προς το κύριο σύστημα αναφοράς. Τα δύο μείον στον τύπο προκύπτουν καθώς και οι δύο συνιστώσες P_y και P_x θλίβουν την θετική ίνα αναφοράς.



Εικόνα 4.2.2.1: Φωτογραφία από το SolidWorks με σημειωμένο τον άξονα φόρτισης, το κύριο σύστημα συντεταγμένων, τη γωνία στρώσης που στη συγκεκριμένη περίπτωση δηλώνει αριστερόστροφη στρώση, την συδέτερη γραμμή και το κρίσιμο σημείο αστοχίας.



Εικόνα 4.2.2.2: Φωτογραφία από το SolidWorks με σημειωμένο τον άξονα φόρτισης, το κύριο σύστημα συντεταγμένων, τη γωνία στροφής που στη συγκεκριμένη περίπτωση δηλώνει δεξιόστροφη στροφή, την ουδέτερη γραμμή και το κρίσιμο σημείο αστοχίας.

Η εξίσωση της ουδέτερης γραμμής προκύπτει από το μηδενισμό της σχέσης (4.2.2.1).

Λύνοντας την εξίσωση προκύπτει ότι:

$$y = Cx, \quad C = -\frac{I_{x_p x_p}}{I_{y_p y_p}} \tan \omega_p$$

Βλέπουμε λοιπόν ότι στην περίπτωση θετικής γωνίας στροφής ο συντελεστής της ουδέτερης γραμμής έχει αρνητικό πρόσημο.

Στην περίπτωση όμως όπου η γωνία στροφής είναι αρνητική (εικόνα 4.2.2.2), ο τύπος υπολογισμού των κύριων τάσεων είναι:

$$\sigma_{zz} = -\frac{P \cos|\omega_p| \frac{L}{4}}{I_{x_p x_p}} y + \frac{P \sin|\omega_p| \frac{L}{4}}{I_{y_p y_p}} x = 0 \quad (4.2.2.2)$$

Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι ο συντελεστής της ουδέτερης γραμμής είναι θετικός.

$$y = Cx \quad C = \frac{I_{x_p x_p}}{I_{y_p y_p}} \tan|\omega_p|$$

4.2.3 Υπολογισμός τάσεων με την ακριβή προσέγγιση

Η τάση λόγω κάμψης υπολογίστηκε με την παρακάτω σχέση

$$\sigma_{zz} = \frac{P \cos|\omega_p| \frac{L}{4}}{I_{x_p x_p}} y + \frac{P \sin|\omega_p| \frac{L}{4}}{I_{y_p y_p}} x \quad (4.2.3.1)$$

όπου P το μέγιστο φορτίο, ω_p η γωνία στροφής, L η απόσταση ανάμεσα στις δύο αρπάγες, (x,y) οι συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου ως προς το κύριο σύστημα συντεταγμένων και $I_{x_p x_p}$, $I_{y_p y_p}$ οι επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης ως προς το κύριο σύστημα συντεταγμένων.

Η διαμητική τάση υπολογίστηκε με την παρακάτω σχέση

$$\tau = \frac{M_t}{2Ah} \quad (4.2.3.2)$$

Όπου M_t η στρεπτική ροπή, A το εμβαδόν της διατομής και h το πάχος των ομόκεντρων κύκλων από την προσέγγιση ελαχίστων τετραγώνων. Έπειτα προσθέτοντας κατά Mises

την τάση λόγω κάμψης και την διατμητική λαμβάνουμε την ισοδύναμη τάση

$$\sigma^{eq} = \sqrt{\sigma_{zz}^2 + 3\tau^2}$$

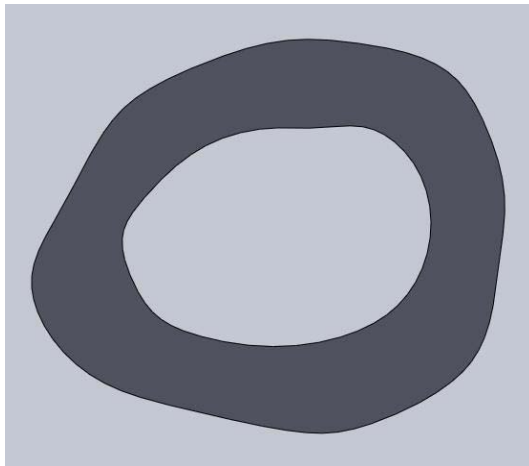
4.3 Προσέγγιση ομόκεντρων κύκλων με χρήση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων (circular ring of average thickness)

Χρησιμοποιώντας την εικόνα της διατομής από το στερεοσκόπιο σημειώθηκαν κάποια ομοιόμορφα κατανεμημένα σημεία στην εσωτερική και εξωτερική περίμετρο του οστού. Αυτά τα σημεία εισήχθησαν στο MATLAB και με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων σχεδιάστηκαν οι καλύτεροι ομόκεντροι κύκλοι.

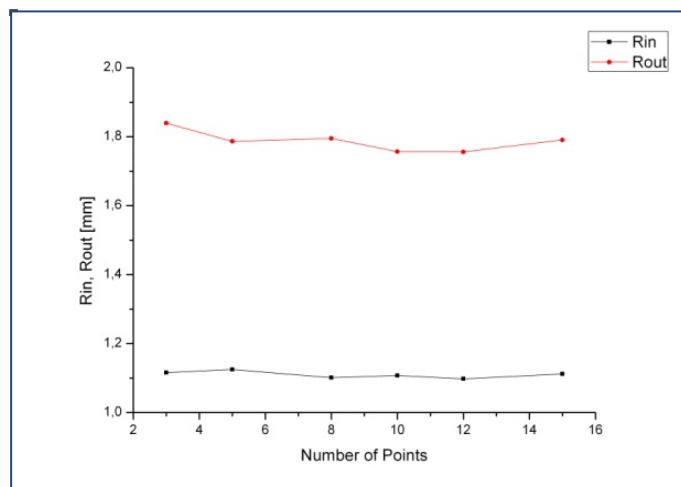
Ο αριθμός των σημείων που πρέπει να εισαχθούν στο πρόγραμμα ώστε να σχεδιαστούν οι δυνατοί καλύτεροι κύκλοι αποφασίστηκε βάσει ενός τυχαίου δοκιμίου (εικόνα 4.3.1) του οποίου η διατομή απέχει πολύ από την κυκλική. Στο διάγραμμα της εικόνας (4.3.2) παρουσιάζονται οι τιμές για την εξωτερική και εσωτερική ακτίνα για 3, 5, 8, 10, 12 και 15 ομοιόμορφα κατανεμημένα σημεία. Οι διαφορές δεν ήταν σημαντικές ωστόσο σε κάθε δοκίμιο χρησιμοποιήθηκαν 15-20 σημεία από την εσωτερική περίμετρο και 20-30 από την εξωτερική.

Η τάση υπολογίστηκε από τον τύπο του Bernoulli:

$$\sigma_{zz} = \frac{M^b}{I_p} R_{out}$$
$$I_p = \frac{\pi}{4} (R_{out}^2 - R_{in}^2)$$



Εικόνα 4.3.1: Διατομή μηριαίου οστού ελίμνα στο σημείο αστοχίας



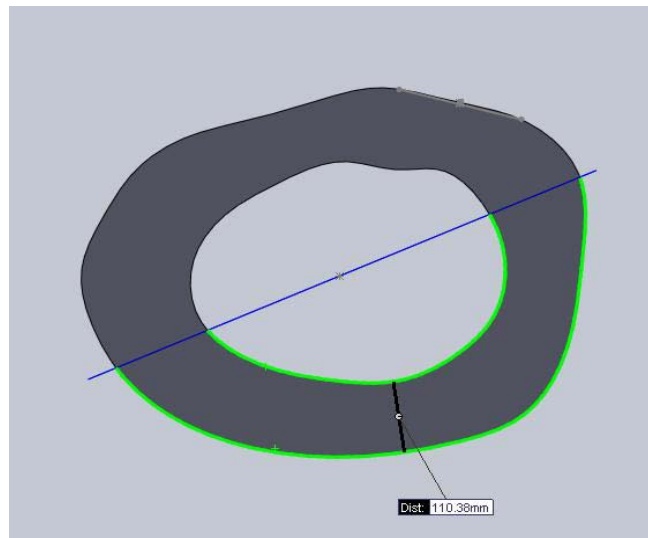
Εικόνα 4.3.2 : Διάγραμμα εξάρτησης της εσωτερικής και εξωτερικής περιμέτρου από τον αριθμό των σημείων των κύκλων.

4.4 Προσέγγιση δακτυλιοειδής διατομής ελαχίστου πάχους (circular ring of minimum thickness)

Αυτή η προσέγγιση θεωρεί πάλι δύο ομόκεντρους κύκλους, ο εξωτερικός με ακτίνα που μετρήθηκε από το οπτικό μηκυσιόμετρο λίγο πριν την θραύση του οστού και ο εσωτερικός με ακτίνα η οποία προέκυψε από την αφαίρεση του ελαχίστου πάχους του κάθε οστού από την εξωτερική ακτίνα.

Το ελάχιστο πάχος βρέθηκε με την βοήθεια του Solid-Works. Αφού είχε ολοκληρωθεί η επεξεργασία της ακριβούς προσέγγισης, ως ελάχιστο πάχος μετρήθηκε αυτό το οποίο ανήκε στην εφελκόμενη περιοχή της διατομής του οστού δηλαδή κάτω από τον ουδέτερο άξονα. Σε μερικά δοκίμια το ελάχιστο πάχος της διατομής εμφανιζόταν πάνω από τον ουδέτερο άξονα, στη θλιβόμενη περιοχή της διατομής. Όμως αυτή που τελικά μετρήθηκε επιλέχτηκε με το σκεπτικό ότι η εφελκόμενη περιοχή της διατομής κινδυνεύει περισσότερο.

Οι τάσεις και με αυτή την προσέγγιση υπολογίστηκαν με τον τύπο του Bernoulli.



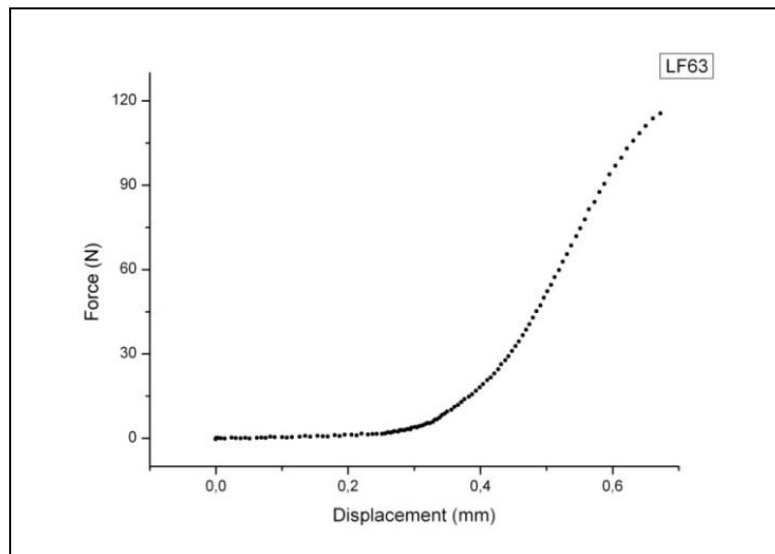
Εικόνα 4.4.1: Διατομή οστού στην οποία φαίνεται το ελάχιστο πάχος στην εφελκόμενη περιοχή κάτω από τον ουδέτερο άξονα (μπλε γραμμή)

Κεφάλαιο 5

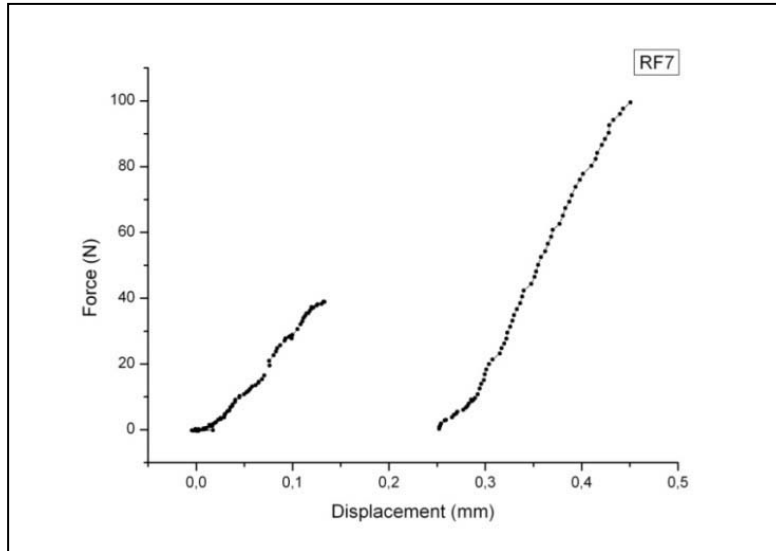
Αποτελέσματα

5.1 Γραφικές παραστάσεις και πρωτογενή δεδομένα

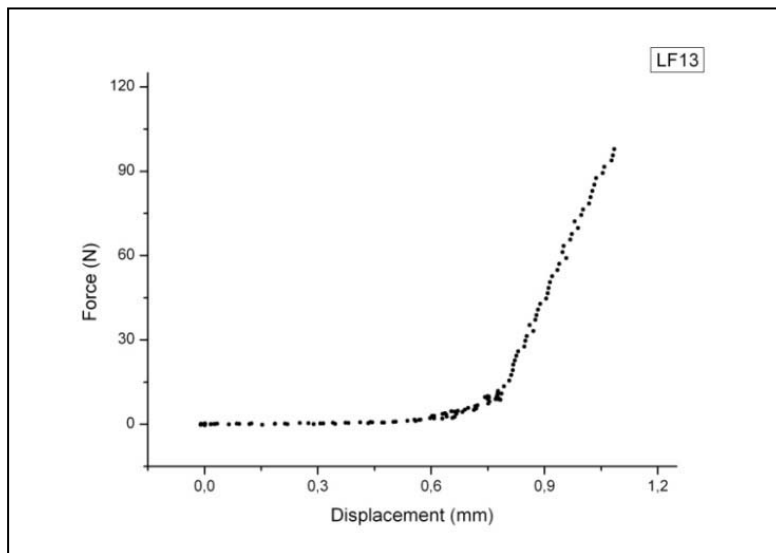
Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων κάμψης οι μετρήσεις της δύναμης και της μετατόπισης καταγράφηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα Origin Pro. Στη συνέχεια ακολούθησε η ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων και η απεικόνισή τους σε γραφικές παραστάσεις. Ακολουθούν κάποιες ενδεικτικές γραφικές παραστάσεις, δύο από κάθε ομάδα (οι γραφικές παραστάσεις όλων των δοκιμών παρουσιάζονται αναλυτικά στον δεύτερο τόμο).



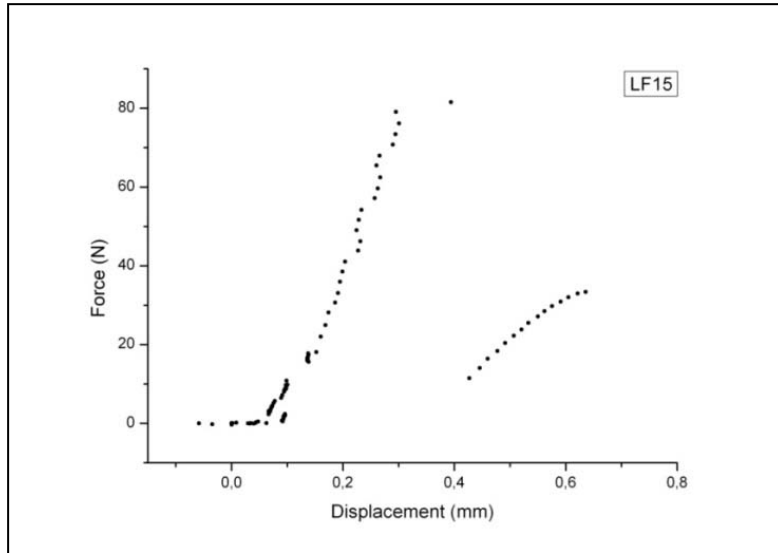
Γράφημα 5.1.1: Τυπική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης για δοκίμιο της ομάδας A Low.



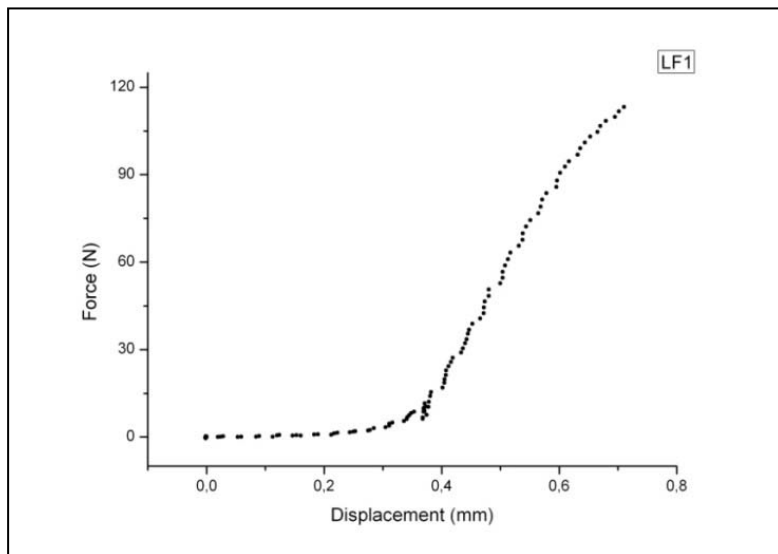
Γράφημα 5.1.2: Γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης για δοκίμιο της ομάδας A Low. Το δοκίμιο έκανε μια περιστροφή και συνέχισε να παραλαμβάνει φορτίο.



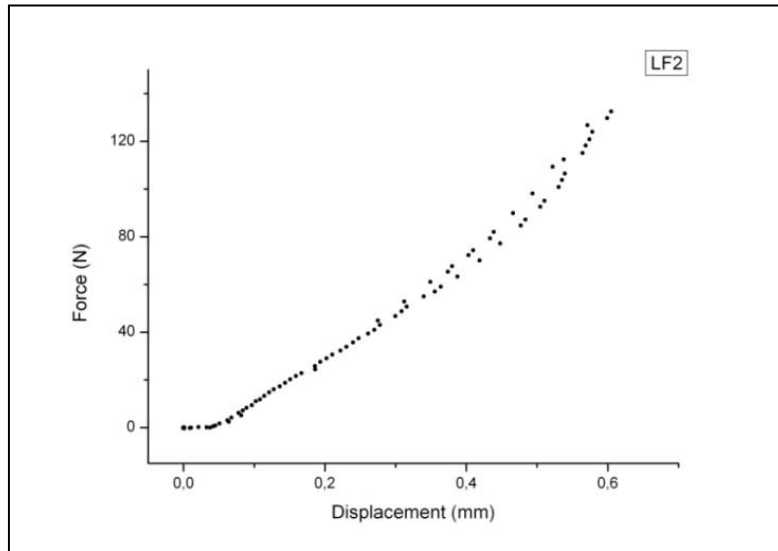
Γράφημα 5.1.3: Τυπική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης για δοκίμιο της ομάδας A High.



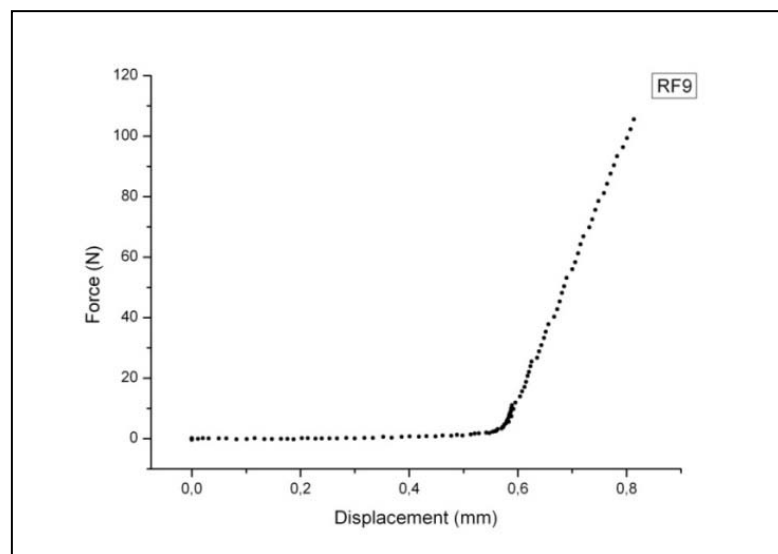
Γράφημα 5.1.4: Γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης για δοκίμιο της ομάδας A High. Το δοκίμιο ρηγματώθηκε όμως συνέχισε να παραλαμβάνει φορτίο.



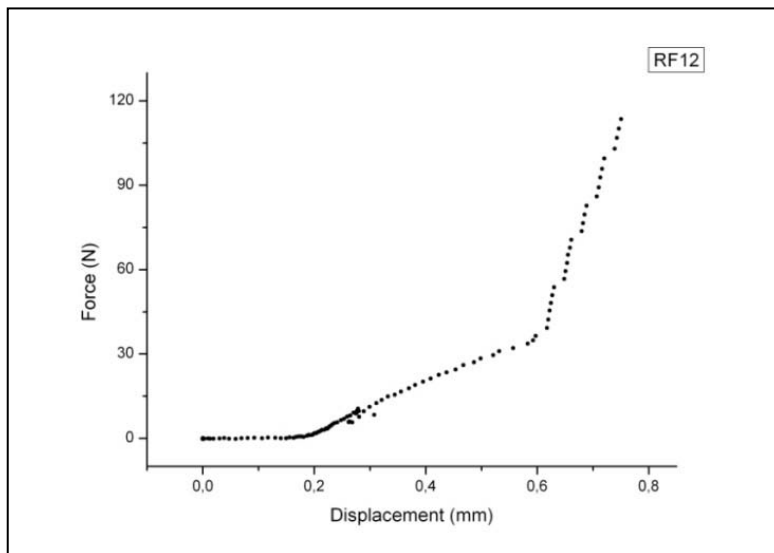
Γράφημα 5.1.5: Τυπική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης για δοκίμιο της ομάδας B Low.



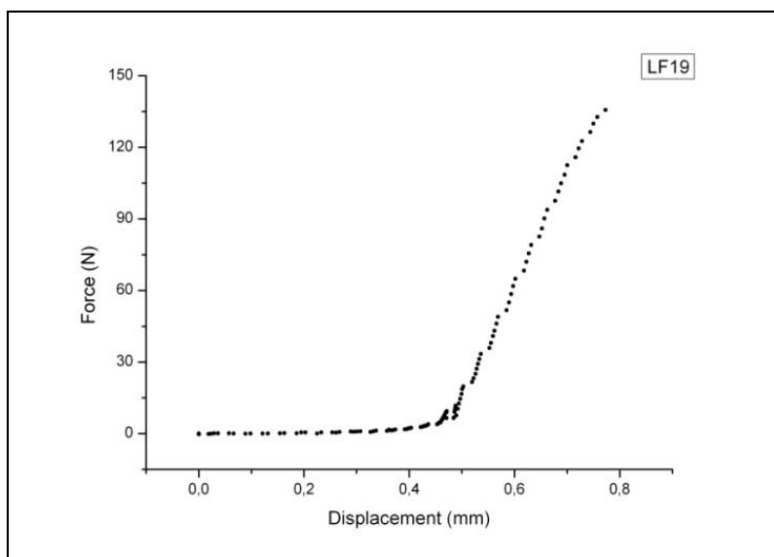
Γράφημα 5.1.6: Γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης για δοκίμιο της ομάδας B Low. Είναι εμφανής η διασπορά στις μετρήσεις της μετατόπισης λόγω διακόμανσης της μετρητικής γραμμής.



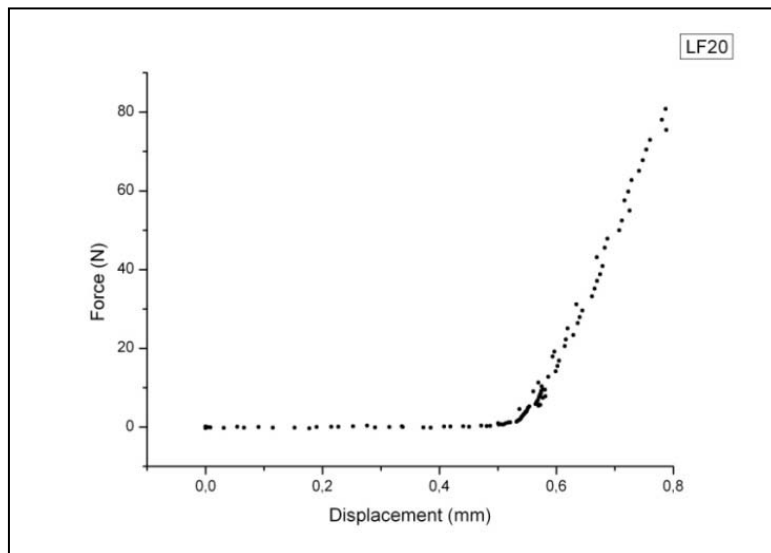
Γράφημα 5.1.7: Τυπική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης για δοκίμιο της ομάδας B High.



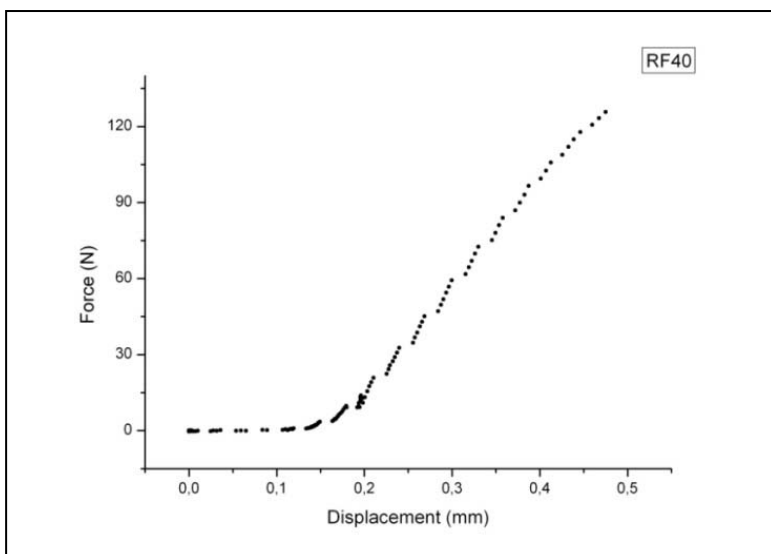
Γράφημα 5.1.8: Γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης για δοκίμιο της ομάδας B High. Παρατηρείται μια αλλαγή στην κλίση.



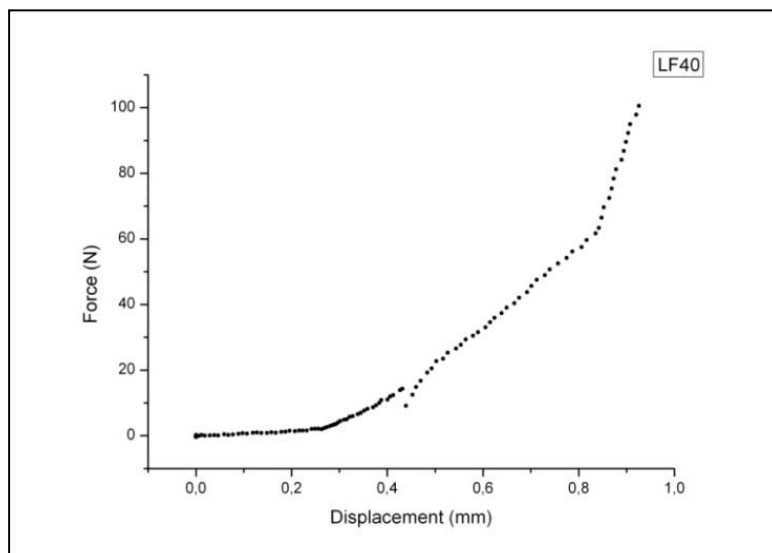
Γράφημα 5.1.9: Τυπική γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης για δοκίμιο της ομάδας Control OVX.



Γράφημα 5.1.10: Γραφική παράσταση φορτίου–μετατόπισης για δοκίμιο της ομάδας Control OVX. Είναι εμφανής η διασπορά στις μετρήσεις της μετατόπισης λόγω διακύμανσης της μετρητικής γραμμής.



Γράφημα 5.1.11: Τυπική γραφική παράσταση φορτίου–μετατόπισης για δοκίμιο της ομάδας Control no OVX.



Γράφημα 5.1.12: Γραφική παράσταση φορτίου-μετατόπισης για δοκίμιο της ομάδας Control no OVX. Παρατηρείται μια αλλαγή στην κλίση.

Μέσω των γραφικών παραστάσεων δύναμης-μετατόπισης υπολογίστηκαν η δαπανηθείσα ενέργεια, η δυσκαμψία και η μέγιστη βύθιση των δοκιμίων. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 5.1.1: Μέγιστη δύναμη, δαπανηθείσα ενέργεια, δυσκαμψία και μέγιστη βύθιση για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας A Low.

A Low Left					
Αριθμός Δοκιμίου	Μέγιστη δύναμη (N)	Ενέργεια (mJ)	Στιβαρότητα (N/mm)	Μέγιστη βύθιση (mm)	
LF	5	140,8	23,1	453,7	0,30
	6	113,9	16,5	392,8	0,28
	7	124,6	31,4	194,0	0,58
	8	116,4	17,4	306,1	0,34
	22	102,6	19,0	224,3	0,42
	23	125,3	15,5	524,2	0,24
	24	126,5	20,0	461,4	0,28
	43	121,1	16,2	438,7	0,28
	44	120,6	17,7	429,7	0,28
	45	140,2	26,6	418,8	0,28
	63	117,1	19,7	403,3	0,30
	65	140,7	25,8	465,6	0,34
	66	105,2	16,0	344,7	0,30

Πίνακας 5.1.2: Μέγιστη δύναμη, δαπανηθείσα ενέργεια, δυσκαμψία και μέγιστη βύθιση για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας A High.

A High Left					
Αριθμός Δοκιμίου	Μέγιστη δύναμη (N)	Ενέργεια (mJ)	Στιβαρότητα (N/mm)	Μέγιστη βύθιση (mm)	
LF	13	100,3	17,8	295,5	0,34
	14	108,1	14,0	418,2	0,25
	15	83,3	15,5	374,6	0,22
	16	110,6	29,4	133,4	0,66
	25	115,7	12,4	495,0	0,22
	26	101,2	10,6	420,3	0,22
	27	135,5	16,5	550,9	0,24
	28	92,3	11,4	338,3	0,26
	46	95,1	13,7	330,2	0,28
	47	114,8	24,2	288,4	0,41
	49	101,0	14,9	328,1	0,30
	50	93,0	18,1	176,5	0,45
	67	103,7	14,2	366,1	0,28
	68	117,2	22,1	330,7	0,36
	69	121,8	17,7	371,8	0,31

Πίνακας 5.1.3: Μέγιστη δύναμη, δαπανηθείσα ενέργεια, δυσκαμψία και μέγιστη βύθιση για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας B Low.

B Low Left					
Αριθμός Δοκιμίου	Μέγιστη δύναμη (N)	Ενέργεια (mJ)	Στιβαρότητα (N/mm)	Μέγιστη βύθιση (mm)	
LF	1	114,9	23,4	330,5	0,36
	3	89,3	8,2	330,5	0,17
	4	110,2	16,2	448,9	0,23
	30	138,6	20,1	558,9	0,24
	32	129,7	21,2	415,6	0,31
	56	132,2	19	433,6	0,29
	57	120,0	14,8	437,3	0,25
	58	116,5	18,7	394,2	0,31
	71	98,1	15,8	268,9	0,34
	72	81,9	8,4	346,7	0,21
	73	102,6	14,3	350,5	0,28

Πίνακας 5.1.4: Μέγιστη δύναμη, δαπανηθείσα ενέργεια, δυσκαμψία και μέγιστη βύθιση για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας B High.

B High Left					
Αριθμός Δοκιμίου	Μέγιστη δύναμη (N)	Ενέργεια (mJ)	Στιβαρότητα (N/mm)	Μέγιστη βύθιση (mm)	
LF	9	112,7	16,5	475,8	0,24
	10	108,6	14,9	382,2	0,27
	11	138,8	16,8	549,7	0,25
	12	124,6	17,5	443,6	0,28
	33	132,3	27,3	194,2	0,54
	34	112,2	28,3	166,8	0,59
	36	116,7	29	320,0	0,37
	59	110,7	19,2	366,0	0,33
	60	90,2	11,3	367,5	0,23
	61	94,3	12,3	337,5	0,27
	62	123,2	17,3	448,9	0,28
	75	91,4	-	343,9	0,24
	76	96,4	12,2	375,2	0,26
	77	109,7	14,9	417,3	0,26
	78	104,3	14,9	307,3	0,31

Πίνακας 5.1.5: Μέγιστη δύναμη, δαπανηθείσα ενέργεια, δυσκαμψία και μέγιστη βύθιση για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας Control no OVX.

Control no OVX Left				
Αριθμός Δοκιμίου	Μέγιστη δύναμη (N)	Ενέργεια (mJ)	Στιβαρότητα (N/mm)	Μέγιστη βύθιση (mm)
37	120,2	-	-	-
38	109,6	15,6	392,5	0,27
40	104,1	23,8	443,4	0,25
51	108,5	14,4	320,4	0,30
52	112,8	17,0	303,0	0,34
LF 53	128,8	13,6	533,7	0,23
54	127,8	14,7	433,1	0,25
87	105,6	13,7	339,8	0,28
88	115,7	15,0	378,5	0,28
89	89,5	9,5	302,3	0,26
90	96,2	9,4	418,6	0,21

Πίνακας 5.1.6: Μέγιστη δύναμη, δαπανηθείσα ενέργεια, δυσκαμψία και μέγιστη βύθιση για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας Control OVX.

Control OVX Left				
Αριθμός Δοκιμίου	Μέγιστη δύναμη (N)	Ενέργεια (mJ)	Στιβαρότητα (N/mm)	Μέγιστη βύθιση (mm)
17	119,5	25,5	317,9	0,37
18	120,3	17,8	487,6	0,25
19	139,0	22,2	460,8	0,31
20	83,9	9,5	324,0	0,24
42	106,2	19,1	298,2	0,34
79	109,7	22,9	231,6	0,43
LF 80	94,2	12,1	328,8	0,26
81	103,5	11,5	392,4	0,24
82	95,9	14,7	391,1	0,24
83	93,9	15,9	264,7	0,37
84	107,0	15,4	384,2	0,32
85	95,5	14,3	274,1	0,42
86	83,1	13,1	219,5	0,35

Πίνακας 5.1.7: Μέγιστη δύναμη, δαπανηθείσα ενέργεια, δυσκαμψία και μέγιστη βύθιση για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας A Low.

A Low Right					
Αριθμός Δοκιμίου	Μέγιστη δύναμη (N)	Ενέργεια (mJ)	Στιβαρότητα (N/mm)	Μέγιστη βύθιση (mm)	
RF	5	89,8	10,7	434,9	0,2
	6	128,8	27,3	457,8	0,27
	7	143,5	9,5	580,5	0,18
	8	153,1	23,2	506,0	0,30
	22	100,9	18,7	261,6	0,38
	23	131,3	25,2	234,7	0,46
	24	96,5	12,6	348,6	0,27
	43	116,0	16,0	355,7	0,30
	44	120,2	19,7	401,7	0,3
	45	114,8	19,4	421,8	0,28
	63	119,6	17,0	430,0	0,28
	65	148,3	24,3	502,6	0,31
	66	115,0	18,4	376,3	0,31

Πίνακας 5.1.8: Μέγιστη δύναμη, δαπανηθείσα ενέργεια, δυσκαμψία και μέγιστη βύθιση για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας A High.

A High Right					
Αριθμός Δοκιμίου	Μέγιστη δύναμη (N)	Ενέργεια (mJ)	Στιβαρότητα (N/mm)	Μέγιστη βύθιση (mm)	
RF	13	103,1	15,3	310,3	0,31
	14	103,4	18,0	304,0	0,31
	15	97,8	14,5	430,7	0,26
	16	108,0	18,0	275,4	0,35
	25	121,4	18,4	348,1	0,30
	26	118,3	15,7	426,0	0,27
	27	86,5	11,6	276,6	0,29
	28	126,0	16,1	488,0	0,29
	46	115,3	20,1	341,9	0,35
	47	100,0	13,4	360,1	0,26
	49	110,6	19,4	274,1	0,37
	50	90,1	12,1	328,4	0,28
	67	122,8	16,4	462,9	0,26
	68	85,1	11,5	312,8	0,27
	69	110,2	15,2	395,1	0,28
	70	106,9	12,7	482,5	0,24

Πίνακας 5.1.9: Μέγιστη δύναμη, δαπανηθείσα ενέργεια, δυσκαμψία και μέγιστη βύθιση για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας B Low.

B Low Right				
Αριθμός Δοκίμιου	Μέγιστη δύναμη (N)	Ενέργεια (mJ)	Στιβαρότητα (N/mm)	Μέγιστη βύθιση (mm)
1	120,6	18,8	435,8	0,29
3	114,4	28,3	100,8	0,47
4	124,2	21,6	431,0	0,30
30	141,1	18,7	534,6	0,26
32	89,4	13,1	234,8	0,32
RF 56	155,5	34,7	420,2	0,41
57	108,7	14,0	386,3	0,27
58	109,7	19,9	326,3	0,35
71	113,4	15,5	463,2	0,26
72	105,8	16,1	381,0	0,29
73	110,7	15,0	422,3	0,27

Πίνακας 5.1.10: Μέγιστη δύναμη, δαπανηθείσα ενέργεια, δυσκαμψία και μέγιστη βύθιση για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας B High.

B High Right				
Αριθμός Δοκίμιου	Μέγιστη δύναμη (N)	Ενέργεια (mJ)	Στιβαρότητα (N/mm)	Μέγιστη βύθιση (mm)
9	110,3	13,1	430,2	0,24
10	125,9	21,5	485,3	0,27
11	149,0	28,1	446,3	0,35
12	119,0	18,9	513,6	0,51
33	106,7	16,8	304,2	0,32
34	51,1	9,0	166,3	0,3
36	115,5	30,0	263,3	0,48
RF 59	127,9	20,0	444,0	0,31
60	110,6	14,6	453,7	0,26
61	102,3	16,4	340,5	0,31
62	123,2	22,2	380,3	0,35
75	89,0	10,8	343,7	0,26
76	93,1	14,5	290,3	0,32
77	103,20	15,7	318,64	0,32
78	93,73	11,6	370,68	0,25

Πίνακας 5.1.11: Μέγιστη δύναμη, δαπανηθείσα ενέργεια, δυσκαμψία και μέγιστη βύθιση για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας Control no OVX.

Control no OVX Right				
Αριθμός Δοκιμίου	Μέγιστη δύναμη (N)	Ενέργεια (mJ)	Στιβαρότητα (N/mm)	Μέγιστη βύθιση (mm)
37	97,2	-	-	-
38	88,9	10,2	297,7	0,25
40	127,9	20,3	417,3	0,32
51	130,6	23,3	443,7	0,29
52	134,0	22,2	452,8	0,31
RF 53	122,9	16,3	432,5	0,28
54	116,9	17,5	444,8	0,28
87	112,9	14,1	420,8	0,26
88	115,0	15,8	327,5	0,31
89	98,3	10,0	467,7	0,21
90	113,4	12,8	458,5	0,23

Πίνακας 5.1.12: Μέγιστη δύναμη, δαπανηθείσα ενέργεια, δυσκαμψία και μέγιστη βύθιση για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας Control OVX.

Control OVX Right				
Αριθμός Δοκιμίου	Μέγιστη δύναμη (N)	Ενέργεια (mJ)	Στιβαρότητα (N/mm)	Μέγιστη βύθιση (mm)
17	132,5	21,9	426,1	0,32
18	117,1	13,3	463,3	0,24
19	124,4	14,2	485,8	0,24
20	79,4	8,9	318,4	0,24
42	104,1	16,1	326,2	0,33
79	91,5	13,6	303,0	0,29
RF 80	86,7	12,3	221,1	0,31
81	100,0	11,2	403,2	0,23
82	99,1	11,6	407,3	0,24
83	85,8	12,6	289,9	0,29
84	104,4	13,9	383,0	0,26
85	107,1	22,2	281,0	0,39
86	79,7	11,6	236,2	0,31

5.2 Πίνακες αποτελεσμάτων

5.2.1 Αποτελέσματα τάσεων με την ακριβή προσέγγιση

Ακολουθεί η παράθεση σε πίνακες των αποτελεσμάτων με την ακριβή προσέγγιση για τον υπολογισμό των τάσεων όπως περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 4.

Πίνακας 5.2.1.1: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την ακριβή προσέγγιση για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας A Low και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, M^t η στρεπτική ροπή, A το εμβαδόν της διατομής, I_{xp} και I_{yp} η κύριες επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης, x_c και y_c οι συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου ως προς το κύριο σύστημα αναφοράς, σ^b η τάση λόγω κάμψης, σ^t η τάση λόγω στρέψης και σ^{eq} η ισοδύναμη κατά Mises τάση.

A Low Left											
Αριθμός Δοκίμιου	M^b (Nm)	M^t (Nm)	A (mm ²)	I_{xp} (mm ⁴)	I_{yp} (mm ⁴)	x_c (mm)	y_c (mm)	σ^b (MPa)	σ^t (MPa)	σ^{eq} (MPa)	
LF	5	0,70	0,06	6,10	5,03	7,14	-0,89	-1,23	187,1	6,2	187,4
	6	0,57	0,04	5,61	4,11	7,24	0,66	-1,32	185,6	5,6	185,8
	7	0,62	0,03	5,73	6,61	4,58	0,93	-1,35	177,2	3,6	177,3
	8	0,58	0,02	5,31	6,22	4,31	-1,04	-1,48	197,7	2,5	197,7
	22	0,51	0,01	5,03	3,64	6,00	-0,61	-1,29	179,1	1,5	179,2
	23	0,63	0,07	6,05	4,63	7,97	1,15	-1,22	187,0	8,4	187,6
	24	0,63	0,03	6,84	7,03	9,20	-0,45	-1,69	152,4	2,8	152,5
	43	0,61	0,04	5,55	4,62	6,75	-1,41	-0,51	181,7	5,8	182,0
	44	0,60	0,02	5,46	5,87	4,28	-1,28	-1,29	174,0	2,1	174,1
	45	0,70	0,05	5,99	7,26	5,14	-0,11	-1,97	181,0	7,1	181,4

Πίνακας 5.2.1.2: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την ακριβή προσέγγιση για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας A High και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, M^t η στρεπτική ροπή, A το εμβαδόν της διατομής, I_{xp} και I_{yp} η κύριες επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης, x_c και y_c οι συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου ως προς το κύριο σύστημα αναφοράς, σ^b η τάση λόγω κάμψης, σ^t η τάση λόγω στρέψης και σ^{eq} η ισοδύναμη κατά Mises τάση.

A High Left											
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	M^t (Nm)	A (mm ²)	I_{xp} (mm ⁴)	I_{yp} (mm ⁴)	x_c (mm)	y_c (mm)	σ^b (MPa)	σ^t (MPa)	σ^{eq} (MPa)	
LF	13	0,50	0,02	5,13	3,46	6,00	-0,65	-1,26	179,3	2,8	179,4
	14	0,54	0,03	5,31	3,85	7,45	-0,97	-1,28	189,1	5,1	189,3
	16	0,55	0,09	5,20	6,66	4,55	1,05	-1,30	166,8	14,1	168,6
	25	0,58	0,03	6,08	5,42	7,81	-1,16	-1,11	146,2	3,7	146,4
	26	0,51	0,03	5,81	3,66	6,13	-0,62	-1,31	183,8	3,6	183,9
	28	0,46	0,05	5,70	3,59	5,61	-0,99	-1,20	171,9	6,1	172,2

Πίνακας 5.2.1.3: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την ακριβή προσέγγιση για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας B Low και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, M^t η στρεπτική ροπή, A το εμβαδόν της διατομής, I_{xp} και I_{yp} η κύριες επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης, x_c και y_c οι συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου ως προς το κύριο σύστημα αναφοράς, σ^b η τάση λόγω κάμψης, σ^t η τάση λόγω στρέψης και σ^{eq} η ισοδύναμη κατά Mises τάση.

B Low Left											
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	M^t (Nm)	A (mm ²)	I_{xp} (mm ⁴)	I_{yp} (mm ⁴)	x_c (mm)	y_c (mm)	σ^b (MPa)	σ^t (MPa)	σ^{eq} (MPa)	
LF	1	0,57	0,07	4,51	2,72	5,50	0,97	-1,15	254,2	14,3	255,4
	3	0,45	0,04	5,40	6,50	4,12	0,96	-1,29	134,6	5,9	135,0
	4	0,55	0,04	5,38	4,42	7,43	-0,91	-1,52	166,5	6,6	166,9
	30	0,69	0,05	6,09	5,32	7,85	1,20	-1,21	179,3	5,7	179,6
	32	0,65	0,00	5,36	6,97	4,39	1,08	-1,26	234,8	0,0	234,8

Πίνακας 5.2.1.4: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την ακριβή προσέγγιση για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας B High και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, M^t η στρεπτική ροπή, A το εμβαδόν της διατομής, I_{xp} και I_{yp} η κύριες επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης, x_c και y_c οι συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου ως προς το κύριο σύστημα αναφοράς, σ^b η τάση λόγω κάμψης, σ^t η τάση λόγω στρέψης και σ^{eq} η ισοδύναμη κατά Mises τάση.

B High Left											
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	M^t (Nm)	A (mm ²)	I_{xp} (mm ⁴)	I_{yp} (mm ⁴)	x_c (mm)	y_c (mm)	σ^b (MPa)	σ^t (MPa)	σ^{eq} (MPa)	
LF	9	0,56	0,00	5,56	4,20	7,06	-1,15	1,08	170,4	0,7	170,4
	10	0,54	0,09	4,95	3,55	5,86	-1,24	-1,00	189,7	15,3	191,6
	11	0,69	0,11	4,65	5,81	3,46	0,37	1,78	225,5	21,2	228,5
	33	0,66	0,09	6,36	5,59	9,31	-0,84	-1,45	171,7	10,2	172,6
	34	0,56	0,08	5,72	7,43	4,01	-1,64	0,85	167,1	10,6	168,1
	76	0,48	0,04	5,65	4,66	7,45	-0,41	-1,50	148,7	6,0	149,0

Πίνακας 5.2.1.5: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την ακριβή προσέγγιση για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας Control OVX και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, M^t η στρεπτική ροπή, A το εμβαδόν της διατομής, I_{xp} και I_{yp} η κύριες επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης, x_c και y_c οι συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου ως προς το κύριο σύστημα αναφοράς, σ^b η τάση λόγω κάμψης, σ^t η τάση λόγω στρέψης και σ^{eq} η ισοδύναμη κατά Mises τάση.

Control OVX Left											
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	M^t (Nm)	A (mm ²)	I_{xp} (mm ⁴)	I_{yp} (mm ⁴)	x_c (mm)	y_c (mm)	σ^b (MPa)	σ^t (MPa)	σ^{eq} (MPa)	
LF	17	0,60	0,01	5,64	4,57	7,18	-0,61	-1,33	173,7	2,1	173,7
	18	0,60	0,01	6,20	4,80	7,94	-1,02	-1,25	169,3	1,8	169,4
	19	0,70	0,06	6,14	6,04	8,10	-0,38	-1,52	173,3	7,7	173,8
	20	0,42	0,04	5,18	3,34	6,13	-0,95	-1,10	138,2	5,8	138,6
	42	0,53	0,01	5,53	7,19	4,30	-1,22	-1,13	165,7	1,8	165,8
	79	0,55	0,05	6,58	5,14	8,60	-0,88	-1,29	147,7	4,8	147,9
	81	0,52	0,05	5,58	5,10	8,05	0,02	-1,58	151,6	6,9	152,0
	82	0,48	0,05	6,04	4,47	7,53	-0,37	-1,38	146,3	5,6	146,6

Πίνακας 5.2.1.6: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την ακριβή προσέγγιση για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας Control no OVX και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, M^t η στρεπτική ροπή, A το εμβαδόν της διατομής, I_{xp} και I_{yp} η κύριες επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης, x_c και y_c οι συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου ως προς το κύριο σύστημα αναφοράς, σ^b η τάση λόγω κάμψης, σ^t η τάση λόγω στρέψης και σ^{eq} η ισοδύναμη κατά Mises τάση.

Control no OVX Left											
Αριθμός Δοκίμιου	M^b (Nm)	M^t (Nm)	A (mm ²)	I_{xp} (mm ⁴)	I_{yp} (mm ⁴)	x_c (mm)	y_c (mm)	σ^b (MPa)	σ^t (MPa)	σ^{eq} (MPa)	
LF	37	0,60	0,00	5,53	5,98	3,61	-0,36	-1,72	183,0	0,4	183,0
	38	0,55	0,05	5,38	3,34	5,48	-0,96	-1,07	197,1	6,6	197,5
	40	0,52	0,01	5,78	6,41	4,00	0,99	-1,30	164,1	1,6	164,1
	51	0,54	0,05	6,83	5,83	8,64	-0,53	-1,46	135,9	4,5	136,2
	52	0,56	0,08	6,05	4,51	7,75	-0,47	-1,33	167,4	10,0	168,3
	53	0,64	0,10	6,57	5,05	8,92	-0,27	-1,55	170,0	9,9	170,8
	54	0,64	0,02	6,93	4,63	8,96	-0,35	-1,47	201,2	1,8	201,2
	88	0,58	0,06	6,58	4,80	7,57	-0,73	-1,39	169,2	5,4	169,5

Πίνακας 5.2.1.7: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την ακριβή προσέγγιση για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας A Low και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, M^t η στρεπτική ροπή, A το εμβαδόν της διατομής, I_{xp} και I_{yp} η κύριες επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης, x_c και y_c οι συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου ως προς το κύριο σύστημα αναφοράς, σ^b η τάση λόγω κάμψης, σ^t η τάση λόγω στρέψης και σ^{eq} η ισοδύναμη κατά Mises τάση.

A Low Right											
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	M^t (Nm)	A (mm ²)	I_{xp} (mm ⁴)	I_{yp} (mm ⁴)	x_c (mm)	y_c (mm)	σ^b (MPa)	σ^t (MPa)	σ^{eq} (MPa)	
RF	5	0,45	0,01	5,63	4,16	5,89	0,85	-1,18	139,0	0,8	139,0
	6	0,64	0,03	5,97	4,97	8,02	1,28	-1,26	192,8	3,7	192,9
	8	0,77	0,03	5,17	6,72	4,36	0,88	-1,47	225,0	4,2	225,1
	22	0,50	0,04	5,53	4,55	6,68	1,03	-1,18	151,7	5,7	152,1
	23	0,66	0,04	5,93	7,84	5,23	0,90	-1,36	160,3	5,6	160,6
	24	0,48	0,02	5,51	5,02	7,65	1,02	-1,29	139,2	2,8	139,3
	43	0,58	0,03	6,28	5,77	8,42	0,92	-1,40	150,6	3,9	150,7
	44	0,60	0,02	5,03	5,65	3,58	-1,06	-1,06	204,1	3,4	204,2
	45	0,57	0,01	5,99	5,35	7,81	-0,90	-1,33	149,3	1,1	149,4

Πίνακας 5.2.1.8: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την ακριβή προσέγγιση για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας A High και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, M^t η στρεπτική ροπή, A το εμβαδόν της διατομής, I_{xp} και I_{yp} η κύριες επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης, x_c και y_c οι συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου ως προς το κύριο σύστημα αναφοράς, σ^b η τάση λόγω κάμψης, σ^t η τάση λόγω στρέψης και σ^{eq} η ισοδύναμη κατά Mises τάση.

A High Right											
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	M^t (Nm)	A (mm ²)	I_{xp} (mm ⁴)	I_{yp} (mm ⁴)	x_c (mm)	y_c (mm)	σ^b (MPa)	σ^t (MPa)	σ^{eq} (MPa)	
RF	13	0,52	0,06	4,78	4,86	3,51	-0,80	4,86	182,6	10,5	183,5
	14	0,52	0,06	5,69	6,72	4,51	-1,06	-1,15	147,9	7,9	148,5
	15	0,49	0,08	5,15	4,37	7,95	-1,08	-1,38	164,2	12,9	165,7
	16	0,54	0,01	5,94	5,46	7,55	-0,73	-1,45	146,3	1,7	146,3
	25	0,61	0,01	5,98	5,09	8,20	0,41	-1,51	169,7	1,7	169,7
	26	0,59	0,09	5,63	4,24	5,45	0,69	-1,38	197,4	10,8	198,3
	27	0,43	0,03	5,80	4,96	7,21	0,72	-1,43	130,7	4,1	130,9
	28	0,63	0,02	5,49	5,91	3,88	-0,51	-1,62	190,2	2,6	190,2
	67	0,61	0,02	6,39	5,65	8,01	0,28	-1,56	164,8	1,7	164,8

Πίνακας 5.2.1.9: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την ακριβή προσέγγιση για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας B Low και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, M^t η στρεπτική ροπή, A το εμβαδόν της διατομής, I_{xp} και I_{yp} η κύριες επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης, x_c και y_c οι συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου ως προς το κύριο σύστημα αναφοράς, σ^b η τάση λόγω κάμψης, σ^t η τάση λόγω στρέψης και σ^{eq} η ισοδύναμη κατά Mises τάση.

B Low Right											
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	M^t (Nm)	A (mm ²)	I_{xp} (mm ⁴)	I_{yp} (mm ⁴)	x_c (mm)	y_c (mm)	σ^b (MPa)	σ^t (MPa)	σ^{eq} (MPa)	
RF	1	0,60	0,02	4,65	5,30	3,74	-1,04	-1,17	206,4	3,7	206,5
	3	0,57	0,02	5,74	7,06	4,92	-0,67	-1,65	154,2	3,1	154,3
	30	0,71	0,04	6,18	5,68	7,86	-1,07	-1,26	179,3	4,8	179,5
	32	0,45	0,01	5,84	4,67	7,37	0,91	-1,31	134,5	1,9	134,5

Πίνακας 5.2.1.10: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την ακριβή προσέγγιση για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας B High και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, M^t η στρεπτική ροπή, A το εμβαδόν της διατομής, I_{xp} και I_{yp} η κύριες επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης, x_c και y_c οι συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου ως προς το κύριο σύστημα αναφοράς, σ^b η τάση λόγω κάμψης, σ^t η τάση λόγω στρέψης και σ^{eq} η ισοδύναμη κατά Mises τάση.

B High Right											
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	M^t (Nm)	A (mm ²)	I_{xp} (mm ⁴)	I_{yp} (mm ⁴)	x_c (mm)	y_c (mm)	σ^b (MPa)	σ^t (MPa)	σ^{eq} (MPa)	
RF	9	0,55	0,07	5,42	4,25	6,47	1,13	-1,07	167,9	11,0	169,0
	10	0,63	0,03	5,14	3,85	5,86	0,98	-1,13	207,5	5,3	207,7
	11	0,75	0,01	5,55	4,21	6,81	-0,96	-1,21	233,7	1,4	233,7
	12	0,59	0,01	5,13	6,23	3,77	-0,66	-1,52	178,0	1,6	178,1
	33	0,53	0,10	5,21	4,41	6,59	1,02	-1,23	167,7	15,9	170,0
	34	0,26	0,01	6,42	4,77	9,44	-0,86	-1,31	70,7	1,5	70,8
	36	0,58	0,03	5,10	2,99	5,70	0,77	-1,15	228,2	3,7	228,3
	76	0,47	0,01	5,87	5,25	7,17	-1,57	0,25	134,7	1,6	134,7
	78	0,47	0,01	6,27	5,41	7,19	0,23	-1,58	136,9	0,6	136,9

Πίνακας 5.2.1.11: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την ακριβή προσέγγιση για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας Control OVX και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, M^t η στρεπτική ροπή, A το εμβαδόν της διατομής, I_{xp} και I_{yp} η κύριες επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης, x_c και y_c οι συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου ως προς το κύριο σύστημα αναφοράς, σ^b η τάση λόγω κάμψης, σ^t η τάση λόγω στρέψης και σ^{eq} η ισοδύναμη κατά Mises τάση.

Control OVX Right											
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	M^t (Nm)	A (mm ²)	I_{xp} (mm ⁴)	I_{yp} (mm ⁴)	x_c (mm)	y_c (mm)	σ^b (MPa)	σ^t (MPa)	σ^{eq} (MPa)	
RF	17	0,66	0,02	5,90	4,90	7,68	-0,20	-1,60	177,3	2,0	177,3
	18	0,59	0,03	5,82	7,16	5,20	-1,03	-1,45	164,6	4,2	164,8
	19	0,62	0,01	6,01	5,34	7,82	1,29	-1,16	168,8	1,7	168,8
	20	0,40	0,00	5,00	5,41	3,24	-1,17	-0,95	148,8	0,0	148,8
	42	0,52	0,07	5,39	4,14	6,12	-0,80	-1,31	175,0	10,6	175,9
	80	0,43	0,03	5,37	4,19	6,21	0,91	-1,32	147,0	4,5	147,2
	81	0,50	0,08	5,84	6,30	7,64	0,54	-1,69	137,9	10,6	139,1

Πίνακας 5.2.1.12: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την ακριβή προσέγγιση για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας Control no OVX και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, M^t η στρεπτική ροπή, A το εμβαδόν της διατομής, I_{xp} και I_{yp} η κύριες επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης, x_c και y_c οι συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου ως προς το κύριο σύστημα αναφοράς, σ^b η τάση λόγω κάμψης, σ^t η τάση λόγω στρέψης και σ^{eq} η ισοδύναμη κατά Mises τάση.

Control no OVX RRight										
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	M^t (Nm)	A (mm ²)	I_{xp} (mm ⁴)	I_{yp} (mm ⁴)	x_c (mm)	y_c (mm)	σ^b (MPa)	σ^t (MPa)	σ^{eq} (MPa)
37	0,49	0,04	5,39	3,54	5,49	-1,33	-0,88	168,2	5,4	168,5
38	0,44	0,04	5,74	2,50	5,54	-0,62	-1,47	193,2	5,0	193,4
51	0,65	0,03	6,37	5,31	8,03	1,17	-1,15	168,9	2,8	169,0
52	0,67	0,08	6,03	4,74	7,18	0,50	-1,42	194,8	9,9	195,6
53	0,61	0,05	6,64	5,08	8,89	0,53	-1,44	166,8	4,5	167,0
54	0,58	0,00	6,91	4,75	8,83	0,46	-1,48	181,0	0,4	181,0
87	0,56	0,01	6,53	5,16	7,71	0,30	-1,49	156,9	0,7	157,0

5.2.2 Αποτελέσματα τάσεων με την προσέγγιση ομόκεντρων κύκλων

Ακολουθούν οι πίνακες με τα αποτελέσματα της τάσεων με την προσέγγιση ομόκεντρων κύκλων. Για τον υπολογισμό τους ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στο κεφάλαιο 4.

Πίνακας 5.2.2.1: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ομόκεντρων κύκλων για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας A Low και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

A Low Left						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
LF	5	0,70	1,01	1,74	6,40	191,5
	6	0,57	1,04	1,71	5,78	167,3
	7	0,62	1,01	1,70	5,70	185,4
	8	0,58	1,08	1,68	5,22	187,5
	22	0,51	1,03	1,65	4,91	172,1
	23	0,63	1,04	1,76	6,66	165,8
	24	0,63	1,15	1,85	7,94	147,7
	43	0,61	1,09	1,73	5,87	178,0
	44	0,60	0,97	1,75	6,67	158,3
	45	0,70	1,12	1,75	6,19	198,4

Πίνακας 5.2.2.2: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ομόκεντρων κύκλων για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας A High και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{zz} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

A High Left						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{zz} (mm ⁴)	σ (MPa)	
LF	13	0,50	1,03	1,64	4,75	172,7
	14	0,54	1,10	1,73	5,82	160,3
	16	0,55	1,15	1,74	5,78	166,3
	25	0,58	1,11	1,77	6,43	158,9
	26	0,51	0,86	1,63	5,09	161,8
	28	0,46	0,84	1,60	4,70	156,8

Πίνακας 5.2.2.3: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ομόκεντρων κύκλων για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας B Low και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

B Low Left						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
LF	1	0,57	1,03	1,59	4,17	219,3
	3	0,45	1,04	1,68	5,33	140,8
	4	0,55	1,10	1,72	5,71	166,1
	30	0,69	1,07	1,77	6,69	183,5
	32	0,65	1,17	1,76	5,98	190,4

Πίνακας 5.2.2.4: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ομόκεντρων κύκλων για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας B High και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

B High Left						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
LF	9	0,56	1,06	1,69	5,46	174,9
	10	0,54	1,05	1,65	4,80	186,0
	11	0,69	1,13	1,68	4,98	234,1
	33	0,66	1,12	1,84	7,85	155,4
	34	0,56	1,03	1,72	5,99	161,2
	76	0,48	1,11	1,72	5,69	145,6

Πίνακας 5.2.2.5: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ομόκεντρων κύκλων για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας Control OVX και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

Control OVX Left						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
LF	17	0,60	1,12	1,73	5,78	178,8
	18	0,60	1,20	1,85	7,54	147,4
	19	0,70	1,20	1,84	7,44	172,1
	20	0,42	1,01	1,63	4,70	145,3
	42	0,53	1,11	1,75	6,12	151,6
	79	0,55	1,00	1,78	7,16	136,7
	81	0,52	1,21	1,81	6,66	140,2
	82	0,48	1,01	1,71	5,85	139,9

Πίνακας 5.2.2.6: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ομόκεντρων κύκλων για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας Control no OVX και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

Control no OVX Left						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
LF	37	0,60	0,91	1,64	5,12	192,3
	38	0,55	0,88	1,59	4,52	192,4
	40	0,52	0,94	1,63	4,93	172,1
	51	0,54	1,03	1,78	7,06	137,2
	52	0,56	1,06	1,75	6,45	153,4
	53	0,64	1,04	1,78	6,92	165,4
	54	0,64	0,92	1,74	6,67	166,9
	88	0,58	0,92	1,73	6,51	153,8

Πίνακας 5.2.2.7: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ομόκεντρων κύκλων για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας A Low και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

A Low Right						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
RF	5	0,45	0,94	1,65	5,19	142,6
	6	0,64	1,09	1,77	6,59	172,8
	8	0,77	1,13	1,72	5,52	238,1
	22	0,50	1,07	1,72	5,80	149,5
	23	0,66	1,11	1,78	6,71	174,2
	24	0,48	1,19	1,77	6,21	137,8
	43	0,58	1,15	1,83	7,45	142,6
	44	0,60	1,00	1,65	5,02	197,2
	45	0,57	1,12	1,79	6,83	150,4

Πίνακας 5.2.2.8: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ομόκεντρων κύκλων για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας A High και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

A High Right						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
RF	13	0,52	1,02	1,60	4,31	191,6
	14	0,52	1,05	1,70	5,65	155,7
	15	0,49	1,23	1,80	6,40	137,3
	16	0,54	1,12	1,79	6,89	140,5
	25	0,61	1,11	1,81	7,27	151,2
	26	0,59	0,90	1,63	4,96	193,9
	27	0,43	1,10	1,75	6,17	122,3
	28	0,63	0,94	1,62	4,81	212,2
	67	0,61	1,07	1,78	6,90	158,6

Πίνακας 5.2.2.9: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ομόκεντρων κύκλων για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας B Low και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

B Low Right						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
RF	1	0,60	1,11	1,63	4,31	227,5
	3	0,57	1,10	1,74	6,09	163,7
	30	0,71	1,13	1,79	6,79	186,1
	32	0,45	1,09	1,71	5,63	135,9

Πίνακας 5.2.2.10: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ομόκεντρων κύκλων για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας B High και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

B High Right						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
RF	9	0,55	1,06	1,69	5,35	173,8
	10	0,63	1,04	1,65	4,90	212,0
	11	0,75	1,04	1,72	5,87	217,6
	12	0,59	1,08	1,68	5,18	193,0
	33	0,53	1,12	1,72	5,63	162,9
	34	0,26	1,09	1,82	7,59	61,3
	36	0,58	0,95	1,63	4,86	193,4
	76	0,47	1,10	1,82	7,42	114,0
	78	0,47	1,01	1,76	6,79	121,8

Πίνακας 5.2.2.11: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ομόκεντρων κύκλων για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας Control OVX και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

Control OVX Right						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
RF	17	0,66	1,10	1,76	6,44	181,3
	18	0,59	1,10	1,75	6,19	165,4
	19	0,62	1,10	1,78	6,66	166,0
	20	0,40	0,96	1,61	4,60	138,7
	42	0,52	1,04	1,65	4,95	173,8
	80	0,43	1,04	1,68	5,36	136,0
	81	0,50	1,21	1,83	7,19	127,5

Πίνακας 5.2.2.12: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ομόκεντρων κύκλων για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας Control no OVX και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

Control no OVX Right						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
RF	37	0,49	0,90	1,59	4,54	170,5
	38	0,44	0,82	1,60	4,83	147,6
	51	0,65	1,05	1,79	7,17	163,2
	52	0,67	1,03	1,71	5,90	194,6
	53	0,61	1,04	1,79	7,12	154,3
	54	0,58	0,93	1,77	7,04	146,7
	87	0,56	1,00	1,76	6,74	147,5

5.2.3 Αποτελέσματα τάσεων με την προσέγγιση ελαχίστου πάχους

Ακολουθούν οι πίνακες με τα αποτελέσματα των τάσεων με την προσέγγιση ελαχίστου πάχους. Για τον υπολογισμό τους ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στο κεφάλαιο 4.

Πίνακας 5.2.3.1: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ελάχιστου πάχους για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας A Low και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

A Low Left						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
LF	5	0,70	1,19	1,71	5,19	232,2
	6	0,57	1,02	1,58	4,10	218,9
	7	0,62	1,12	1,67	4,89	213,1
	8	0,58	1,31	1,71	4,44	224,1
	22	0,51	1,12	1,58	3,68	220,6
	23	0,63	1,18	1,71	5,24	204,8
	24	0,63	1,21	1,76	5,86	190,2
	43	0,61	1,17	1,66	4,54	221,8
	44	0,60	1,17	1,66	4,57	219,7
	45	0,70	1,45	1,95	7,83	174,4

Πίνακας 5.2.3.2: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ελάχιστου πάχους για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας A High και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

A High Left						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
LF	13	0,50	1,13	1,55	3,23	240,1
	14	0,54	1,35	1,76	4,89	194,5
	16	0,55	1,29	1,74	5,05	190,7
	25	0,58	1,21	1,73	5,37	186,4
	26	0,51	0,99	1,56	3,87	203,5
	28	0,46	1,02	1,57	3,97	182,8

Πίνακας 5.2.3.3: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ελάχιστου πάχους για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας B Low και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

B Low Left						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
LF	1	0,57	1,25	1,60	3,22	285,1
	3	0,45	1,29	1,74	4,95	156,6
	4	0,55	1,33	1,73	4,53	210,5
	30	0,69	1,26	1,74	5,13	234,6
	32	0,65	1,29	1,70	4,32	254,9

Πίνακας 5.2.3.4: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ελάχιστου πάχους για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας B High και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

B High Left						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
LF	9	0,56	1,14	1,69	5,04	188,7
	10	0,54	1,21	1,67	4,46	203,7
	11	0,69	1,59	1,90	5,35	247,0
	33	0,66	1,26	1,77	5,67	206,0
	34	0,56	1,32	1,92	8,27	130,2
	76	0,48	1,11	1,64	4,46	176,9

Πίνακας 5.2.3.5: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ελάχιστου πάχους για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας Control OVX και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

Control OVX Left						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
LF	17	0,60	1,09	1,69	5,25	192,1
	18	0,60	1,24	1,74	5,44	192,9
	19	0,70	1,25	1,70	4,61	255,9
	20	0,42	1,09	1,66	4,78	145,3
	42	0,53	1,37	1,74	4,51	205,2
	79	0,55	1,15	1,67	4,79	191,7
	81	0,52	1,20	1,63	3,91	215,7
	82	0,48	1,03	1,57	3,86	194,5

Πίνακας 5.2.3.6: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ελάχιστου πάχους για τα αριστερά δοκίμια της ομάδας Control no OVX και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

Control no OVX Left						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
LF	37	0,60	1,24	1,81	6,55	165,9
	38	0,55	1,00	1,55	3,76	226,1
	40	0,52	1,07	1,71	5,69	156,6
	51	0,54	1,04	1,71	5,72	161,8
	52	0,56	1,03	1,57	3,93	225,8
	53	0,64	1,06	1,71	5,77	191,2
	54	0,64	0,80	1,52	3,91	249,1
	88	0,58	0,94	1,66	5,31	199,4

Πίνακας 5.2.3.7: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ελάχιστου πάχους για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας A Low και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

A Low Right						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
RF	5	0,45	1,00	1,63	4,79	152,9
	6	0,64	1,37	1,74	4,50	249,3
	8	0,77	1,28	1,77	5,56	243,5
	22	0,50	1,07	1,63	4,53	181,6
	23	0,66	1,34	1,77	5,12	226,7
	24	0,48	1,24	1,69	4,52	180,0
	43	0,58	1,32	1,77	5,42	189,9
	44	0,60	1,25	1,64	3,67	267,5
	45	0,57	1,23	1,82	6,75	154,5

Πίνακας 5.2.3.8: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ελάχιστου πάχους για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας A High και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

A High Right						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
RF	13	0,52	1,05	1,61	4,34	191,7
	14	0,52	1,17	1,73	5,63	159,0
	15	0,49	1,36	1,75	4,66	183,6
	16	0,54	1,17	1,70	5,12	179,5
	25	0,61	1,16	1,70	5,17	199,7
	26	0,59	0,98	1,62	4,63	206,7
	27	0,43	1,09	1,66	4,86	147,6
	28	0,63	1,11	1,74	6,08	180,6
	67	0,61	1,08	1,66	4,98	205,2

Πίνακας 5.2.3.9: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ελάχιστου πάχους για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας B Low και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

B Low Right						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
RF	1	0,60	1,24	1,68	4,41	229,7
	3	0,57	1,38	1,83	5,98	175,1
	30	0,71	1,33	1,77	5,26	237,2
	32	0,45	1,10	1,68	5,10	147,3

Πίνακας 5.2.3.10: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ελάχιστου πάχους για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας B High και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

B High Right						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
RF	9	0,55	1,24	1,65	3,96	229,5
	10	0,63	1,18	1,67	4,61	228,1
	11	0,75	1,10	1,66	4,88	253,9
	12	0,59	1,33	1,75	4,96	210,3
	33	0,53	1,22	1,68	4,52	198,0
	34	0,26	1,12	1,70	5,35	81,1
	36	0,58	0,99	1,53	3,50	252,0
	76	0,47	1,13	1,64	4,37	174,2
	78	0,47	1,05	1,57	3,85	191,6

Πίνακας 5.2.3.11: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ελάχιστου πάχους για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας Control OVX και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

Control OVX Right						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
RF	17	0,66	1,24	1,69	4,54	246,1
	18	0,59	1,38	1,81	5,54	191,0
	19	0,62	1,28	1,82	6,48	174,4
	20	0,40	1,15	1,66	4,53	145,2
	42	0,52	1,07	1,64	4,65	183,4
	80	0,43	1,20	1,65	4,22	169,7
	81	0,50	1,34	1,74	4,68	185,9

Πίνακας 5.2.3.12: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις με την προσέγγιση ελάχιστου πάχους για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας no OVX και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό τους. M^b η μέγιστη καμπτική ροπή, R_{in} η εσωτερική ακτίνα του κυκλικού δίσκου, R_{out} η εξωτερική ακτίνα του και I_{xx} η επιφανειακή ροπή δευτέρας τάξης.

Control no OVX Right						
Αριθμός Δοκιμίου	M^b (Nm)	R_{in} (mm)	R_{out} (mm)	I_{xx} (mm ⁴)	σ (MPa)	
RF	37	0,49	1,03	1,62	4,59	172,0
	38	0,44	0,83	1,49	3,54	187,7
	51	0,65	1,11	1,74	6,03	188,6
	52	0,67	0,97	1,65	5,13	215,6
	53	0,61	0,96	1,67	5,47	187,8
	54	0,58	0,84	1,54	4,07	221,7
	87	0,56	0,97	1,62	4,67	195,3

5.2.4 Σύγκριση τάσεων των τριών προσεγγίσεων

Ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση με πίνακες των τιμών των τάσεων για την προσέγγιση ομόκεντρων κύκλων, την προσέγγιση ελαχίστου πάχους και την ακριβή προσέγγιση καθώς και σύγκριση των δύο πρώτων με την ακριβή προσέγγιση εύρεσης τάσεων.

Πίνακας 5.2.4.1: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις για αριστερά δοκίμια της ομάδας A Low υπολογισμένες με τις τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις.

A Low Left				
Αριθμός Δοκιμίου	Circular ring of average thickness Stress (MPa)	Circular ring of minimum thickness Stress (MPa)	Actual section's outline Stress (MPa)	
LF	5	191,5	232,2	187,4
	6	167,3	218,9	185,8
	7	185,5	213,1	177,3
	8	187,5	224,1	197,7
	22	172,1	220,6	179,2
	23	165,8	204,9	187,6
	24	147,7	190,2	152,5
	43	178,1	221,8	182,0
	44	158,3	219,7	174,1
	45	198,4	174,4	181,4

Πίνακας 5.2.4.2: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις για αριστερά δοκίμια της ομάδας A High υπολογισμένες με τις τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις.

A High Left				
Αριθμός Δοκιμίου	Circular ring of average thickness Stress (MPa)	Circular ring of minimum thickness Stress (MPa)	Actual section's outline Stress (MPa)	
LF	13	172,7	240,1	179,4
	14	160,3	194,5	189,3
	16	166,3	190,7	168,6
	25	158,9	186,4	146,4
	26	161,8	203,5	183,9
	28	156,8	182,8	172,2

Πίνακας 5.2.4.3: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις για αριστερά δοκίμια της ομάδας B Low υπολογισμένες με τις τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις.

B Low Left				
Αριθμός Δοκιμίου	Circular ring of average thickness	Circular ring of minimum thickness	Actual section's outline	
	Stress (MPa)	Stress (MPa)	Stress (MPa)	
LF	1	219,3	285,1	255,4
	3	140,8	156,6	135,0
	4	166,1	210,5	166,9
	30	183,5	234,6	179,6
	32	190,4	254,9	234,8

Πίνακας 5.2.4.4: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις για αριστερά δοκίμια της ομάδας B High υπολογισμένες με τις τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις.

B High Left				
Αριθμός Δοκιμίου	Circular ring of average thickness	Circular ring of minimum thickness	Actual section's outline	
	Stress (MPa)	Stress (MPa)	Stress (MPa)	
LF	9	174,9	188,7	170,4
	10	186,0	203,7	191,6
	11	234,1	247,0	228,5
	33	155,4	206,0	172,6
	34	161,2	130,2	168,1
	76	145,6	176,9	149,0

Πίνακας 5.2.4.5: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις για αριστερά δοκίμια της ομάδας Control OVX υπολογισμένες με τις τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις.

Control OVX Left				
Αριθμός Δοκιμίου	Circular ring of average thickness	Circular ring of minimum thickness	Actual section's outline	
	Stress (MPa)	Stress (MPa)	Stress (MPa)	
LF	17	178,8	192,1	173,7
	18	147,4	192,9	169,4
	19	172,1	255,9	173,8
	20	145,3	145,3	138,6
	42	151,6	205,2	165,8
	79	136,7	191,7	147,9
	81	140,2	215,7	152,0
	82	139,9	194,5	146,6

Πίνακας 5.2.4.6: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις για αριστερά δοκίμια της ομάδας Control no OVX υπολογισμένες με τις τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις.

Control no OVX Left				
Αριθμός Δοκιμίου	Circular ring of average thickness	Circular ring of minimum thickness	Actual section's outline	
	Stress (MPa)	Stress (MPa)	Stress (MPa)	
LF	37	192,3	165,9	183,0
	38	192,4	226,1	197,5
	40	172,1	156,6	164,1
	51	137,2	161,8	136,2
	52	153,4	225,8	168,3
	53	165,4	191,2	170,8
	54	166,9	249,1	201,2
	88	153,8	199,4	169,5

Πίνακας 5.2.4.7: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις για δεξιά δοκίμια της ομάδας A Low υπολογισμένες με τις τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις.

A Low Right				
Αριθμός Δοκιμίου	Circular ring of average thickness	Circular ring of minimum thickness	Actual section's outline	
	Stress (MPa)	Stress (MPa)	Stress (MPa)	
RF	5	142,6	152,9	139,0
	6	172,8	249,3	192,9
	8	238,1	243,5	225,1
	22	149,5	181,6	152,1
	23	174,2	226,7	160,6
	24	137,8	180,0	139,3
	43	142,6	189,9	150,7
	44	197,2	267,52	204,2
	45	150,4	154,48	149,4

Πίνακας 5.2.4.8: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις για δεξιά δοκίμια της ομάδας A High υπολογισμένες με τις τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις.

A High Right				
Αριθμός Δοκιμίου	Circular ring of average thickness	Circular ring of of minimum thickness	Actual section's outline	
	Stress (MPa)	Stress (MPa)	Stress (MPa)	
RF	13	191,6	191,7	183,5
	14	155,7	159,0	148,5
	15	137,3	183,6	165,7
	16	140,5	179,5	146,3
	25	151,2	199,7	169,7
	26	193,9	206,7	198,3
	27	122,3	147,6	130,9
	28	212,2	180,6	190,2
	67	158,6	205,2	164,8

Πίνακας 5.2.4.9: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας B Low υπολογισμένες με τις τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις.

B Low Right				
Αριθμός Δοκιμίου	Circular ring of average thickness	Circular ring of minimum thickness	Actual section's outline	
	Stress (MPa)	Stress (MPa)	Stress (MPa)	
RF	1	227,5	229,7	206,5
	3	163,7	175,1	154,3
	30	186,1	237,2	179,5
	32	135,9	147,3	134,5

Πίνακας 5.2.4.10: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας B High υπολογισμένες με τις τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις.

B High Right				
Αριθμός Δοκιμίου	Circular ring of average thickness	Circular ring of minimum thickness	Actual section's outline	
	Stress (MPa)	Stress (MPa)	Stress (MPa)	
RF	9	173,8	229,5	169,0
	10	212,0	228,1	207,7
	11	217,6	253,9	233,7
	12	193,0	210,3	178,1
	33	162,9	198,0	170,0
	34	61,3	81,1	70,8
	36	193,4	252,0	228,3
	76	114,0	174,2	134,7
	78	121,8	191,6	136,9

Πίνακας 5.2.4.11: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας Control OVX υπολογισμένες με τις τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις.

Control OVX Right				
Αριθμός Δοκιμίου	Circular ring of average thickness	Circular ring of minimum thickness	Actual section's outline	
	Stress (MPa)	Stress (MPa)	Stress (MPa)	
RF	17	181,3	246,1	177,3
	18	165,4	191,0	164,8
	19	166,0	174,4	168,8
	20	138,7	145,2	148,8
	42	173,8	183,4	175,9
	80	136,0	169,7	147,2
	81	127,5	185,9	139,1

Πίνακας 5.2.4.12: Μέγιστες εφελκυστικές τάσεις για τα δεξιά δοκίμια της ομάδας Control no OVX υπολογισμένες με τις τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις.

Control no OVX Right				
Αριθμός Δοκιμίου	Circular ring of average thickness	Circular ring of minimum thickness	Actual section's outline	
	Stress (MPa)	Stress (MPa)	Stress (MPa)	
RF	37	170,5	172,0	168,5
	38	147,6	187,7	193,4
	51	163,2	188,6	169,0
	52	194,6	215,6	195,6
	53	154,3	187,8	167,0
	54	146,7	221,7	181,0
	87	147,5	195,3	157,0

Πίνακας 5.2.4.13: Μέσοι όροι των τάσεων και τυπικές αποκλίσεις για κάθε ομάδα και η ποσοστιαία διαφορά των προσεγγίσεων ελαχίστου πάχους και ομόκεντρων κύκλων από την ακριβή προσέγγιση

LEFT	Actual section's outline (MPa)	Circular ring of minimum thickness(MPa)	Actual section's outline vs Circular ring of minimum thickness %	Circular ring of average thickness(MPa)	Actual section's outline vs Circular ring of average thickness%
OVX A Low	181,8 ± 4,9	219,4 ± 8,0	20,7	175,2 ± 15,9	3,6
OVX A High	178,7 ± 8,4	191,6 ± 8,0	7,2	162,8 ± 5,8	8,9
OVX B Low	194,3 ± 49,7	221,7 ± 53,4	14,1	180,0 ± 29,1	7,4
OVX B High	170,3 ± 15,1	192,1 ± 38,5	12,8	164,6 ± 16,0	3,3
Control OVX	158,5 ± 13,8	199,1 ± 30,7	25,7	151,5 ± 15,6	4,4
Control no OVX	173,8 ± 20,6	197,0 ± 34,4	13,3	166,7 ± 19,1	4,1
RIGHT	Actual section's outline (MPa)	Circular ring of minimum thickness(MPa)	Actual section's outline vs Circular ring of minimum thickness %	Circular ring of average thickness(MPa)	Actual section's outline vs Circular ring of average thickness%
OVX A Low	168,1 ± 31,2	205,1 ± 42,6	22,0	158,4 ± 20,8	5,8
OVX A High	166,4 ± 22,2	183,7 ± 20,2	10,4	162,6 ± 30,0	2,3
OVX B Low	168,7 ± 31,2	197,3 ± 43,3	17,0	178,3 ± 38,7	5,7
OVX B High	182,2 ± 38,1	217,2 ± 28,7	19,2	173,5 ± 38,8	11,6
Control OVX	160,3 ± 15,2	174,9 ± 16,5	9,1	155,5 ± 21,0	3,0
Control no OVX	175,9 ± 14,4	195,5 ± 17,4	11,1	155,0 ± 9,9	11,9

Πίνακας 5.2.4.14: Μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις για κάθε ομάδα και η ποσοστιαία διαφορά ανάμεσα στις τάσεις λόγω κάμψης και τις διατμητικές τάσεις όπως αυτές υπολογίστηκαν με την ακριβή προσέγγιση.

LEFT	σ_b (MPa)	τ (MPa)	Ποσοστιαία διαφορά
OVX A Low	180,3±11,8	4,6±2,4	2,6
OVX A High	172,9±15,3	5,9±4,2	3,4
OVX B Low	193,9±49,5	6,5±5,1	3,4
OVX B High	178,8±26,3	10,6±7,1	5,9
Control OVX	158,2±13,9	4,6±2,4	2,9
Control no OVX	173,5±20,6	5,0±3,7	2,9
RIGHT	σ_b (MPa)	τ (MPa)	Ποσοστιαία διαφορά
OVX A Low	168,0±31,3	3,5±1,7	2,1
OVX A High	166,0±21,9	6,0±4,5	3,6
OVX B Low	168,6±31,2	3,4±1,2	2,0
OVX B High	169,5±51,4	4,7±5,3	2,8
Control OVX	159,9±15,3	4,8±4,2	3,0
Control no OVX	175,7±14,3	4,1±3,3	2,3

5.3 Στατιστική επεξεργασία

Για κάθε μέγεθος που μετρήθηκε και υπολογίστηκε έγινε στατιστική επεξεργασία για την ανάδειξη στατιστικώς σημαντικών διαφορών ανάμεσα στις διαφορετικές ομάδες. Το κριτήριο που χρησιμοποιήθηκε ήταν η δοκιμασία t του Student (t -test). Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας σκοπός της δοκιμασίας t ήταν η σύγκριση αναλυτικών αποτελεσμάτων με δύο διαφορετικές μεθόδους στο ίδιο δείγμα, για να διαπιστωθεί εάν οι δύο μέθοδοι παρέχουν ίδια ή διαφορετικά αποτελέσματα. Το αποτέλεσμα αυτής της δοκιμασίας είναι η αποδοχή ή η απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης H_0 , η οποία δηλώνει ότι: “Οι διαφορές, αποκλίσεις ή έκτροπα αποτελέσματα οφείλονται αποκλειστικά σε τυχαία και όχι συστηματικά σφάλματα”. Έτσι η μηδενική υπόθεση είναι ότι και οι δύο μέθοδοι παρέχουν τα ίδια αναλυτικά αποτελέσματα. Η εναλλακτική υπόθεση H_a δηλώνει το ακριβώς αντίθετο. Έτσι η μηδενική υπόθεση στην παρούσα περίπτωση είναι ότι “οι παρατηρούμενες διαφορές (αν υπάρχουν) οφείλονται καθαρά σε τυχαία σφάλματα” και η εναλλακτική ότι “οι μέθοδοι παρέχουν διαφορετικά αποτελέσματα (επομένως τουλάχιστον η μία παρουσιάζει συστηματικό αναλυτικό σφάλμα)”. Εσφαλμένη απόρριψη της H_0 (ενώ ισχύει) συνιστά σφάλμα 1ου είδους, ενώ εσφαλμένη αποδοχή της H_0 (ενώ δεν ισχύει) συνιστά σφάλμα 2ου είδους. Αυτή η δοκιμασία προϋποθέτει τα εξής: (α) Η πληθυσμιακή κατανομή των τυχαίων σφαλμάτων είναι κανονική (κατά Gauss), (β) οι τυπικές αποκλίσεις μεταξύ των δύο πληθυσμιακών δειγμάτων δεν διαφέρουν σημαντικά.

Όλες οι δοκιμασίες σημαντικότητας παρέχουν αποτελέσματα σε προκαθορισμένη στάθμη εμπιστοσύνης % (confidence level, CL%). Στην παρούσα εργασία η χρησιμοποιούμενη στάθμη εμπιστοσύνης ήταν το 95%. CL 95% σημαίνει ότι: Σε περίπτωση απόρριψη της H_0 , είμαστε σίγουροι ότι κάναμε το σωστό στο 95% ή περισσότερο των περιπτώσεων. Με άλλα λόγια, διακινδυνεύουμε

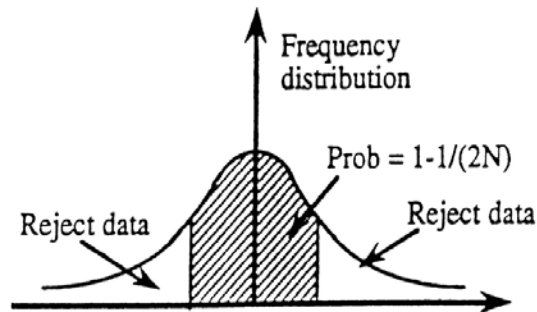
μια πιθανότητα όχι μεγαλύτερη από $(100-95)/100 = 0,05$ να κάνουμε σφάλμα 1ου είδους.

Το πρόγραμμα Excel έχει εγκατεστημένο πακέτο για την στατιστική επεξεργασία του οποίου το αποτέλεσμα φαίνεται από μια αριθμητική τιμή P (p-value), η οποία υπολογίζεται εσωτερικά με αρκετά σύνθετες μαθηματικές μεθόδους. Η τιμή αυτή είναι πιθανότητα σφάλματος 1ου είδους (ειδικά για τα δεδομένα που δόθηκαν) και είναι υπερεπαρκής για τον χρήστη προκειμένου να αποφασίσει για την αποδοχή ή την απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης. Για παράδειγμα, εάν υποθεθεί ότι προαποφασίσαμε να δουλέψουμε σε CL 95% (δηλ. να διακινδυνεύσουμε πιθανότητα σφάλματος 1ου είδους όχι μεγαλύτερη από 0,05), τότε:

(α) Μια τιμή $P = 0,085$ σημαίνει ότι η H_0 πρέπει να γίνει αποδεκτή, ειδικά η πιθανότητα σφάλματος 1ου είδους είναι μεγαλύτερη από το όριο που προαποφασίσαμε ($0,085 > 0,05$).

(β) Μια τιμή $P = 0,021$ σημαίνει ότι η H_0 πρέπει να απορριφθεί επειδή η πιθανότητα σφάλματος 1ου είδους είναι κάτω από το όριο 0,05 που αποφασίσαμε ($0,021 < 0,05$) [23].

Πριν την υποβολή τους στην δοκιμασία t, τα δεδομένα κάθε ομάδας υποβλήθηκαν στο κριτήριο Chauvenet. Το κριτήριο Chauvenet είναι ένα στατιστικό κριτήριο για την απόρριψη “κακών” δεδομένων ανάμεσα σε ένα πληθυσμό που υποθέτουμε ότι ακολουθεί την κανονική κατανομή. Αυτή η τεχνική καθορίζει μια δεκτή διασπορά, με την στατιστική έννοια, γύρω από την μέση τιμή ενός δεδομένου δείγματος N μετρήσεων. Το κριτήριο δηλώνει ότι όλα τα δεδομένα για να θεωρούνται αποδεκτά θα πρέπει να πέφτουν μέσα σε ένα εύρος γύρω από τη μέση τιμή που αντιστοιχεί σε πιθανότητα $1-1/(2N)$. Με άλλα λόγια, τα δεδομένα μπορούν να θεωρηθούν απορριπτά μόνο εάν η πιθανότητα απόκτησης της απόκλισής τους από τη μέση τιμή είναι μικρότερη από $1/(2N)$. Αυτό απεικονίζεται παρακάτω στην εικόνα 5.3.1.



Εικόνα 5.3.1: Απεικόνιση αποδεκτών και απορριφθέντων δεδομένων μιας κανονικής κατανομής σύμφωνα με το κριτήριο Chauvenet [24].

Σύμφωνα λοιπόν με το κριτήριο Chauvenet, η τιμή που θα προσδιορίσει αν μια μέτρηση είναι αποδεκτή ή όχι είναι η παρακάτω

$$\tau = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s_x}$$

όπου x_i είναι η κάθε μέτρηση, \bar{x} η μέση τιμή και s_x η τυπική απόκλιση. Αν σε κάθε πλήθος μετρήσεων αυτή η τιμή υπερβαίνει ένα νούμερο τότε η μέτρηση θεωρείται απορριπτέα και εξαιρείται από τον πληθυσμό. Έπειτα υπολογίζεται ο νέος μέσος όρος και τυπική απόκλιση και εφαρμόζεται ξανά το κριτήριο μέχρι όλες οι τιμές να θεωρούνται αποδεκτές.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας. Τα δοκίμια που δεν ολοκλήρωσαν το πρωτόκολλο (δοκίμια 2, 21, 31, 35, 39, 41, 48, 55, 74) καθώς και το δοκίμιο LF70 το οποίο έφτασε σπασμένο στο εργαστήριο δεν συμπεριλήφθηκαν στην επεξεργασία.

Πίνακας 5.3.1: Παρουσίαση των p-values της στατιστικής δοκιμασίας t μεταξύ όλων των ομάδων για τα αριστερά δοκίμια.

Left	Δύναμη	Ενέργεια	Τάση (ακριβής)	Τάση (ομόκεντροι κύκλοι)	Τάση (ελάχιστο πάχος)	R_{out}	R_{in}	Στιβαρότητα	Μέγιστη βύθιση
OVX vs no OVX	0,05	0,13	0,10	0,10	0,90	0,16	0,00	0,30	0,02
OVX vs A low	0,01	0,10	0,00	0,01	0,09	0,15	0,13	0,01	0,26
OVX vs A high	0,30	0,28	0,01	0,12	0,61	0,06	0,15	0,76	0,06
OVX vs B low	0,06	0,36	0,06	0,04	0,37	0,19	0,61	0,22	0,09
OVX vs B high	0,16	0,46	0,17	0,17	0,71	0,07	0,56	0,40	0,01
no OVX vs A low	0,34	0,00	0,30	0,32	0,09	0,64	0,01	0,06	0,02
no OVX vs A high	0,15	0,35	0,63	0,64	0,74	0,56	0,34	0,57	0,55
no OVX vs B low	0,87	0,00	0,27	0,34	0,35	0,97	0,01	0,84	0,55
no OVX vs B high	0,37	0,05	0,75	0,85	0,81	0,71	0,00	0,92	0,93
A low vs A high	0,02	0,00	0,40	0,09	0,00	0,20	0,44	0,05	0,19
B low vs B high	0,40	0,95	0,29	0,33	0,33	0,74	0,99	0,79	0,48

Πίνακας 5.3.2: Παρουσίαση των p-values της στατιστικής δοκιμασίας t μεταξύ όλων των ομάδων για τα δεξιά δοκίμια.

Right	Δύναμη	Ενέργεια	Τάση (ακριβής)	Τάση (ομόκεντροι κύκλοι)	Τάση (ελάχιστο πάχος)	R _{out}	R _{in}	Στιβαρότητα	Μέγιστη βύθιση
OVX vs no OVX	0,05	0,04	0,07	0,95	0,05	0,88	0,02	0,01	0,95
OVX vs A low	0,01	0,01	0,55	0,80	0,12	0,61	0,20	0,11	0,22
OVX vs A high	0,30	0,01	0,54	0,60	0,39	0,93	0,68	0,64	0,92
OVX vs B low	0,06	0,00	0,55	0,23	0,09	0,90	0,52	0,05	0,88
OVX vs B high	0,16	0,03	0,18	0,29	0,01	0,94	0,79	0,27	0,20
no OVX vs A low	0,34	0,29	0,55	0,72	0,59	0,51	0,00	0,34	0,20
no OVX vs A high	0,15	0,62	0,34	0,56	0,24	0,94	0,07	0,01	0,97
no OVX vs B low	0,87	0,70	0,61	0,19	0,58	0,99	0,01	0,09	0,92
no OVX vs B high	0,37	0,57	0,69	0,28	0,11	0,92	0,01	0,05	0,23
A low vs A high	0,02	0,06	0,90	0,74	0,19	0,55	0,13	0,17	0,25
B low vs B high	0,40	0,79	0,56	0,85	0,33	0,94	0,10	0,27	0,48

5.4 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα κάμψης τριών σημείων μακρών οστών (μηριαίων στη συγκεκριμένη περίπτωση) επιμύων. Η εργασία εστιάστηκε στον ακριβή υπολογισμό της τάσης θραύσης του οστίτη ιστού δεδομένου ότι το μέγεθος αυτό είναι το πλέον κατάλληλο για τον χαρακτηρισμό του υλικού (καθ' εαυτού) σε αντίθεση με άλλα μεγέθη όπως η δύναμη θραύσης και η ροπή θραύσης, τα οποία χαρακτηρίζουν τη μηχανική συμπεριφορά της “κατασκευής” οστούν μάλλον παρά το υλικό από το οποίο είναι δομημένη η “κατασκευή”.

Ανεξαρτήτως της θεωρίας που θα υιοθετηθεί για την περιγραφή ενός πειράματος κάμψης η δυσκολία στον προσδιορισμό της τάσης θραύσης εντοπίζεται στον ακριβή υπολογισμό του τανυστή των επιφανειακών ροπών δευτέρας τάξης I_{ij} της διατομής θραύσης του οστού. Ο υπολογισμός των ποσοτήτων I_{ij} απαιτεί την γνώση του ακριβούς περιγράμματος της συγκεκριμένης διατομής το οποίο περίγραμμα διαφοροποιείται ριζικά θα μπορούσε να λεχθεί από οστούν σε οστούν. Η δυσχέρεια αυτή υποχρεώνει τους ερευνητές στην υιοθέτηση απλουστευτικών υποδειγμάτων σύμφωνα με τα ο π ή η διατομή προσομοιώνονται είτε ως κύκλος, είτε ως έλλειψη, είτε ως κυκλικός δακτύλιος κάποιου μέσου πάχους είτε τέλος ως ελλειπτικός δακτύλιος. Η ανωτέρω απλούστευσεις καθιστούν απαγορευτική την εξαγωγή συμπερασμάτων για τις απόλυτες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων παρ' όλα αυτά μπορούν να θεωρηθούν ανεκτές στην περίπτωση συγκριτικών μελετών μεταξύ διαφόρων ομάδων δοκιμίων.

Στη συγκεκριμένη εργασία για την αντιμετώπιση του προβλήματος υιοθετήθηκε μια νέα διαδικασία (δυστυχώς χρονοβόρα και επίπονη) η οποία επέτρεψε τον ακριβή προσδιορισμό των ποσοτήτων I_{ij} του φλοιώδους τμήματος εκάστου δοκιμίου. Όπως αναλυτικά περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4 η συγκεκριμένη διαδικασία περιλάμβανε εγκιβωτισμό ενός εκ των δύο θραυσμάτων των δοκιμίων σε ρητίνη, φωτογράφησή τους από στερεοσκόπιο, και επεξεργασία τους με το πρόγραμμα SolidWorks.

Ως αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας κατέστη εφικτός ο υπολογισμός για κάθε ένα από τα δοκίμια των ακριβών γεω-

μετρικών χαρακτηριστικών της διατομή θραύσης και φυσικά των ποσοτήτων I_{ij} .

Κατά τη διάρκεια της εργασίας ανέκυψε η επιπλέον δυσχέρεια του προσδιορισμού με ακρίβεια της σχετικής θέσης του άξονα φόρτισης ως προς το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων η φόρτιση εκ των πραγμάτων δεν ήταν κεντρική (ο άξονας φορτίου δεν διέρχεται από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής) και ως εκ τούτου δημιουργείται πέραν της καμπτικής ροπής και μια παρασιτική στρεπτική ροπή η οποία εκ των πραγμάτων δημιουργεί πέραν των ορθών τάσεων διατμητικές συνιστώσες οι οποίες σε αρκετές περιπτώσεις δεν είναι αμελητέες

Η επόμενη δυσχέρεια που ανέκυψε σχετίζεται με την έλλειψη οποιασδήποτε συμμετρίας της πραγματικής διατομής και επομένως η χρήση της τεχνικής θεωρίας Bernoulli-Euler στην απλή εκδοχή της δηλαδή της κάμψης δοκών με επίπεδα συμμετρίας δεν ήταν επιτρεπτή. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με την υιοθέτηση της τεχνικής θεωρίας κάμψης δοκών χωρίς επίπεδα συμμετρίας όπως περιγράφεται στις αναφορές [16,17].

Με βάση τα ανωτέρω υπολογίστηκε μια ισοδύναμη τάση θραύσης στην οποία συνεκτιμήθηκε η δράση τόσο της ορθής όσο και της διατμητικής συνιστώσας των τάσεων με την υιοθέτηση της θεωρίας Mises.

Ο υπολογισμός της ακριβούς τάσης θραύσης επέτρεψε μια συγκριτική αξιολόγηση των απλοποιητικών υποδειγμάτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως και κατέδειξε ότι ο βαθμός προσέγγισης της πραγματικότητας από αυτά δεν είναι, εν γένει, ικανοποιητικός. Οι διαφορές μεταξύ της πραγματικής τάσης θραύσης και της τάσης θραύσης που υπολογίζεται με τις δύο άλλες προσεγγίσεις φθάνει για ορισμένες ομάδες δοκιμίων ακόμα και το 25%. Αντίστοιχα η παράλειψη της δράσης της διατμητικής συνιστώσας δημιουργεί παραπάνω αποκλίσεις δεδομένου ότι η διατμητική τάση σε ορισμένες περιπτώσεις ισούται με το 6% της ορθής.

Συνεκτιμώντας τα ανωτέρω οδηγούμαστε αβιάστα στο συμπέρασμα ότι η εδώ περιγραφείσα διαδικασία προσδιορισμού της τάσης θραύσης αν και χρονοβόρα είναι αναγκαία ειδικά στην περίπτωση που ζητούμενο είναι ο προσδιορισμός της απόλυτης τιμής της αντοχής του οστίτη ιστού και όχι η συγκριτική αξιολόγηση ομάδων δοκιμίων.

5.5 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της μελέτης για την παρούσα Διπλωματική Εργασία προέκυψαν μια σειρά επί πλέον ερευνητικών ερωτημάτων που θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν σε μελλοντικές μελέτες.

Κατ' αρχήν για την καλύτερη εφαρμογή της μεθόδου που περιγράφηκε σε αυτή την εργασία προτείνεται η αυτοματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας και η προτυποποίησή της, καθώς και η αυτοματοποίηση της διαδικασίας προσδιορισμού του άξονα φόρτισης.

Σημαντική θα ήταν επίσης η μελέτη της επίδρασης του τρόπου στηριξης των οστών, ιδιαίτερα δε η εύρεση τρόπων εξάλειψης της στροφής του δοκιμίου, η οποία αναπόφευκτα παρατηρείται σε ορισμένα δοκίμια όταν αυτά έρχονται σε επαφή με το έμβολο φόρτισης λόγω ανατομικών ιδιομορφιών.

Κατά την επεξεργασία των φωτογραφιών από το στερεοσκόπιο υπήρχε αρκετές φορές δυσκολία στον σαφή καθορισμό του περιγράμματος της διατομής του δοκιμίου οπότε θα ήταν καλό να βρεθούν τρόποι ώστε το περίγραμμα να γίνει πιο ευδιάκριτο όπως με χρήση διαφορετικής ρητίνης ή κατάλληλο χρωματισμό της ρητίνης.

Δεδομένου ότι σε αρκετές περιπτώσεις δεν υπάρχει σαφές διαχωριστικό σύνορο μεταξύ φλοιώδους και σπογγώδους οστού αλλά μάλλον σταδιακή μετάβαση, προτείνεται η εύρεση ενός καλύτερου τρόπου προσδιορισμού του πάχους του φλοιώδους οστού.

Τέλος θα είχε μεγάλο ενδιαφέρον η σύγκριση της ακριβούς μεθόδου, η οποία παρουσιάστηκε στην εργασία αυτή και με τις άλλες προσεγγιστικές απλουστεύσεις για καλύτερη αξιολόγησή της.

Παράρτημα

Κώδικας MATLAB για τον υπολογισμό των ακτίνων των ομόκεντρων κύκλων [25].

```
% Code for the least squares fit of two concentric circles,  
% using two sets of points. (one for each circle)  
% Input the x and y coordinates of points you want to fit  
% into vectors.  
% Type a 0 as a fifth input if you want to plot it.  
function [c,r] = circfitcc(x,y,x1,y1,z)  
x=[] ;  
y=[];  
x1=[];  
y1=[];  
z=0;  
n=numel(x);  
for i=1:n  
A(i,1)= 2*x(i);  
A(i,2)=2*y(i);  
A(i,3)=1;  
A(i,4)=0;  
b(i,1) = (x(i))^2 + (y(i))^2;  
end  
N = numel(x1);  
for i=n+1:n+N
```

```

k = i-n(1);
A(i,1)= 2*x1(k);
A(i,2)=2*y1(k);
A(i,3)=0;
A(i,4)=1;
b(i,1) = (x1(k))^2 + (y1(k))^2;
end
C = A\b;
c = [C(1),C(2)];
r1 = sqrt(C(3)+(C(1))^2 + (C(2))^2)
r2 = sqrt(C(4)+(C(1))^2 + (C(2))^2)
if nargin == 5
%plot the least squares concentric circles and the original points
t1 = 0:0.1:6.3;
x2=c(1) + r1*cos(t1);
y2=c(2) + r1*sin(t1);
x3=c(1) + r2*cos(t1);
y3=c(2) + r2*sin(t1);
plot(x3,y3,x2,y2,x1,y1,p,x,y,p), axis equal
end
%Returns the radius of the circles, r1 and r2
% and the x and y coordinates of the center.

```

Βιβλιογραφία

1. Martin, R.B. *A Genealogy of Biomechanics*. University of Pittsburgh, October 23 1999.
2. Borelli, G.A., *De Motu Animalium*. 1 January 1680.
3. Snell, R.S., *Clinical Anatomy by Regions*. 8th Edition ed, ed. W. Kluwer: Wolters Kluwer.
4. Zioupos P, Currey JD, Hamer AJ. *The role of collagen in the declining mechanical properties of aging human cortical bone*. J Biomed Mater Res 1999; 45(2):108-116.
5. Wang X, Bank RA, TeKoppele JM, Agrawal CM. *The role of collagen in determining bone mechanical properties*. J Orthop Res 2001; 19(6):1021-1026.
6. Hasegawa K, Turner CH, Burr DB. *Contribution of collagen and mineral to the elastic anisotropy of bone*. Calcif Tissue Int 1994; 55:381-386.
7. Wikipedia, *Bone Marrow*.
8. Reddy, S., M. Dischino, and L.J. Soslowsky, *Biomechanics - Part I Bone Pathology*, J.S. Khurana, Editor. 2009, Humana Press. p. 61-68.
9. Yuehuei, A., *Mechanical Properties of Bone*, in *Mechanical Testing of Bone and the Bone-Implant Interface*. 1999, CRC Press. p. 41-63.
10. Samuel, S.P. et al., *Biomechanics – Part II Bone Pathology*, J.S Khurana, Humana Press. p. 69-77
11. An YH, Draughn RA (1999). *Mechanical testing of bone*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
12. Turner CH, Burr DB. *Basic Biomechanical measurements of bone: A Tutorial*. Bone 1993; 14:595-608.
13. Carter DR, Hayes WC. *Bone compressive strength: the influence of density and strain rate*. Science 1976; 194:1174-1176.
14. Γιαννακόπουλος, Χ.Κ., *Αρχές Εμβιομηχανικής των Οστών*. Οστούν, 2007. (2007) 18 (1): 11-17: p. 11-17.
15. Bagi, C.M., et al., *Morphological and structural characteristics of the proximal femur in human and rat*. Bone, 1997. 21(3): p. 261-267.

16. Timoshenko, S., *Strength of Materials*. 1986: Delhi : CBS Publishers & Distributors.
17. Timoshenko, S., *Strength of Materials*. 1940, Van Nostrand Company, Inc.
18. Peng, Z., et al., *The mechanical strength of bone in different rat models of experimental osteoporosis*. *Bone*, 1994. 15(5): p. 523-532.
19. Simkin, A. and G. Robin, *The mechanical testing of bone in bending*. *Journal of Biomechanics*, 1973. 6(1): p. 31-39.
20. Leppanen, O., et al., *Three-point bending of rat femur in the mediolateral direction: introduction and validation of a novel biomechanical testing protocol*. *J Bone Miner Res*, 2006. 21(8): p. 1231-7.
21. Brzóska, M., K. Majewska, and J. Moniuszko-Jakoniuk, *Mechanical Properties of Femoral Diaphysis and Femoral Neck of Female Rats Chronically Exposed to Various Levels of Cadmium*. *Calcified Tissue International*, 2005. 76(4): p. 287-298.
22. Panjabi, M.M., et al., *Biomechanical time-tolerance of fresh cadaveric human spine specimens*. *J Orthop Res*, 1985. 3(3): p. 292-300.
23. www.chem.uoa.gr/applets/AppletTtest/Appl_Ttest1.html.
24. www.ohio.edu/people/bayless/seniorlab/chauvenet.pdf.
25. Cakounes, K., Ross, A., *An Exploration of Coordinate Metrology*. August 5 2009, p. 7-9.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

**“ΚΑΜΨΗ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΜΗΡΙΑΙΩΝ ΟΣΤΩΝ ΤΡΩΚΤΙΚΩΝ:
ΑΚΡΙΒΗΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ”**

Μέρος Α: Πειραματικό πρωτόκολλο

Μέρος Β: Αξιολόγηση και επεξεργασία πειραματικών δεδομένων

Διπλωματική εργασία στην επιστημονική περιοχή της Εμβιομηχανικής

Ανδριακοπούλου Η. Χαριτίνη

Κούβακα Ν. Άρτεμις

Επιβλέπων Καθηγητής

Δρ. Σ.Κ. Κουρκουλής

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2012

Εξεταστική επιτροπή

- Σταύρος Κ. Κουρκουλής, Αναπληρωτής Καθηγητής
Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου
(Επιβλέπων)
- Ισμήνη Δοντά, Καθηγήτρια Ιατρικής Σχολής Εθνικού
Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών
- Δημήτρης Ευταξιοπούλος, Επίκουρος Καθηγητής
Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Αφιερώνουμε την εργασία μας στις οικογένειές μας

Ευχαριστίες

Πρώτα από όλους θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον καθηγητή και δάσκαλό μας Δρα Κορκοπή Σταύρο που μας εισήγαγε στο γνωστικό πεδίο της Εμβιομηχανικής και μας έδωσε την ευκαιρία να εκπονήσουμε την Διπλωματική Εργασία μας σ' αυτόν τον κλάδο. Ως επιβλέπων μας ήταν πάντα πρόθυμος και διαθέσιμος να μας προσφέρει βοήθεια και καθοδήγηση.

Θέλουμε πολύ να πούμε ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Δρα Χατζηστέργο Παναγιώτη, διδάκτορα του Τομέα Μηχανικής, η βοήθεια του οποίου στο τεχνικό κομμάτι της εργασίας μας ήταν ανεκτίμητη.

Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την Πολιτικό Μηχανικό κυρία Πάσιου Ερμιόνη, υποψήφια διδάκτορα του Τομέα Μηχανικής, για την πολύτιμη βοήθειά της στη διόρθωση της εργασίας.

Ευχαριστούμε πολύ τη Σχολή Ναυπηγών Μηχανικών του ΕΜΠ και ιδιαίτερα τον Καθηγητή κ. Δ.Παντελή, Διευθυντή του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας για την ευγενική άδεια χρήσης εγκαταστάσεων και εξοπλισμού του εργαστηρίου καθώς και την Χημικό Μηχανικό του εργαστηρίου κυρία Μπουγιούρη Βέρα.

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την κυρία Πετσεπέ Δεσποίνα, απόφοιτη της ΣΕΜΦΕ/ΕΜΠ, η οποία μας πρόσφερε χρήσιμες συμβουλές στο πρόβλημα του ορθού εγκιβωτισμού των δοκιμίων σε ρητίνη, και τον Δρα Μητουσούδη Αθανάσιο για την συνολική υποστήριξή του σε πειραματικά θέματα.

Τέλος, ευχαριστούμε τον κύριο Κούβακα Νικόλαο για την καλλιτεχνική επιμέλεια του εξώφυλλου.

Πρόλογος

Η Εμβιομηχανική είναι η επιστήμη που δημιουργήθηκε από την εξερεύνηση των ζωντανών συστημάτων εφαρμόζοντας τις αρχές διαφόρων κλάδων της μηχανικής (στατική, κινηματική, δυναμική, αντοχή των υλικών, ελαστικότητα, πλαστικότητα, ρεολογία, μηχανική του συνεχούς μέσου, μηχανική των ρευστών, πειραματική μηχανική). Η Εμβιομηχανική έχει ευρύ φάσμα εφαρμογών σε τομείς όπως η κινησιολογία, ο κλάδος της ορθοπεδικής και της χειρουργικής, ο αθλητισμός και η σχεδίαση ιατρικών εμφυτευμάτων. Εμβιομηχανικοί και ιατροί συνεργάζονται για να πετύχουν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα για τον ασθενή.

Τα οστά είναι υλικά ανισότροπα, σύνθετα, ιξωδοελαστικά και με περίπλοκη γεωμετρία. Επίσης οι μηχανικές τους ιδιότητες εξαρτώνται από την κατάσταση που βρίσκονται και τις συνθήκες διατήρησής τους. Συνεπώς η κλασική θεωρία μηχανικής είναι πολύ δύσκολο να εφαρμοστεί. Οι ερευνητές κάνουν διάφορες παραδοχές για να προσεγγίσουν τη γεωμετρία της διατομής των οστών. Συνήθη μοντέλα είναι η θεώρηση κυκλικής διατομής (δακτυλιοειδή) και η θεώρηση ελλειπτικής διατομής.

Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η σύγκριση των τάσεων που προκύπτουν από τρεις προσεγγίσεις (ακριβής προσέγγιση, προσέγγιση δακτυλιοειδής διατομής με χρήση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων και προσέγγιση ελαχίστου πάχους).

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και ο προσδιορισμός χαρακτηριστικών μηχανικών ιδιοτήτων και γεωμετρικών μεγεθών του μηριαίου οστού επιμύων υπό κάμψη τριών σημείων καθώς και η σύγκριση και αξιολόγηση διαφορετικών τρόπων εύρεσης της τάσης θραύσης. Ειδικότερα, έγινε σύγκριση των τάσεων που προκύπτουν από τη θεώρηση της ακριβούς διατομής του οστού, τη θεώρηση διατομής του βέλτιστου κυκλικού δακτυλίου και τη θεώρηση κυκλικού δακτυλίου με πάχος το ελάχιστο του κάθε οστού. Οι τάσεις αποτελούν βασικό μέγεθος καθώς είναι το μέτρο της αντοχής του οστού ως υλικό, απαλλαγμένο από άλλους παράγοντες.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν 173 μηριαία οστά θηλυκών επιμύων, τα οποία υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων (πλαίσιο φόρτισης MTS INSIGHT). Η φόρτιση έγινε με αργό ρυθμό (quasi-static) και η κατανομή των τάσεων θεωρήθηκε ακτινική. Παράλληλα έγινε χρήση οπτικού μηκυνσιομέτρου (RTSS_HR VideoExtensometer, Limes) ώστε να εξασφαλιστεί ο ακριβής προσδιορισμός του βέλους κάμψης.

Στην συνέχεια το ένα από τα δύο θραύσματα εγκιβωτίστηκε σε ρητίνη και λειάνθηκε ώστε να καταγραφεί η πλήρης μορφή της διατομής. Η επεξεργασία των εικόνων που λήφθη-καν από στερεοσκόπιο επεξεργάστηκαν με το λογισμικό Solidworks ώστε να προσδιοριστούν τα παρακάτω μεγέθη:

- Το γεωμετρικό κέντρο της διατομής
- Ο άξονας φόρτισης και η εκκεντρότητά του ως προς το γεωμετρικό κέντρο
- Το εμβαδόν της διατομής αστοχίας
- Η εσωτερική και εξωτερική ακτίνα
- Το μέσο και το ελάχιστο πάχος διατομής
- Το κύριο σύστημα αναφοράς
- Οι επιφανειακές ροπές δευτέρας τάξης του κυρίου συστήματος
- Ο ουδέτερος άξονας
- Το σημείο αστοχίας του υλικού

Με τη βοήθεια των παραπάνω μεγεθών κατέστη δυνατός ο υπολογισμός της ακριβούς τάσης αστοχίας των οστών και η σύγκρισή της με άλλες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται συχνά σε επιστημονικές μελέτες ιατρικού και εμβιομηχανικού ενδιαφέροντος.

Η παρούσα μελέτη κατέδειξε ότι η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον ακριβή προσδιορισμό της τάσης θραύσης κρίνεται απαραίτητη καθώς παρατηρήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις σε σχέση με τις προσεγγιστικές μεθόδους που αξιολογήθηκαν.

Abstract

The present study's aim is the calculation and investigation of the mechanical and geometrical characteristics of the rats' femur bone under three-point bending, as well as the comparison and evaluation of different approximations for the fracture stress. In particular, the stresses that were found by the bone's actual section outline assumption, the circular ring of average thickness approximation and the circular ring of minimum thickness approximation were compared. The stresses are a basic index of the strength of the bone as a material, free of other factors.

For this purpose 173 female rats' femoral bones were subjected to three-point bending (load frame MTS INSIGHT). The loading was quasi-static and the stress distribution was considered as radial. Simultaneously, the exact deflection of the bone was calculated with the use of an optical extensometer (RTSS_HR VideoExtensometer, Limes).

Subsequently, one of the two broken fragments of the bone was put into resin and was polished to acquire the exact form of the cross section. The processing of the images taken with the stereoscope was done with the SolidWorks software and the following characteristics were determined:

- The cross section's geometrical centre
- The loading axis and the eccentricity as to the geometrical centre
- The cross section's area
- The inner and outer radius
- The mean and minimum thickness of the cross section
- The second order moments of the principal system
- The neutral axis
- The failure point of the material

Through these characteristics it was possible to calculate the accurate fracture stress of the bones and compare it to other approximations that are commonly used in biomechanical and medical studies.

The present study demonstrated that the accurate stress calculation procedure is necessary, as there were substantial deviations from the approximate methods that were evaluated.

Τόμος II

Σημείωση

Ο παρών τόμος αποτελεί συνέχεια της εργασίας για απονομή του τίτλου του διπλωματούχου με θέμα: 'Κάμψη τριών σημείων μηριαίου οστού τρωκτικών με χρήση οπτικών μεθόδων: Ακριβής προσδιορισμός της τάσης θραύσεως'.

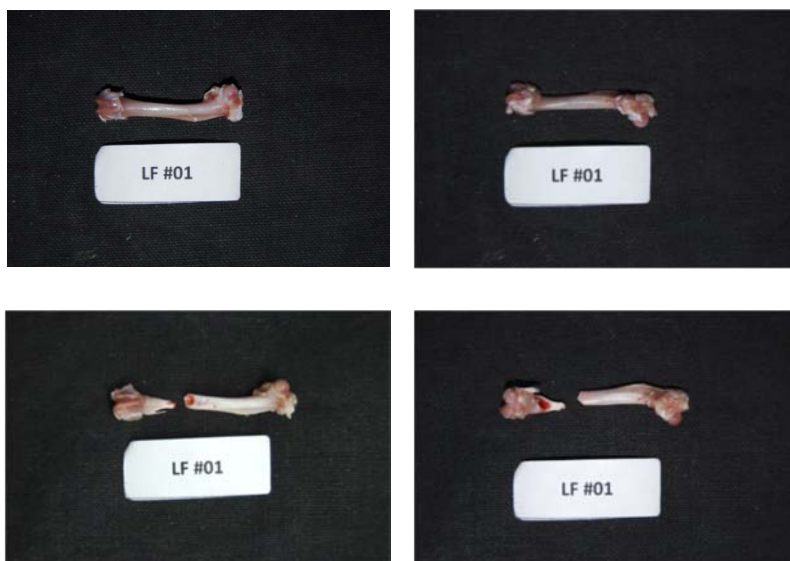
Ακολουθούν όλα τα πρωτογενή και δευτερογενή δεδομένα του κάθε δοκιμίου αναλυτικά κατά αύξοντα αριθμό κωδικής ονομασίας.

Κωδικός δοκιμίου: LF1

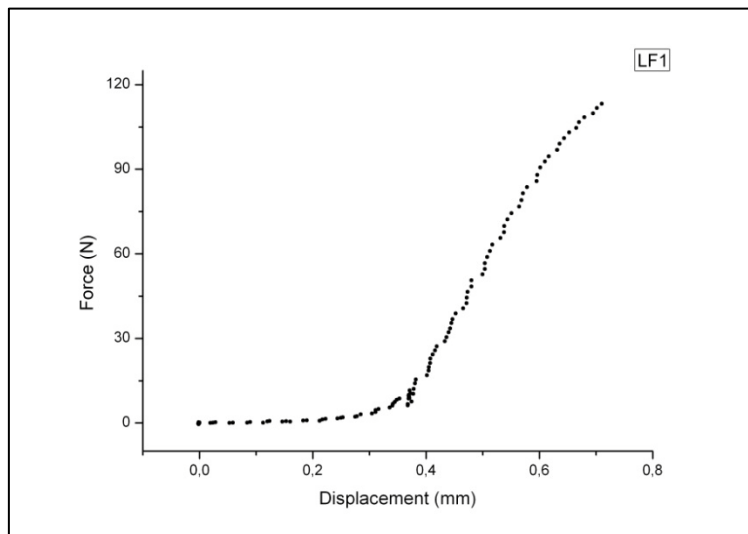
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης: 24/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 5/10/2011



Εικόνα 1: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF1 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 1: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF1

Μέγιστο φορτίο: 114,92N

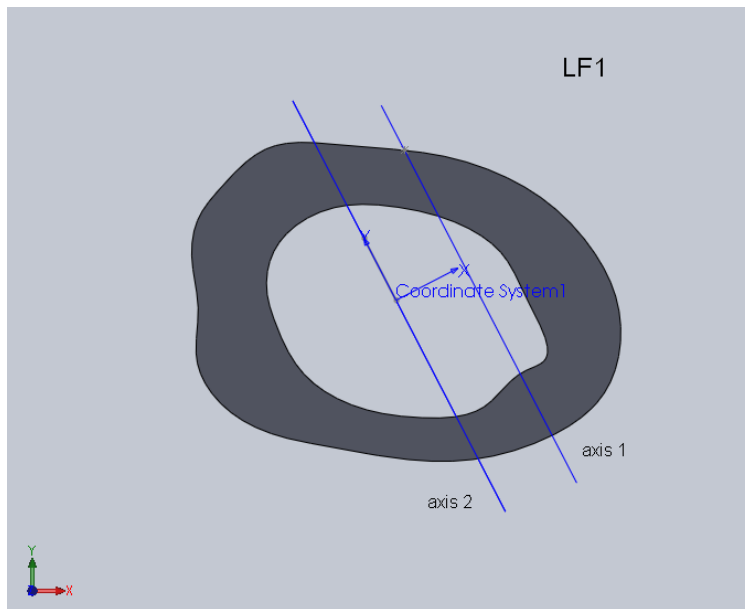
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,71mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 23,4mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.



Εικόνα 2: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής κοντά στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF1. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης του δοκιμίου στα 10N.



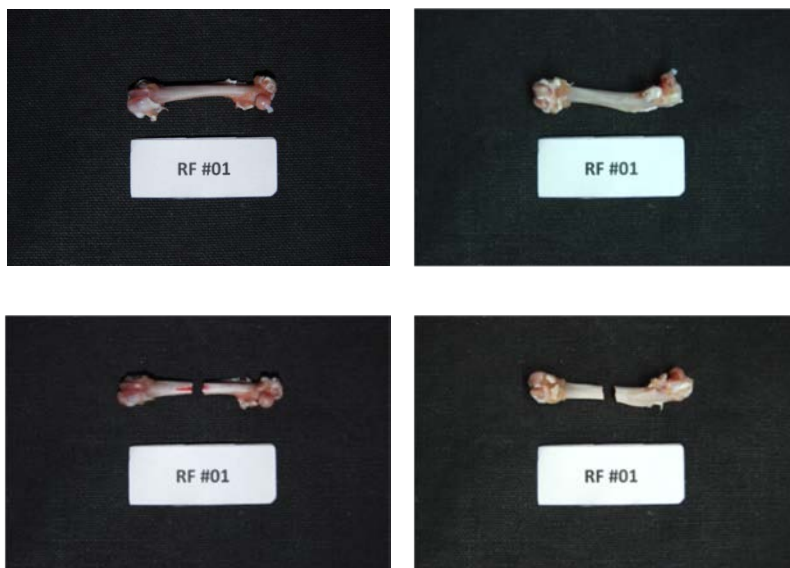
Εικόνα 3: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) κοντά στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF1 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF1

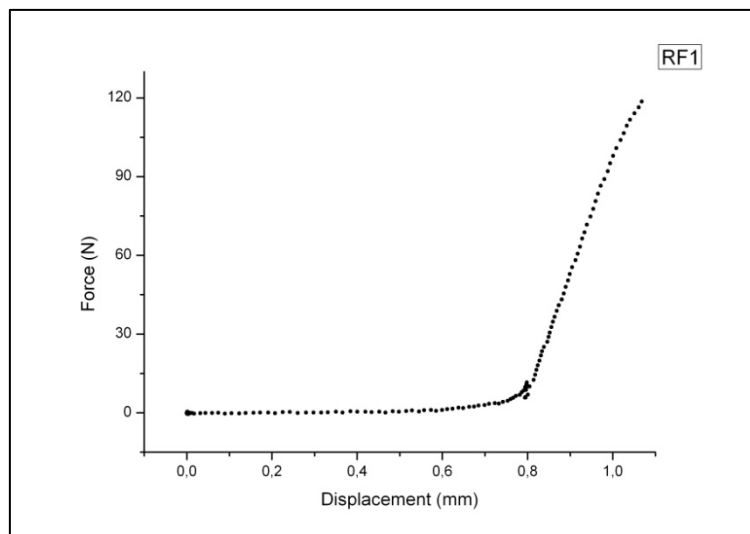
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης: 24/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 5/10/2011



Εικόνα 4 : Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF1 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

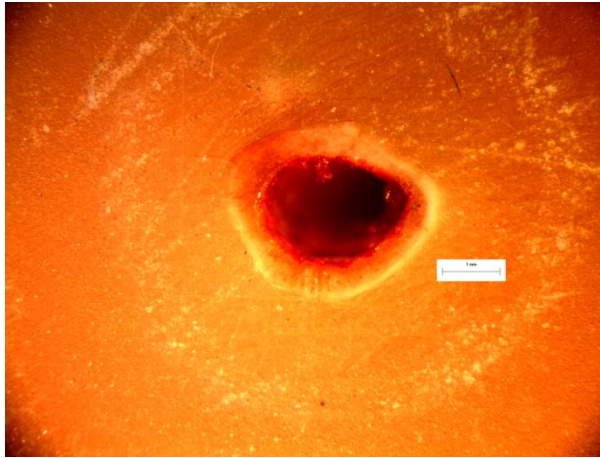


Γράφημα 2 : Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF1

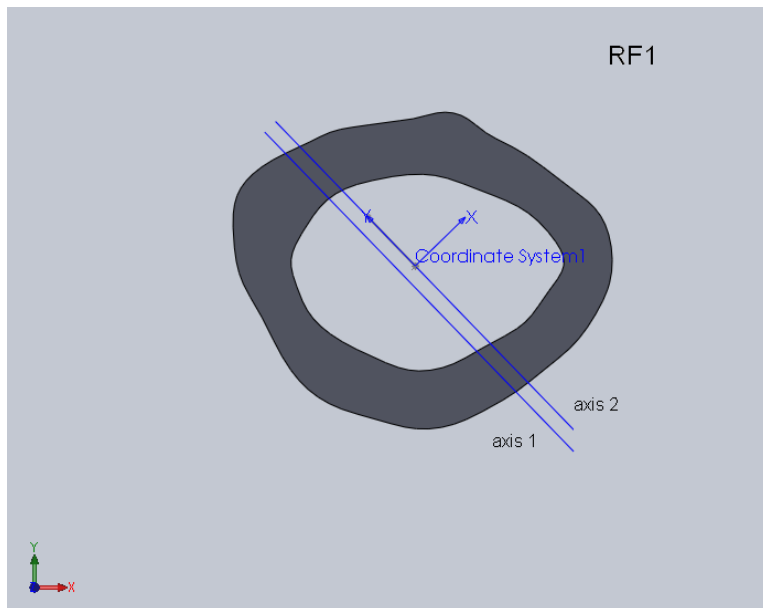
Μέγιστο φορτίο: 120,58N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 1,07mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 18,8mJ



Εικόνα 5: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF1.



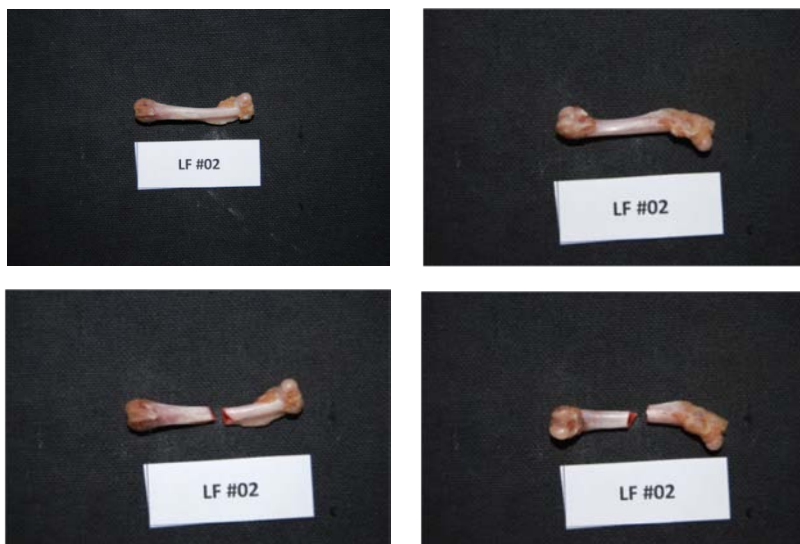
Εικόνα 6: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF1 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF2

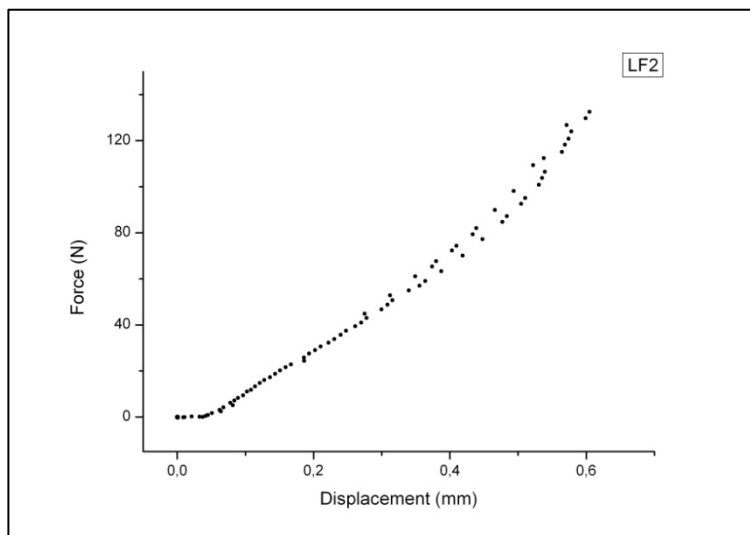
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης: 24/4/2010

Απεβίωσε: 22/6/2011



Εικόνα 7 : Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF2 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



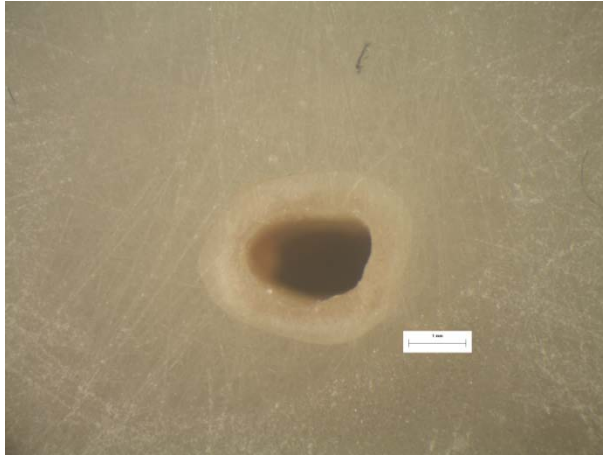
Γράφημα 3: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF2

Μέγιστο φορτίο: 135,64N

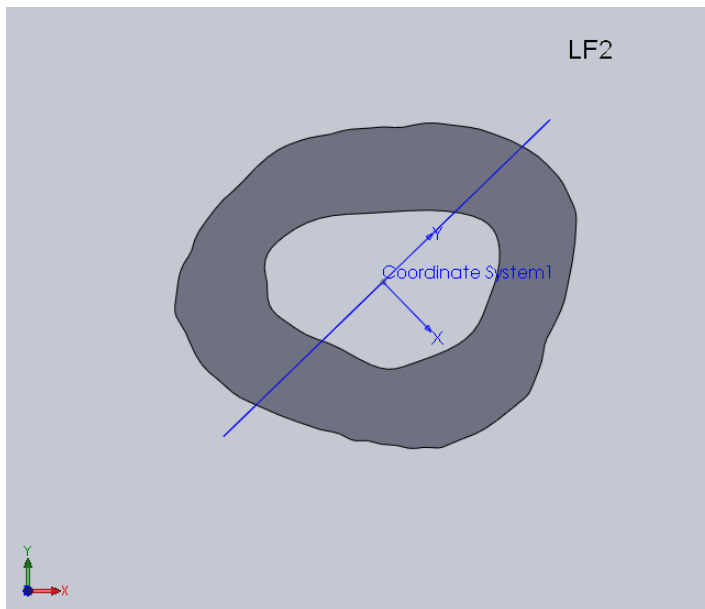
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,60mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 32,0mJ

Παρατηρήσεις: Το πειραματόζωο απεβίωσε 105 μέρες πριν την προβλεπόμενη ημερομηνία ευθανασίας. Μετά τα 50N παρατηρούμε στο διάγραμμα μία μικρή διασπορά των σημείων επειδή “έπαιζε” η γραμμή αναφοράς.



Εικόνα 8: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF2



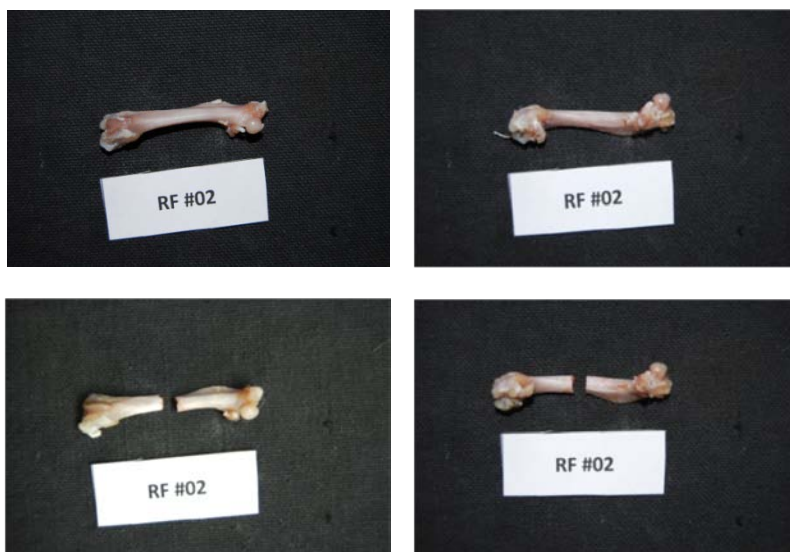
Εικόνα 9: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF2 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Σε αυτό το δοκίμιο δεν είχε σημειωθεί το σημείο φόρτισης.

Κωδικός δοκιμίου: RF2

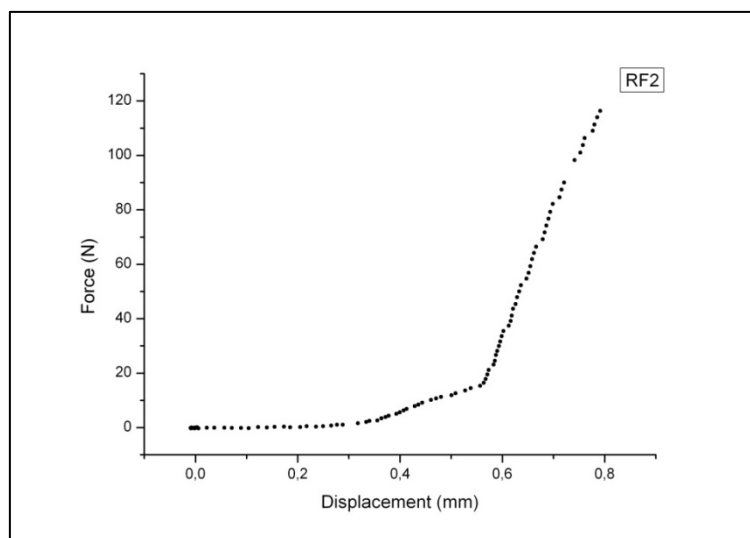
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης: 24/4/2010

Απεβίωσε: 22/6/2011



Εικόνα 10: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF2 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



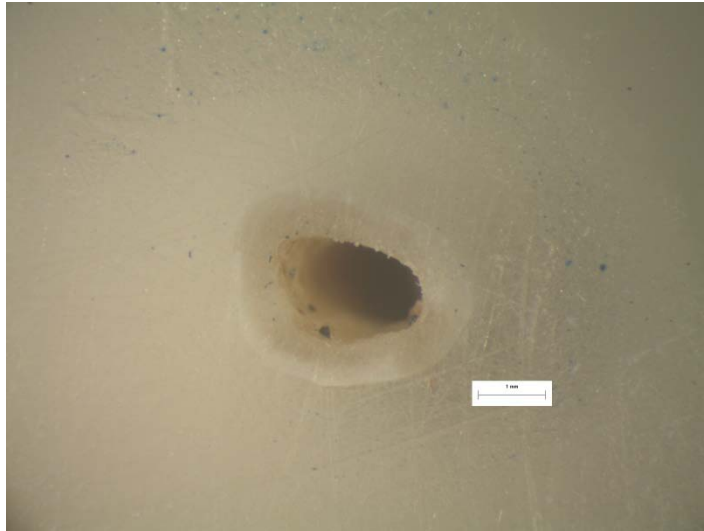
Γράφημα 4: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF2

Μέγιστο φορτίο: 120,37 N

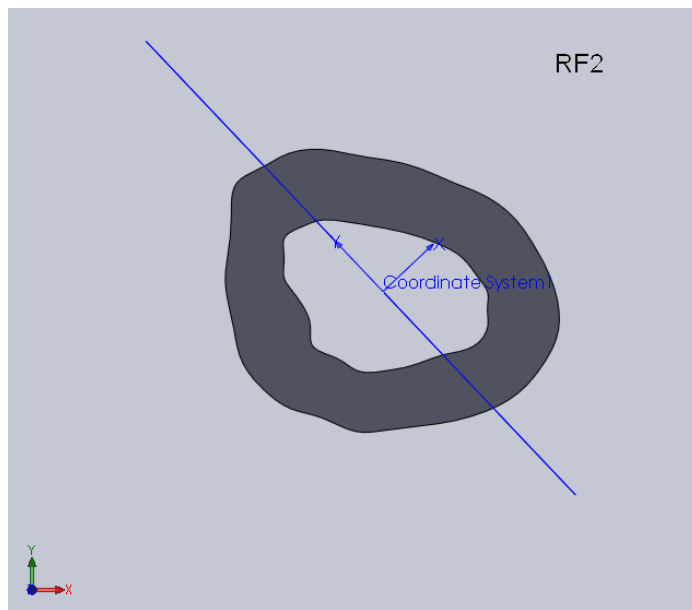
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,79 mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 17,8mJ

Παρατηρήσεις: Το πειραματόζωο απεβίωσε 105 μέρες πριν την προβλεπόμενη ημερομηνία ευθανασίας.



Εικόνα 11: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF2.



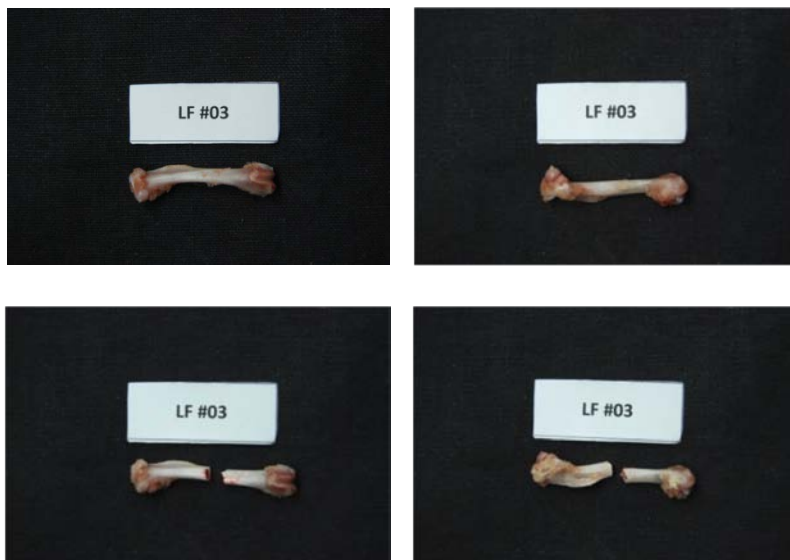
Εικόνα 12: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF2 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Σε αυτό το δοκίμιο δεν είχε σημειωθεί το σημείο φόρτισης.

Κωδικός δοκιμίου: LF3

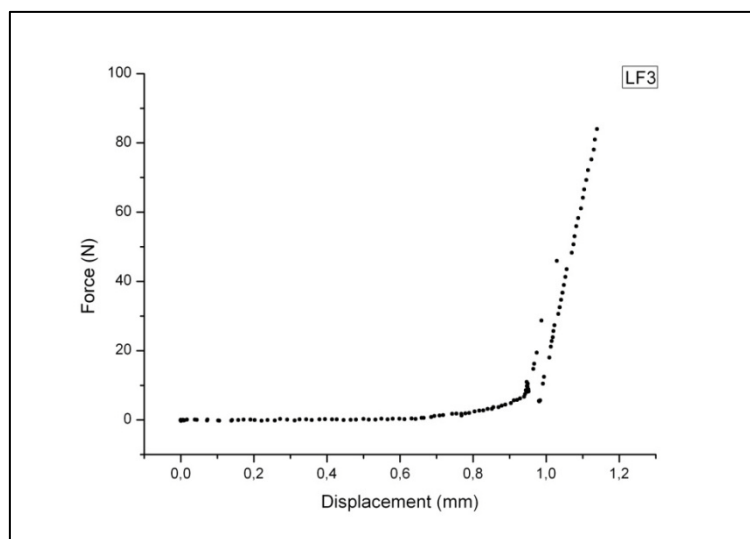
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης: 24/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 5/10/2011



Εικόνα 13: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF3 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 5: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF3

Μέγιστο φορτίο: 89,33 N

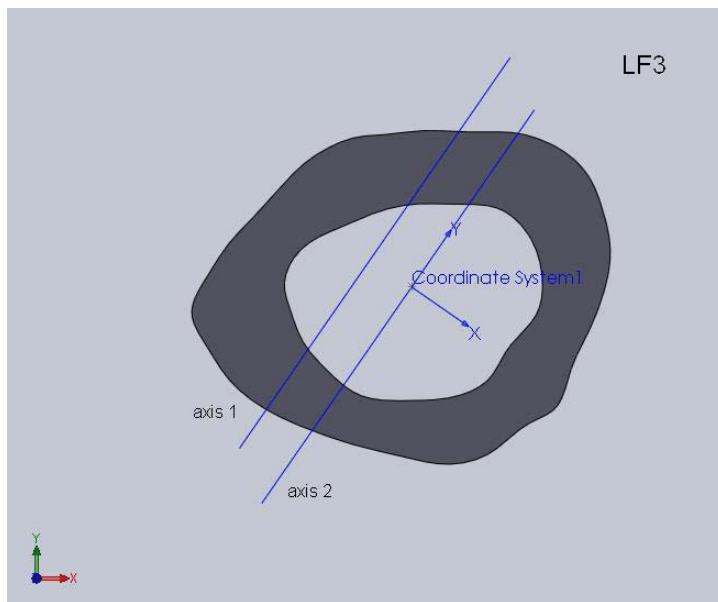
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 1,14 mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 8,2mJ

Παρατηρήσεις: Κατά τη φόρτιση του δοκιμίου «έπαιξε» η γραμμή αναφοράς.



Εικόνα 14: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF3. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



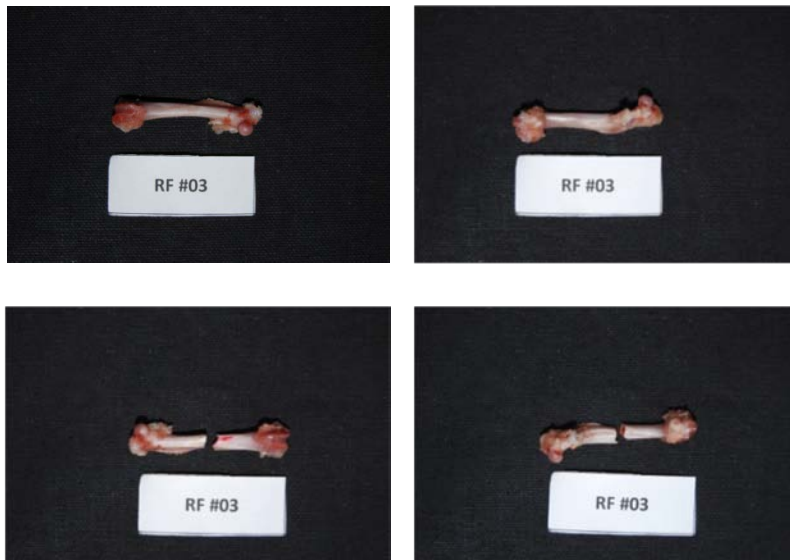
Εικόνα 15: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF3 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF3

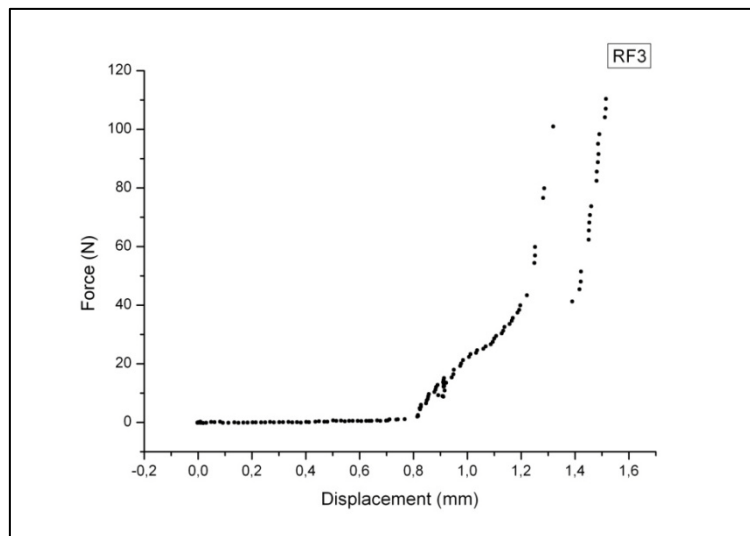
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης: 24/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 5/10/2011



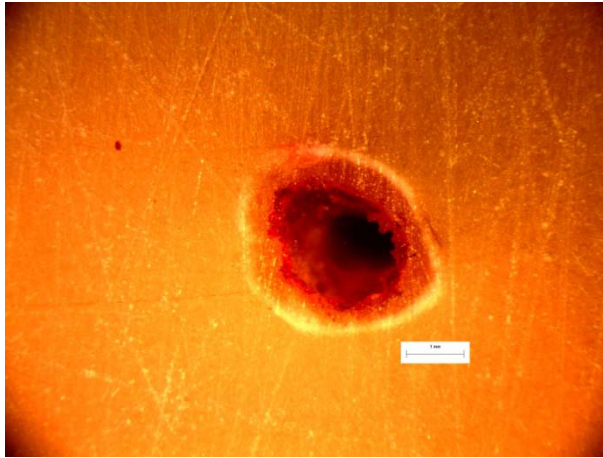
Εικόνα 16 : Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF3 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



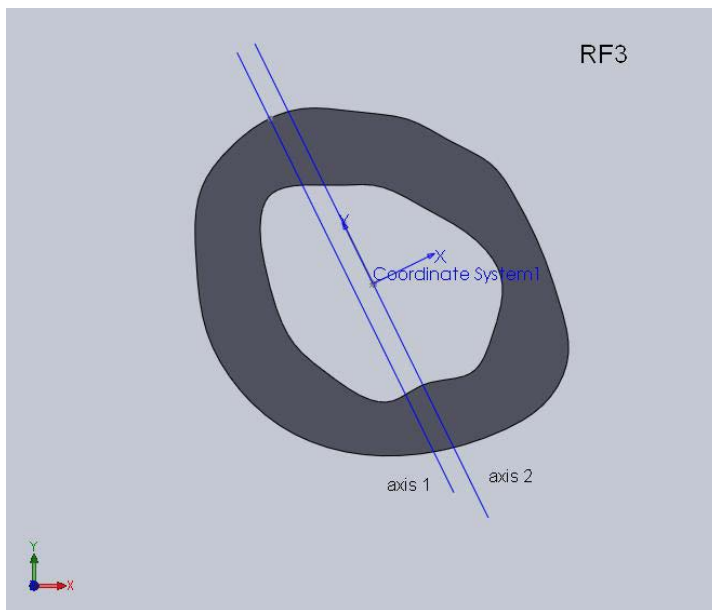
Γράφημα 6: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF3

Μέγιστο φορτίο: 114,4 N

Παρατηρήσεις: Μετά τα 41N παρατηρούμε στο διάγραμμα διασπορά των σημείων επειδή “έπαυξε” η γραμμή αναφοράς.



Εικόνα 17: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF3.



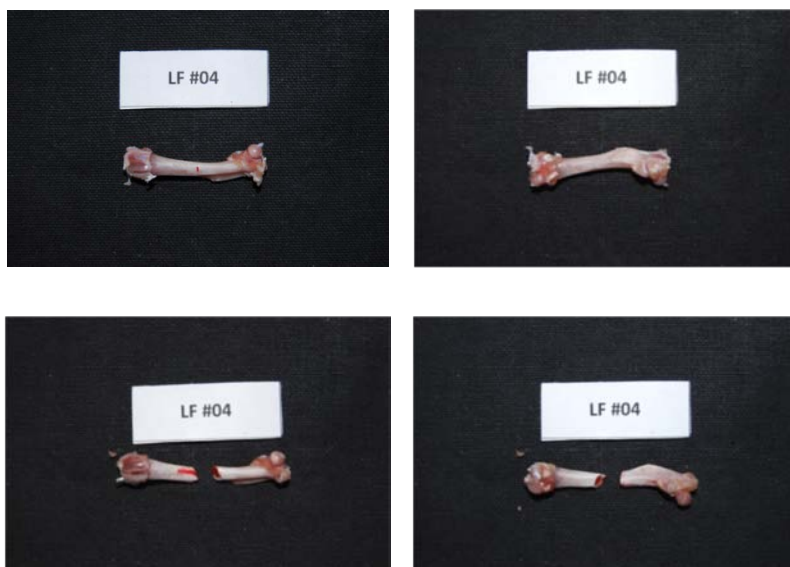
Εικόνα 18: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF3 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF4

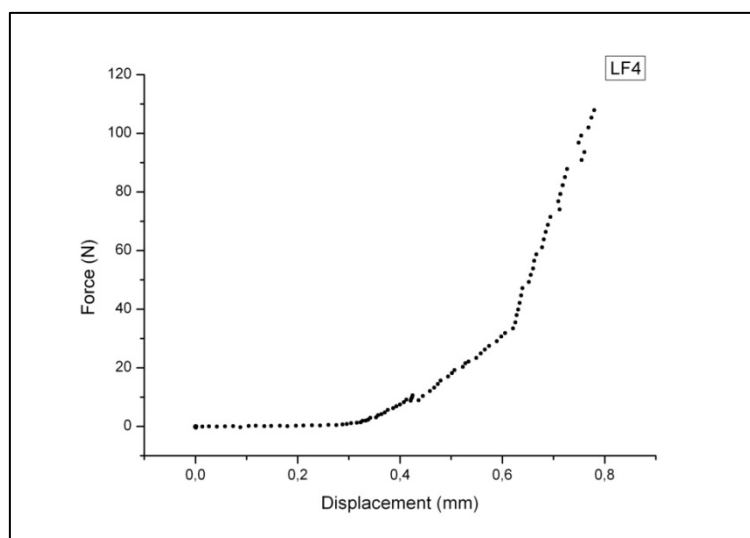
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης: 24/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 5/10/2011



Εικόνα 19: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF4 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

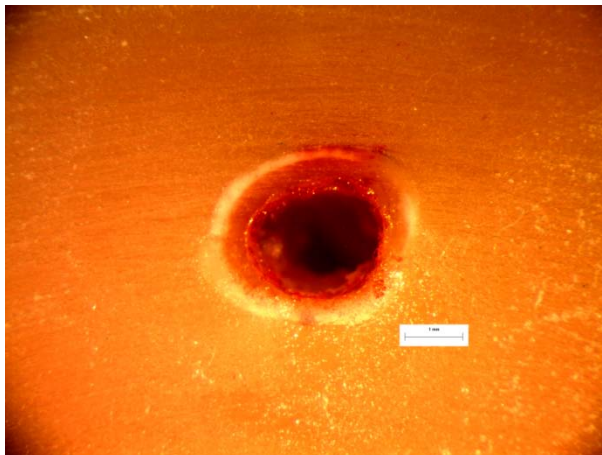


Γράφημα 7: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF4

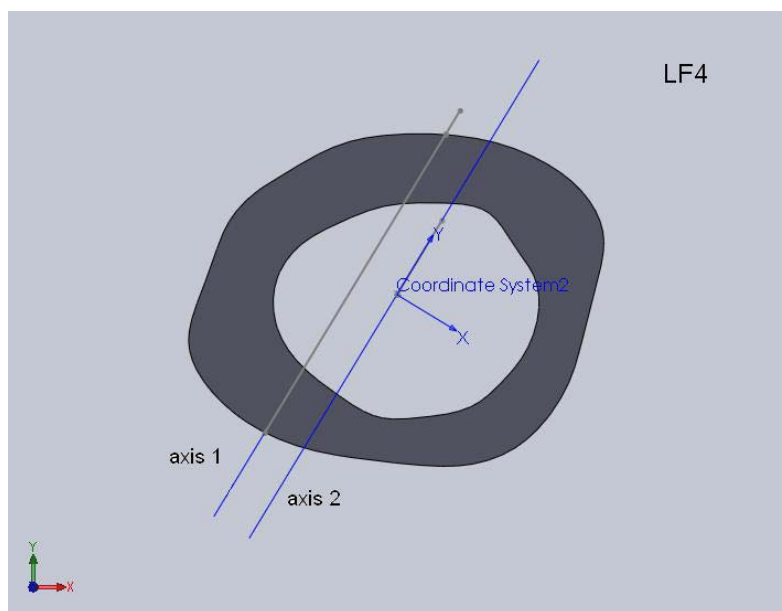
Μέγιστο φορτίο: 110,24 N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,78 mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 16,2mJ



Εικόνα 20: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF4. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 21: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF4 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF4

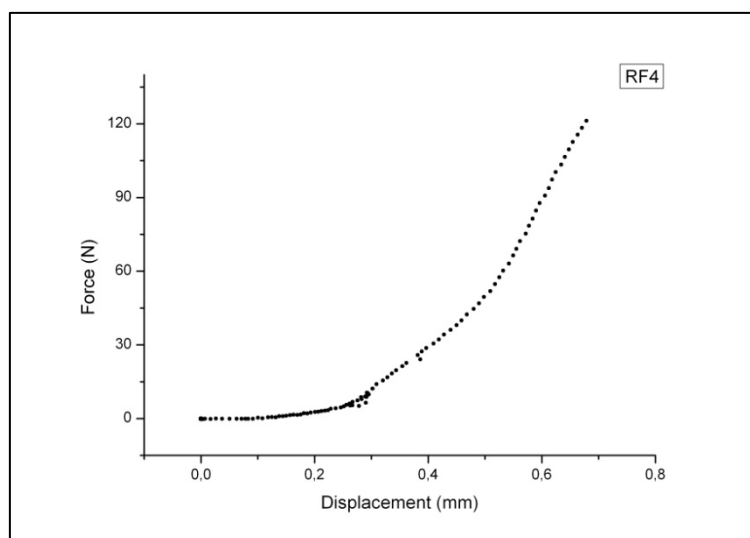
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης: 24/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 5/10/2011



Εικόνα 22: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF4 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 8: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF4

Μέγιστο φορτίο: 124,24 N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,68 mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 21,6mJ

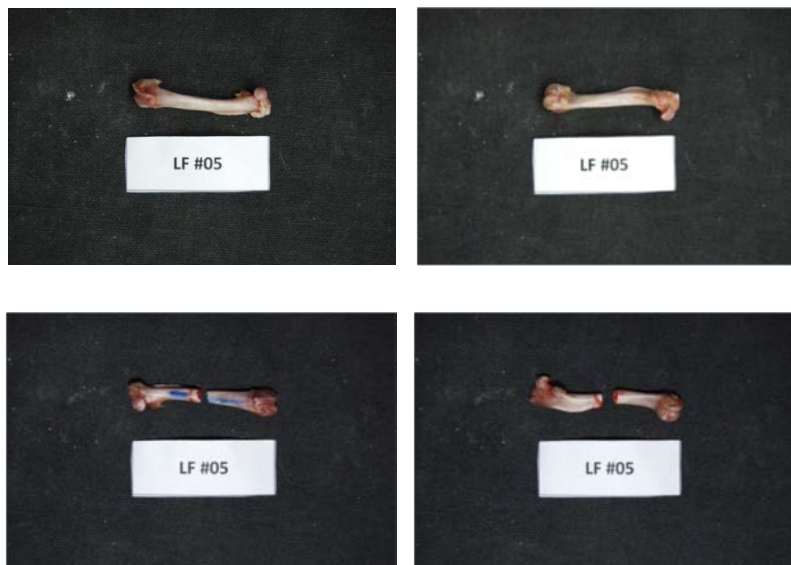
Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.

Κωδικός δοκιμίου: LF5

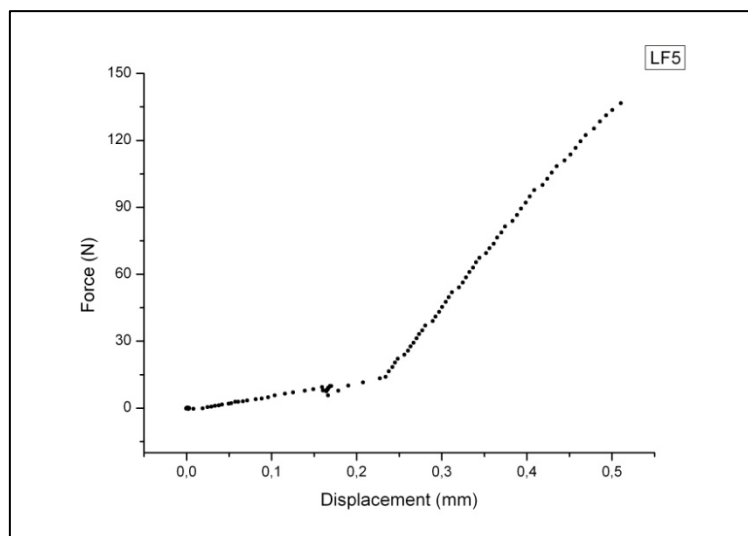
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 25/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 3/10/2011



Εικόνα 23: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF5 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 9: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF5

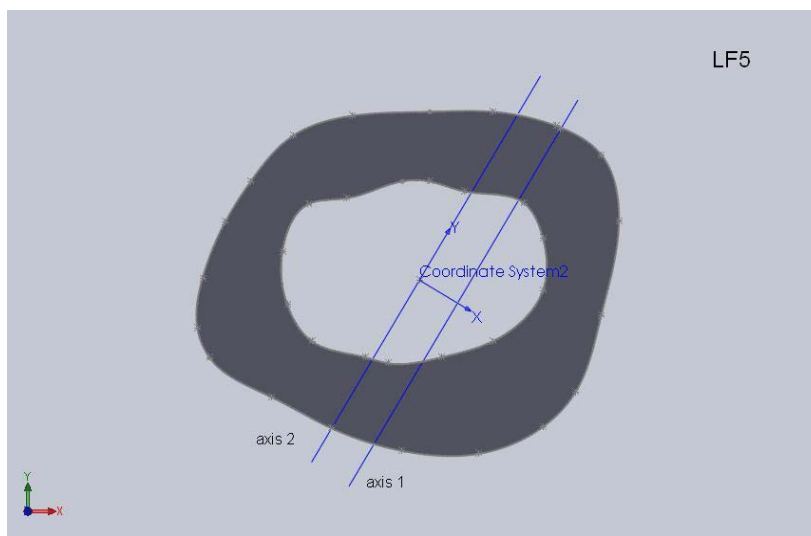
Μέγιστο φορτίο: 140,78 N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,51mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 23,1mJ



Εικόνα 24: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF5. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



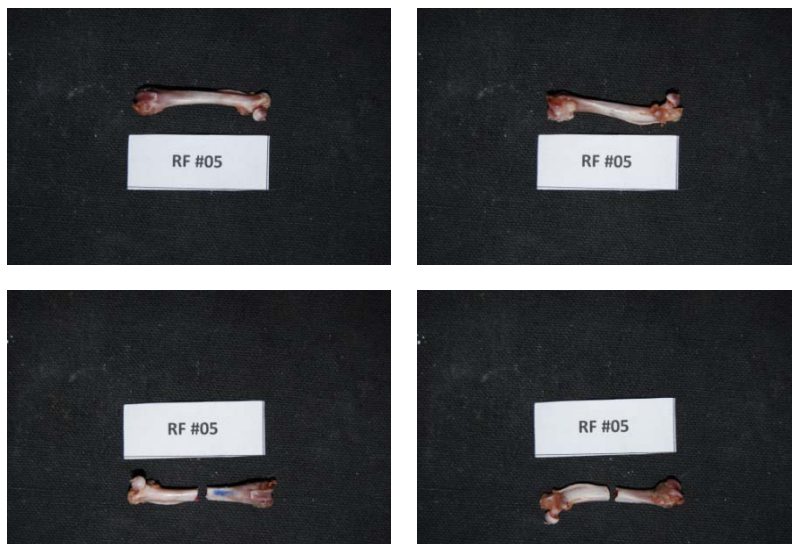
Εικόνα 25: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF5 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF5

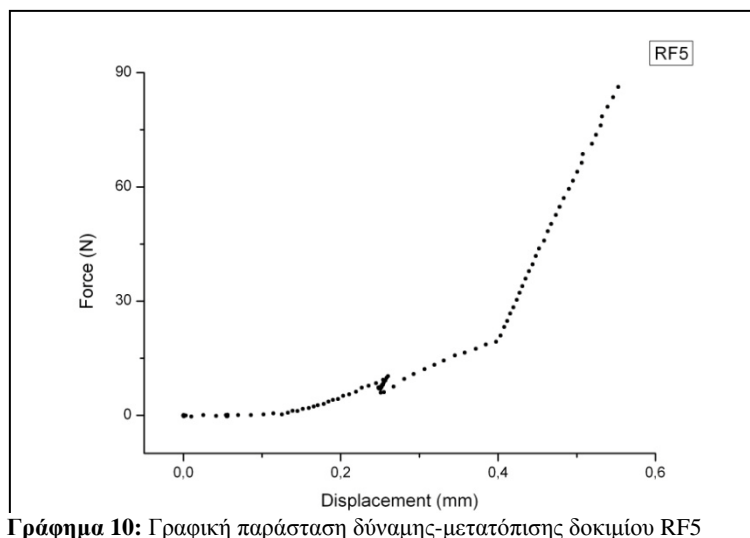
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 25/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 3/10/2011



Εικόνα 26: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF5 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 10: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF5

Μέγιστο φορτίο: 89,78 N

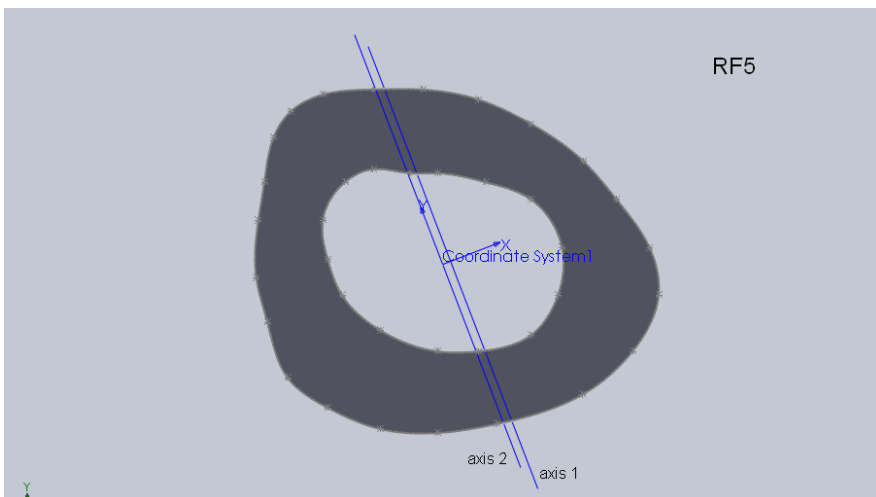
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,55mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 10,7mJ

Παρατηρήσεις: Μεγάλη απόκλιση του φορτίου αστοχίας για τα οστά του ίδιου πειραματόζωου.



Εικόνα 27: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF5. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



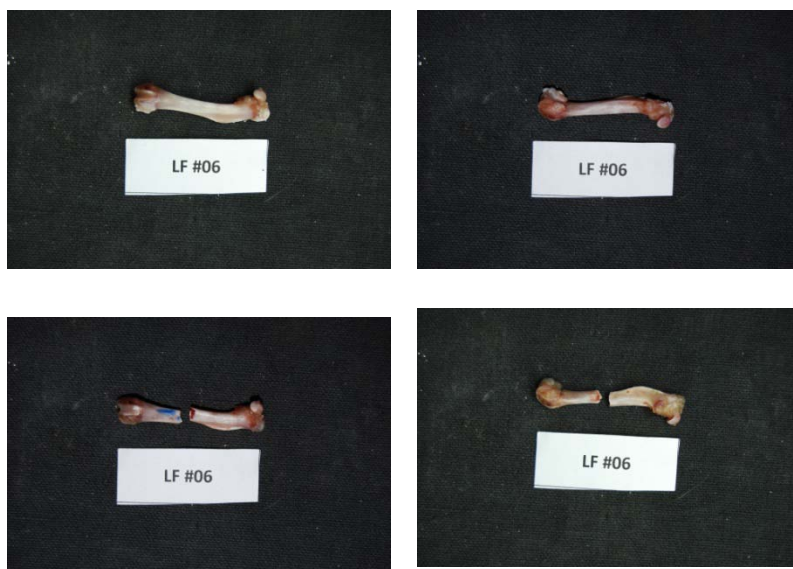
Εικόνα 28: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF5 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF6

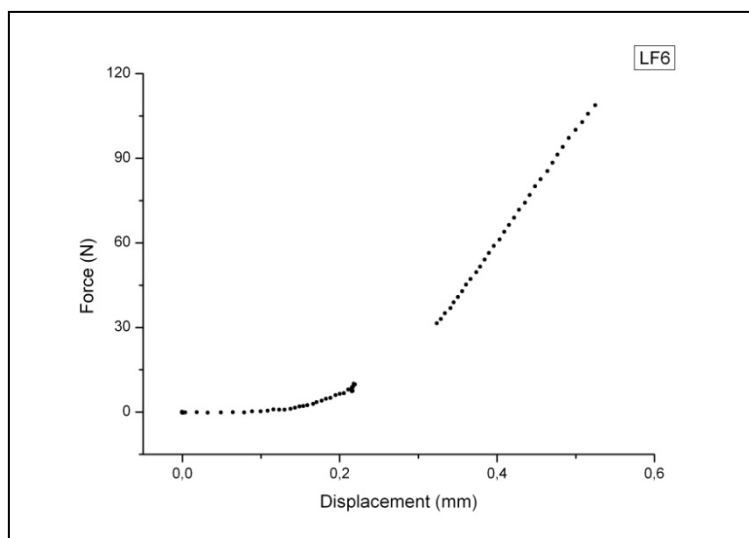
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 25/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 3/10/2011



Εικόνα 29: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF6 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 11: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF6

Μέγιστο φορτίο: 113,18 N

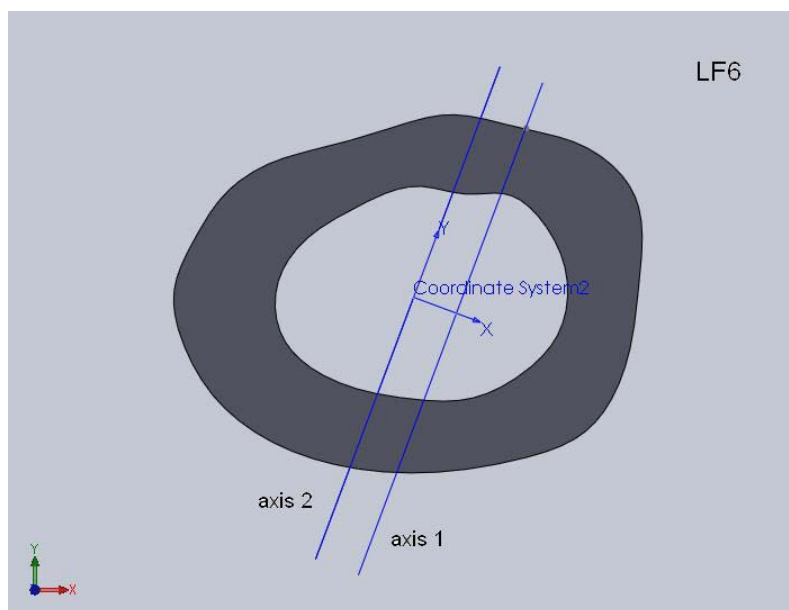
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,52 mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 16,5 mJ

Παρατηρήσεις: Κατά την διάρκεια της προφόρτισης χάθηκε η γραμμή αναφοράς και για αυτό λείπουν κάποια σημεία από το γράφημα.



Εικόνα 30: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF6. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης του δοκιμίου στα 10N.



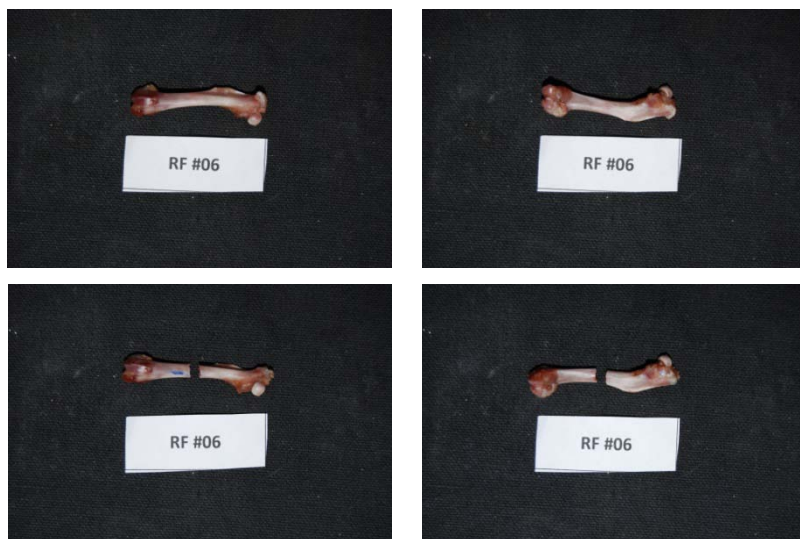
Εικόνα 31: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF6 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF6

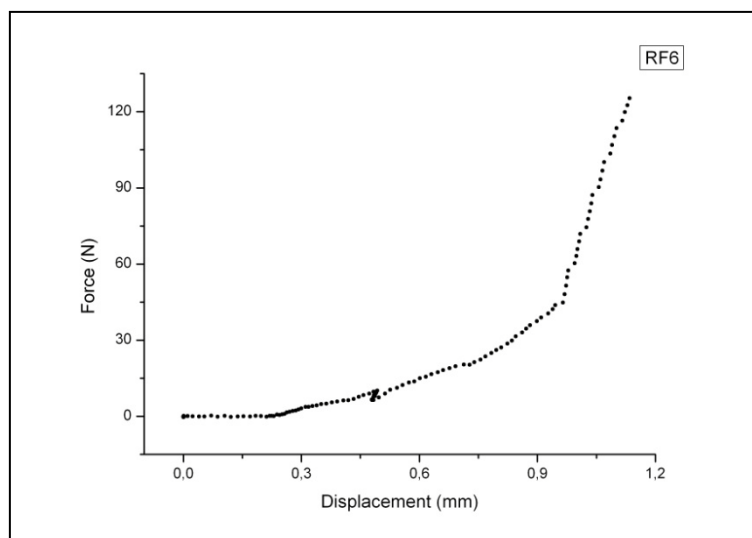
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 25/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 3/10/2011



Εικόνα 32: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF6 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 12: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF6

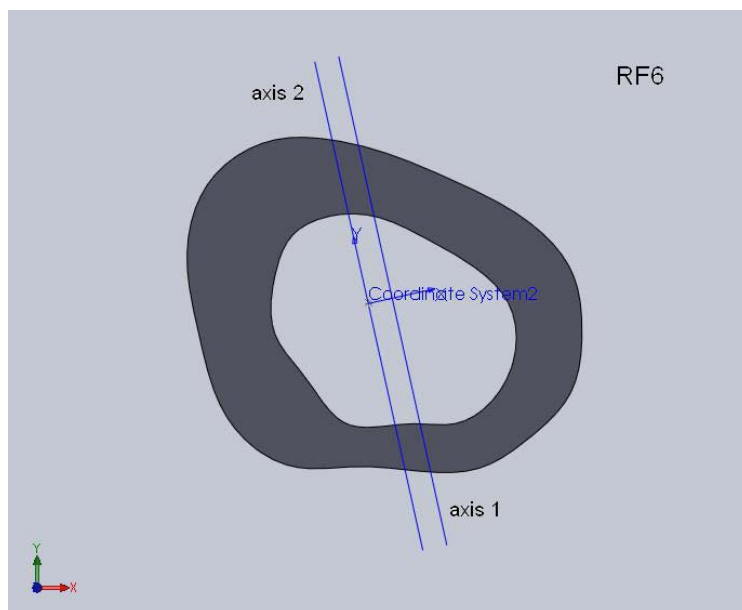
Μέγιστο φορτίο: 128,75 N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 1,14 mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 27,3mJ



Εικόνα 33: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF6. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης του δοκιμίου στα 10N.



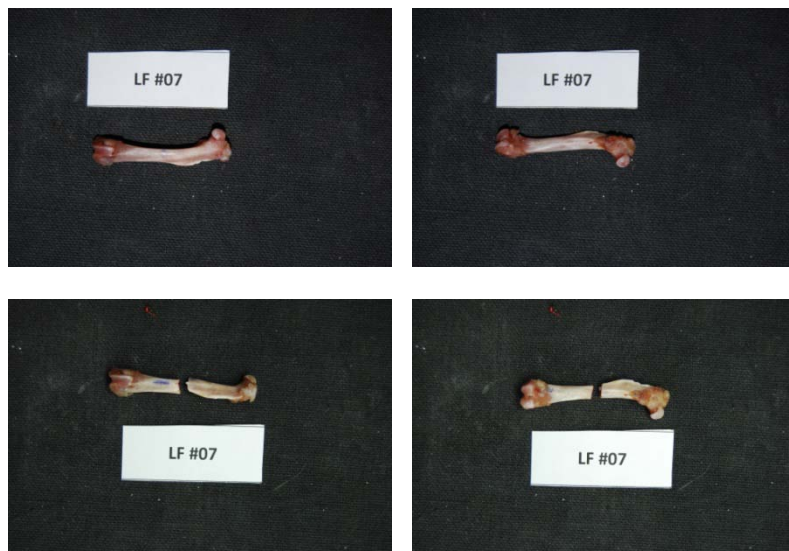
Εικόνα 34: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF6 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF7

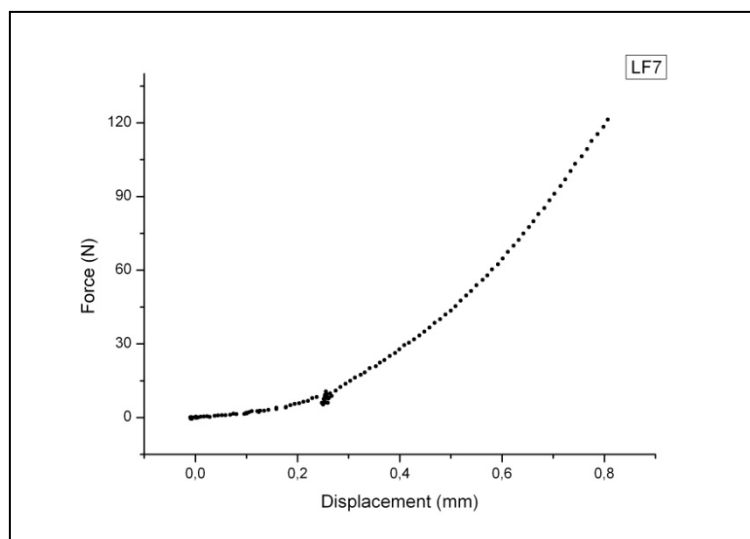
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 25/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 3/10/2011



Εικόνα 35: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF7 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 13: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF7

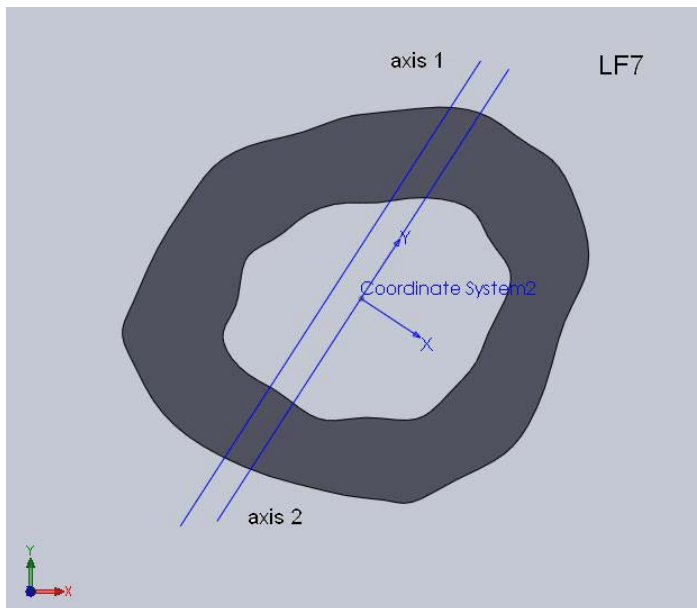
Μέγιστο φορτίο: 124,64 N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,81 mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 31,4mJ



Εικόνα 36: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF7. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης του δοκιμίου στα 10N.



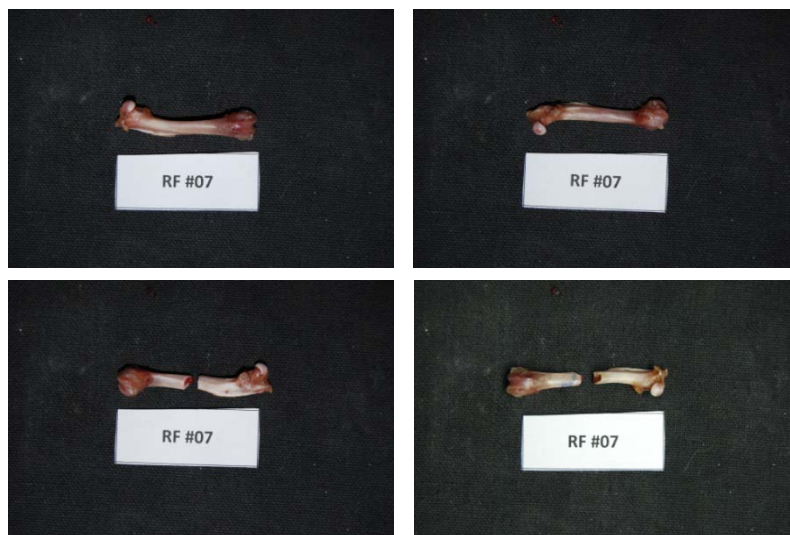
Εικόνα 37: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF7 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF7

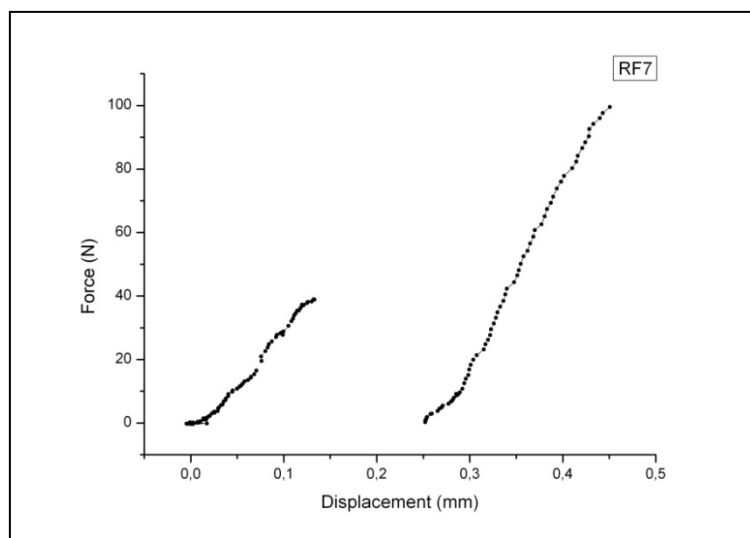
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 25/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 3/10/2011



Εικόνα 38: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF7 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 14: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF7

Μέγιστο φορτίο: 143,48 N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,45 mm

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έκανε μία περιστροφή κατά την φόρτιση του.



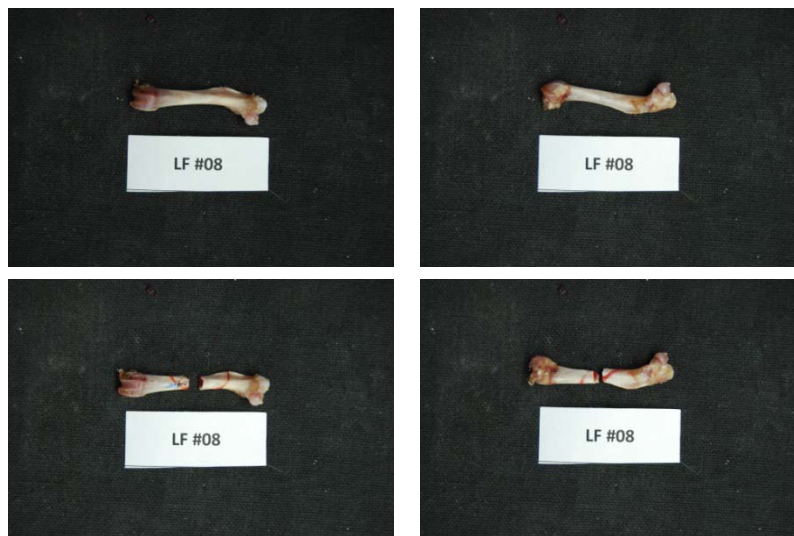
Εικόνα 39: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF7. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης του δοκιμίου στα 10N.

Κωδικός δοκιμίου: LF8

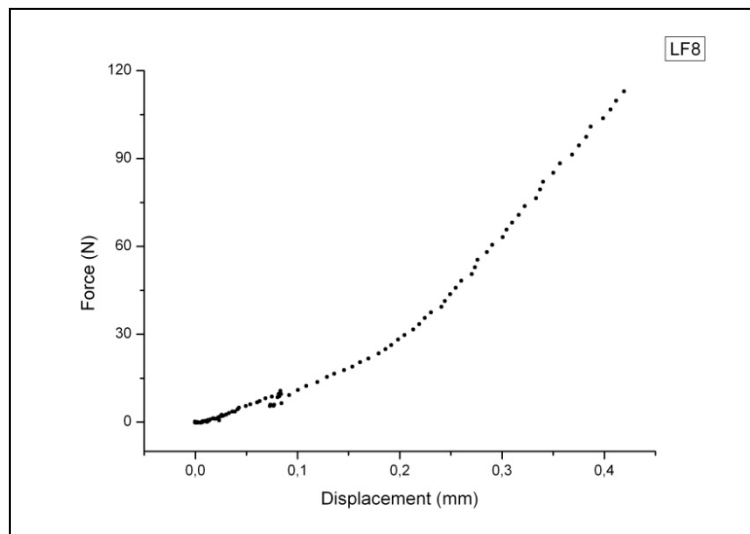
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 25/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 3/10/2011



Εικόνα 40: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF8 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 15: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF8

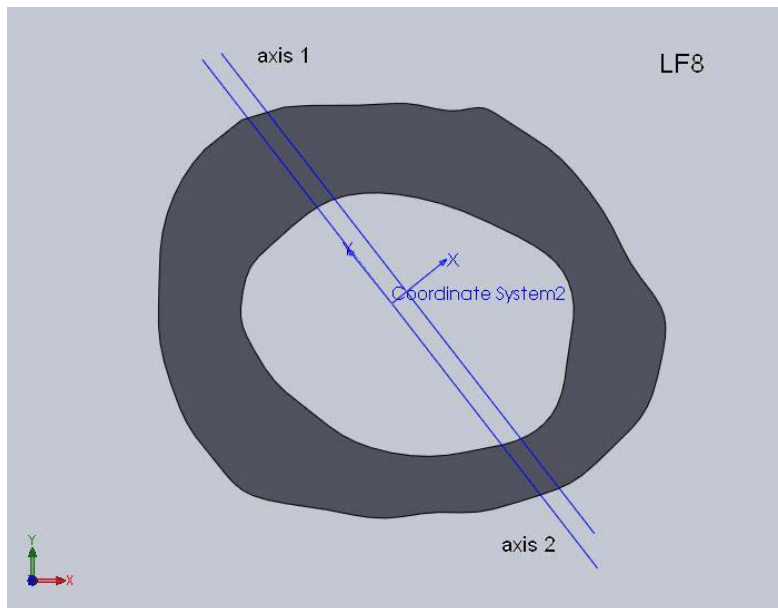
Μέγιστο φορτίο: 116,36 N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,42 mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 17,4mJ



Εικόνα 41: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF8. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης του δοκιμίου στα 10N.



Εικόνα 42: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF8 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF8

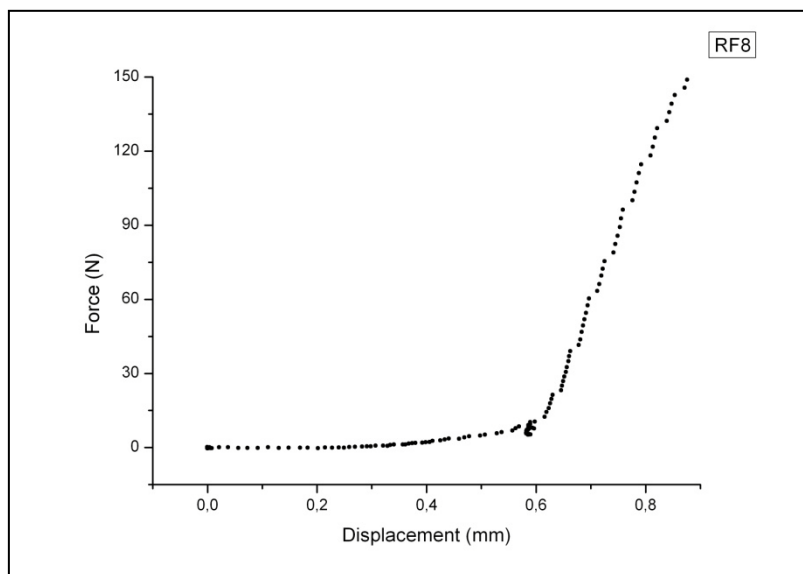
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 25/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 3/10/2011



Εικόνα 43: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF8 πριν το πείραμα κάμψης

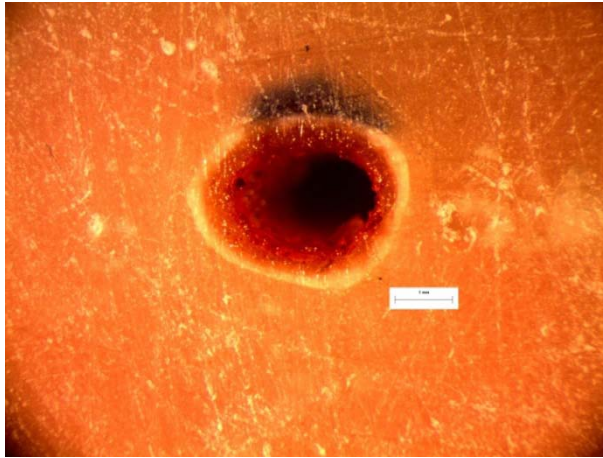


Γράφημα 16: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF8

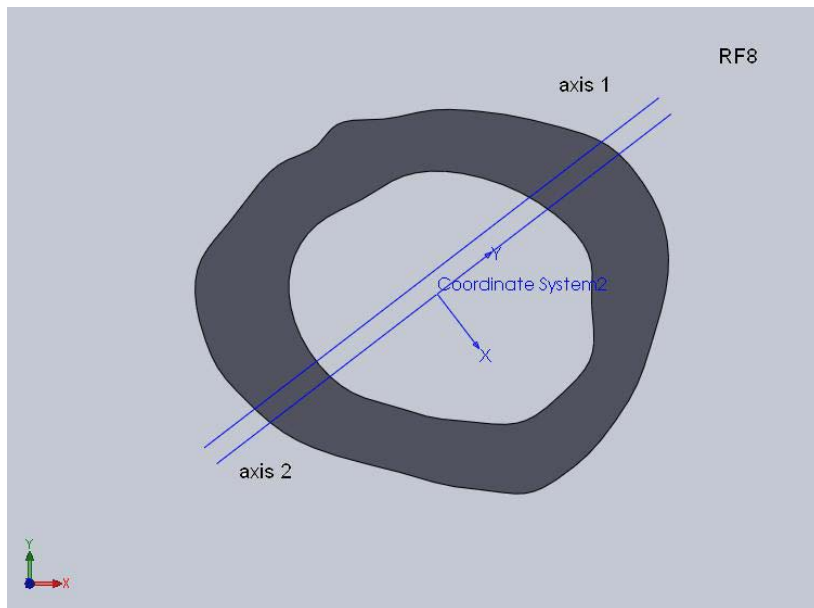
Μέγιστο φορτίο: 153,14 N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,88 mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 23,2mJ



Εικόνα 44: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF8. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης του δοκιμίου στα 10N.



Εικόνα 45: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF8 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF9

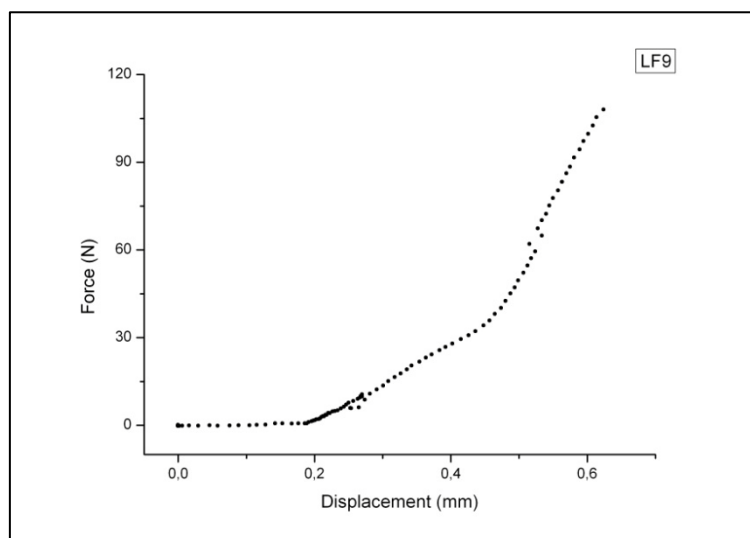
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 25/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 5/10/2011



Εικόνα 46: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF9 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

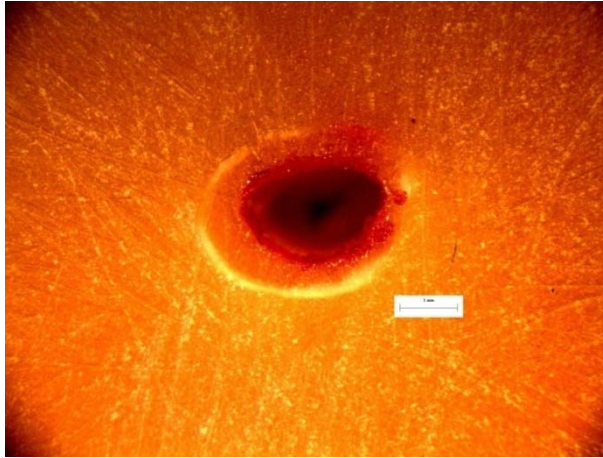


Γράφημα 17: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF9

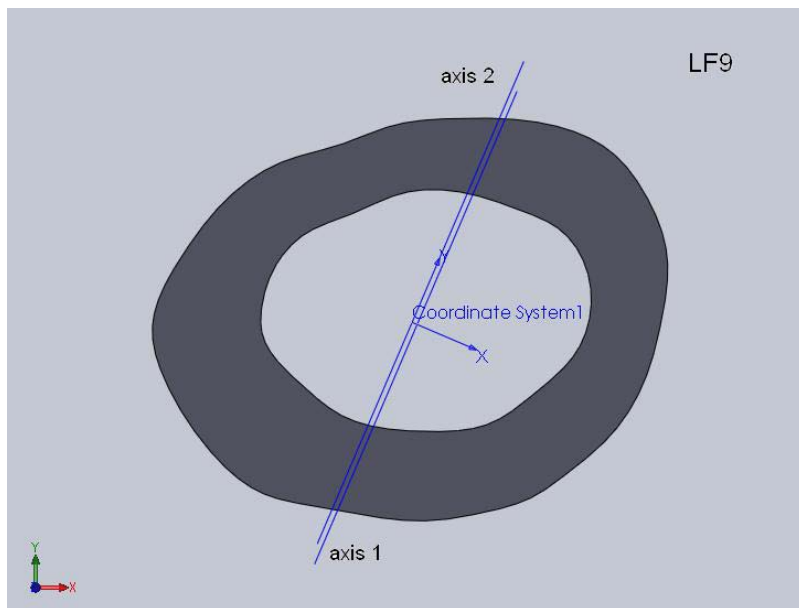
Μέγιστο φορτίο: 112,73 N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,62 mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 16,5mJ



Εικόνα 47 : Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF9.



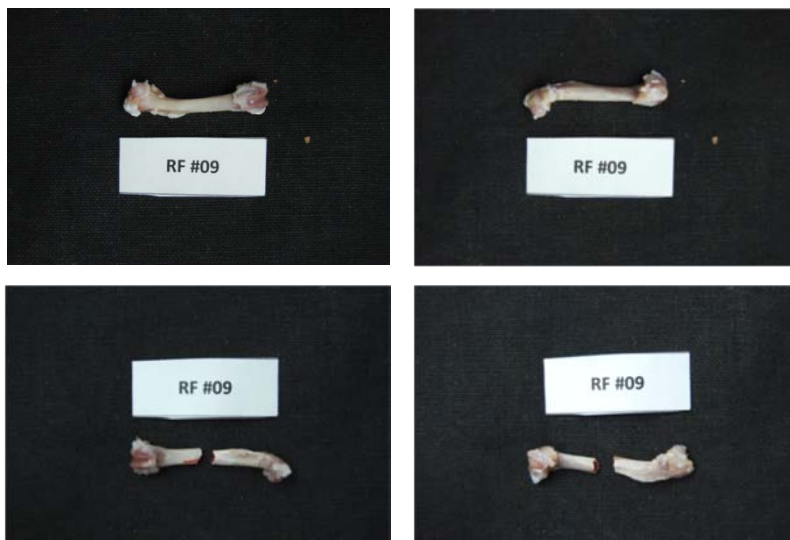
Εικόνα 48: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF9 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF9

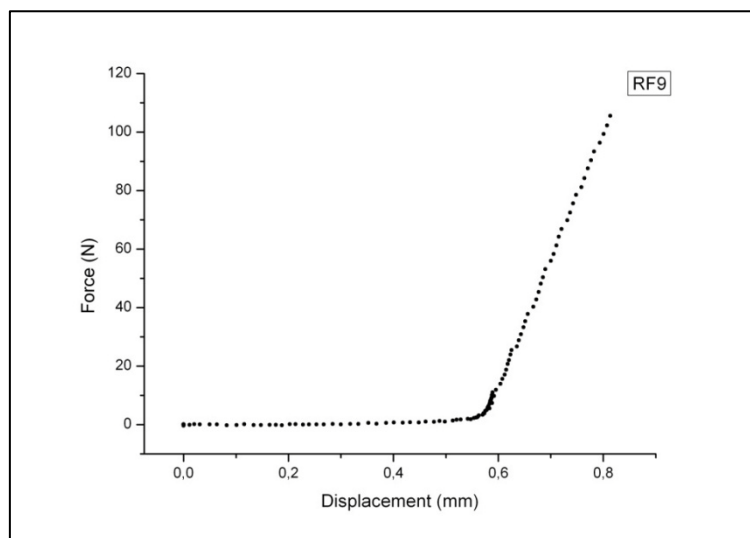
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 25/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 5/10/2011



Εικόνα 49: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF9 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

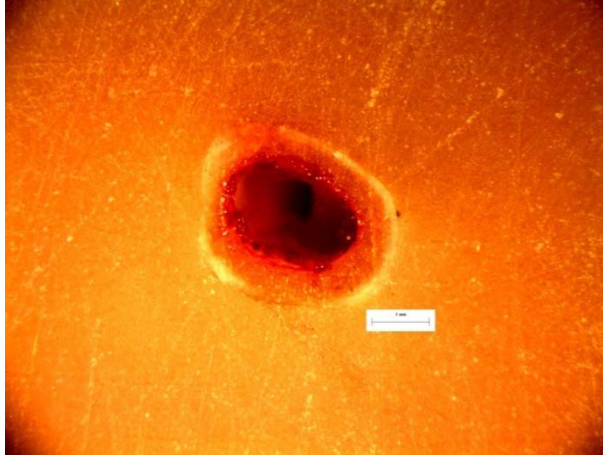


Γράφημα 18: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF9

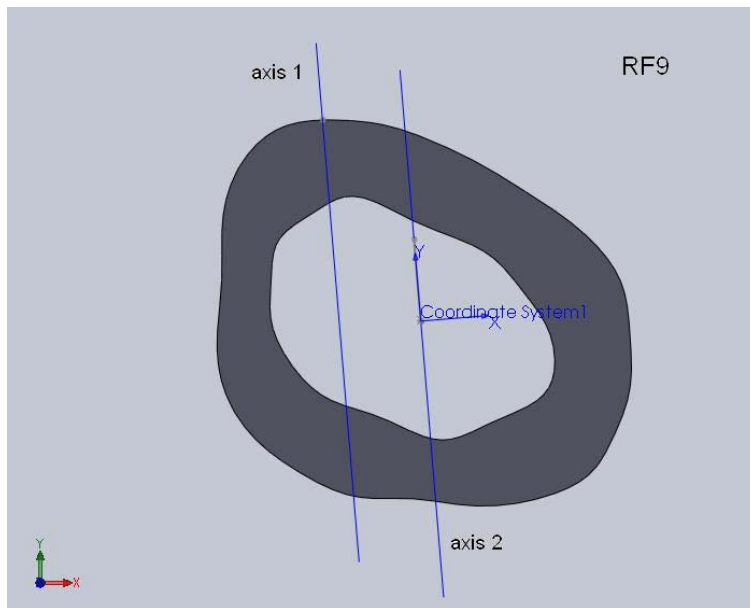
Μέγιστο φορτίο: 110,32N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,81mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 13,1mJ



Εικόνα 50: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF9.



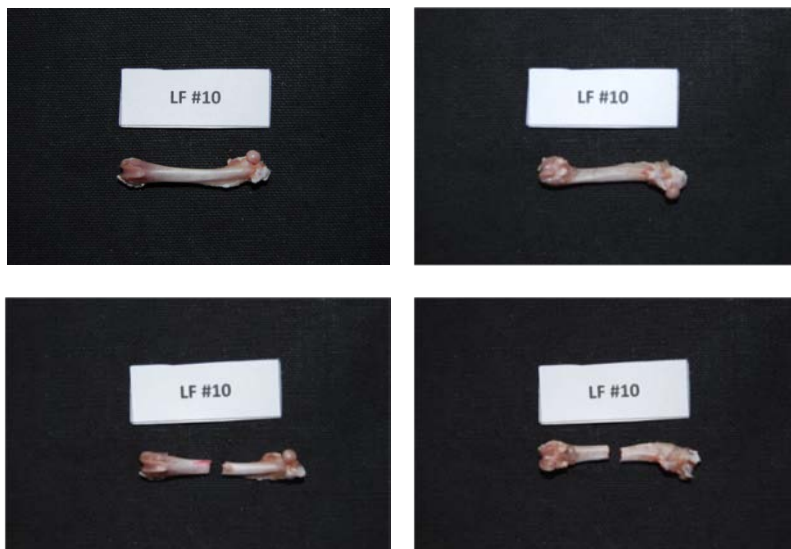
Εικόνα 51: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF9 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF10

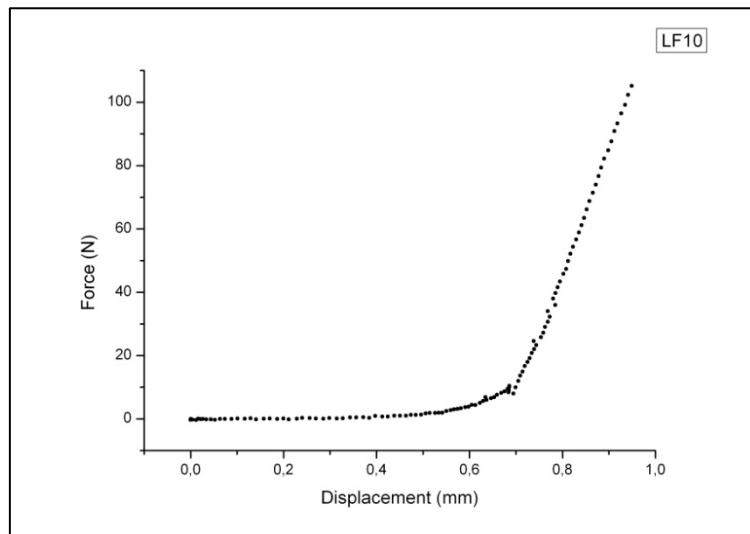
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 25/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 5/10/2011



Εικόνα 52: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF10 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

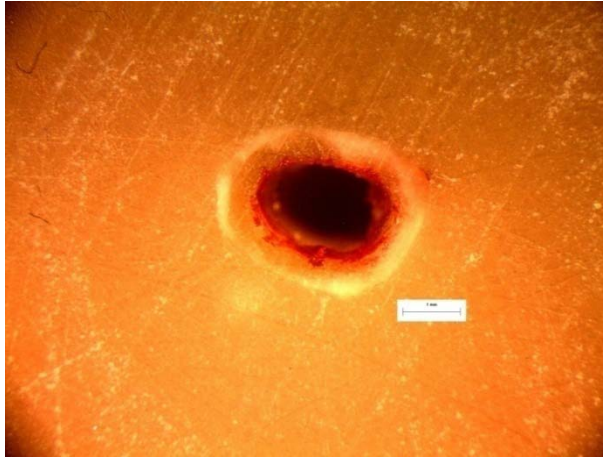


Γράφημα 19: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF10

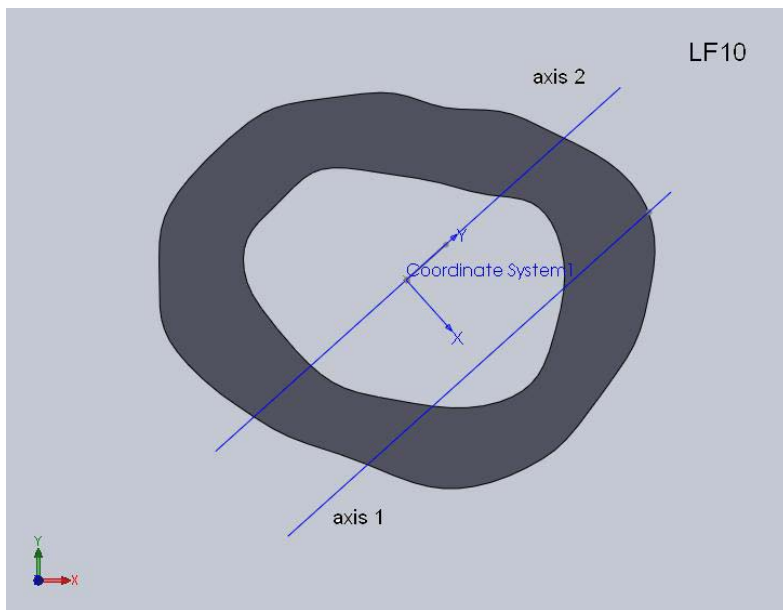
Μέγιστο φορτίο: 108,55N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,95mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 14,9mJ



Εικόνα 53: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF10.



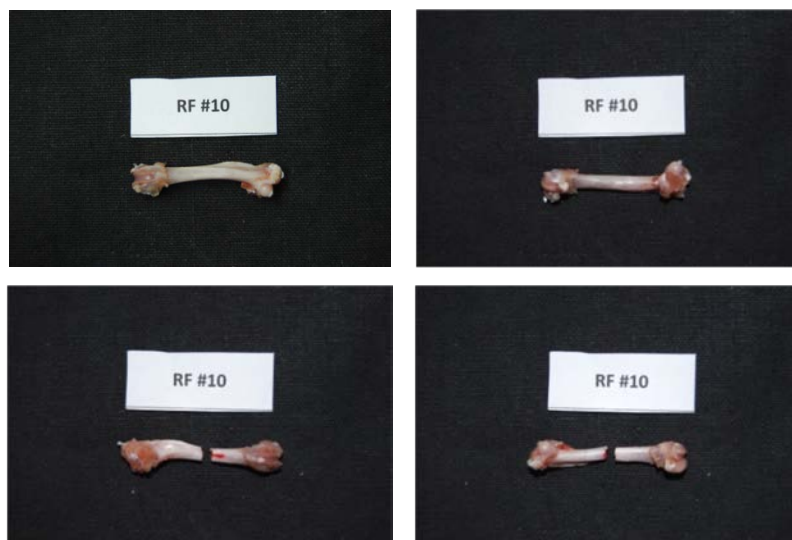
Εικόνα 54: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF10 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF10

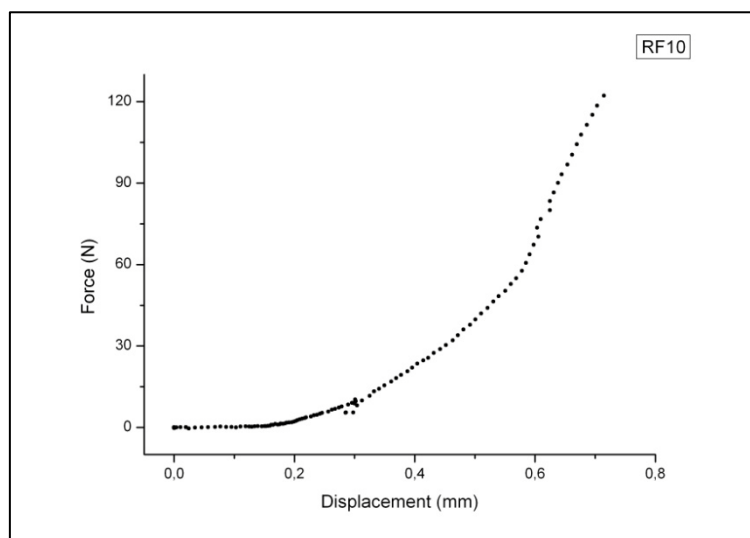
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 25/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 5/10/2011



Εικόνα 55: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF10 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

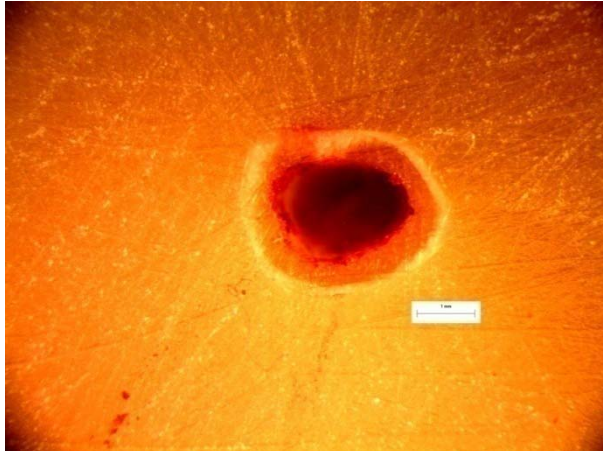


Γράφημα 20: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF10

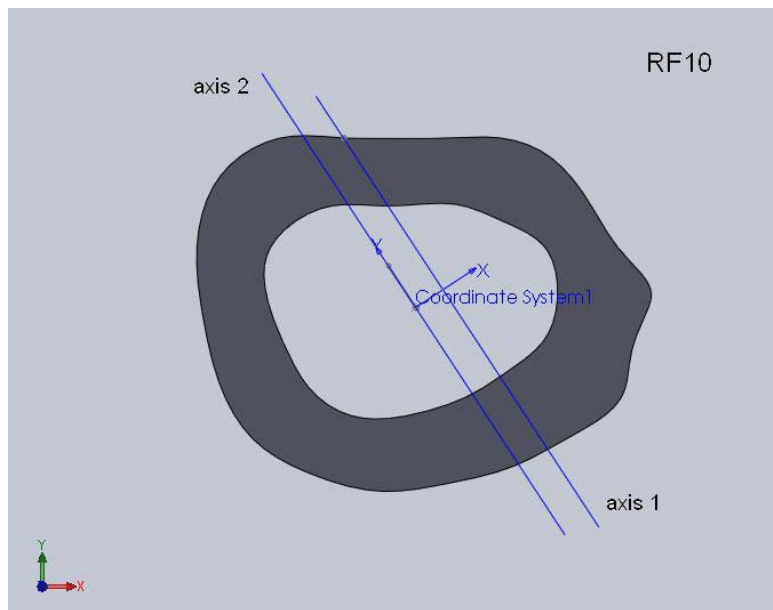
Μέγιστο φορτίο: 125,87N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,71mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 21,5mJ



Εικόνα 56 : Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF10



Εικόνα 57: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF10 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF11

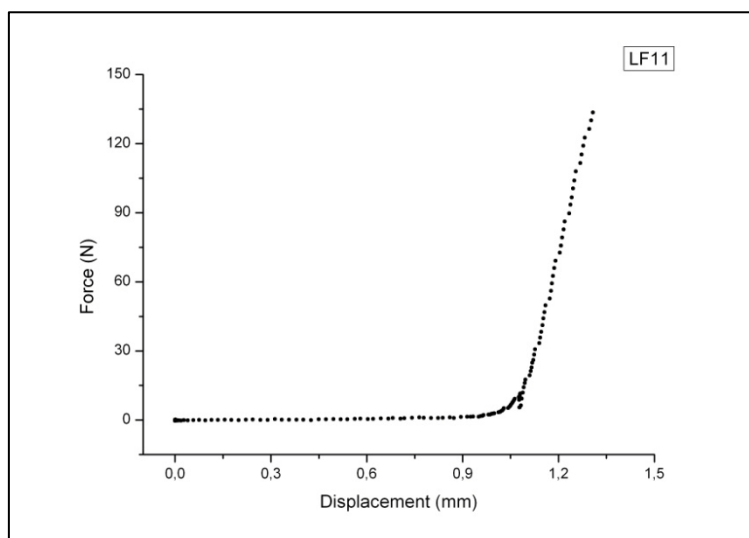
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 25/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 5/10/2011



Εικόνα 58: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF11 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

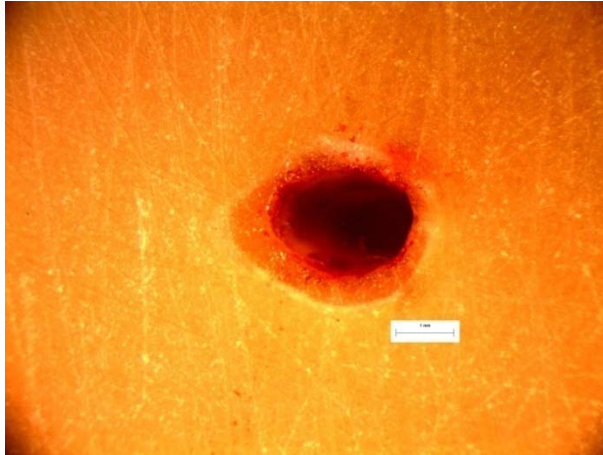


Γράφημα 21: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF11

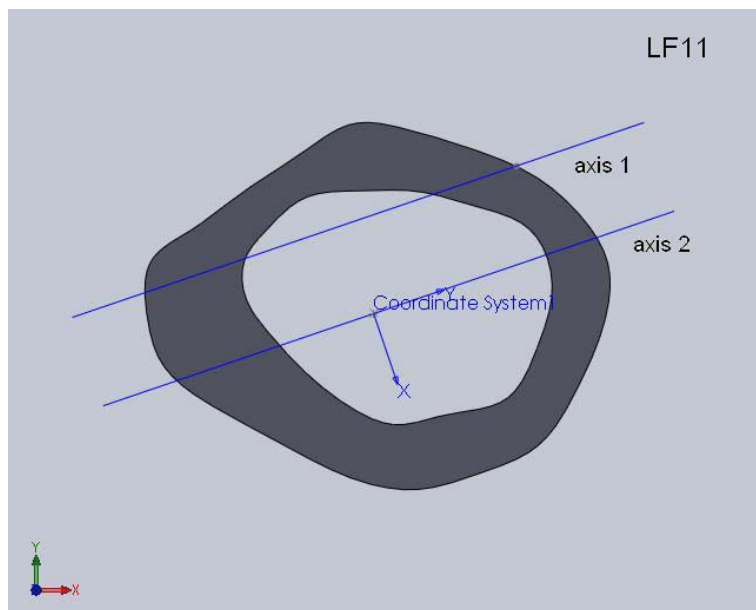
Μέγιστο φορτίο: 138,77N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 1,31mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 16,8mJ



Εικόνα 59: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF11. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



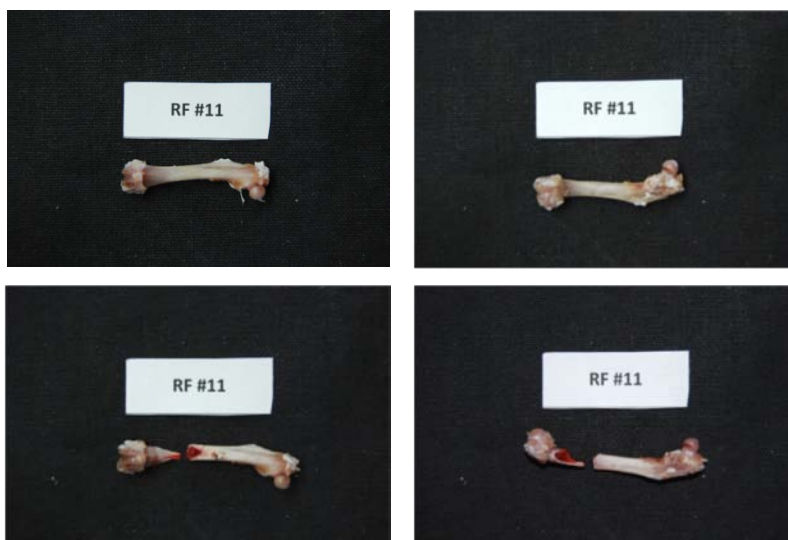
Εικόνα 60: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF11 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF11

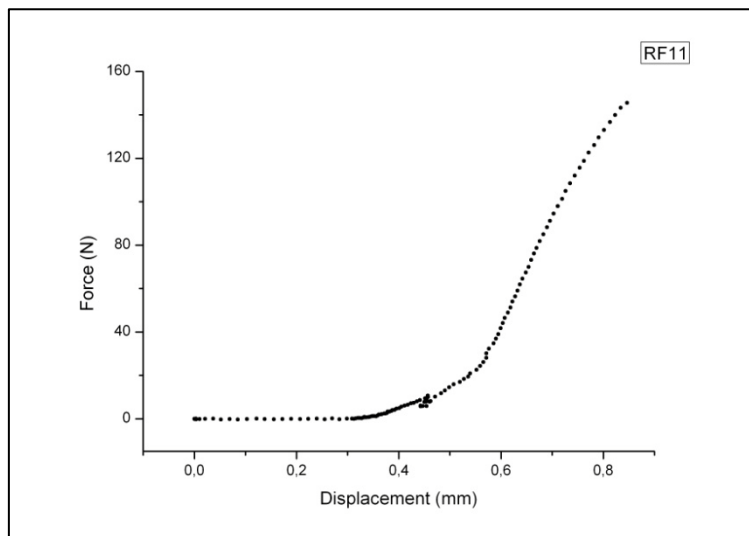
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 25/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 5/10/2011



Εικόνα 61: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF11 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 22: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF11

Μέγιστο φορτίο: 149,02N

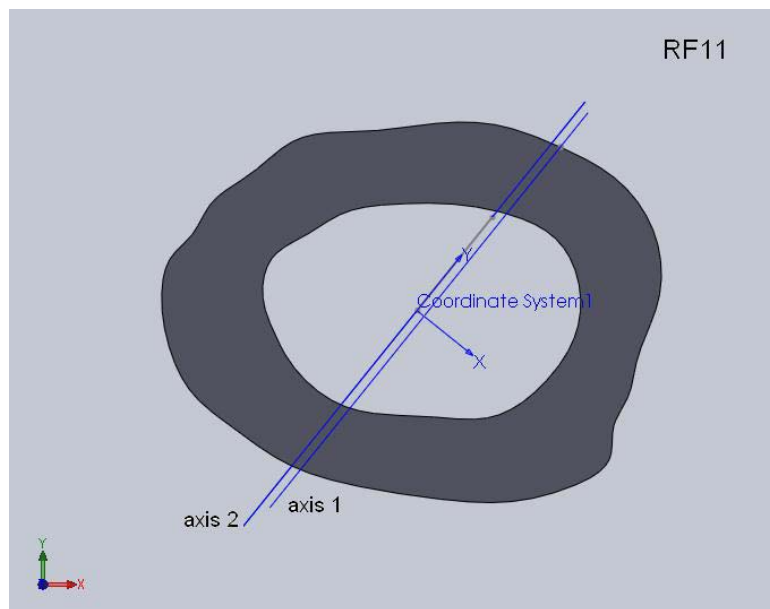
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,85mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 28,1mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.



Εικόνα 62: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής κοντά στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF11. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 63: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF11 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF12

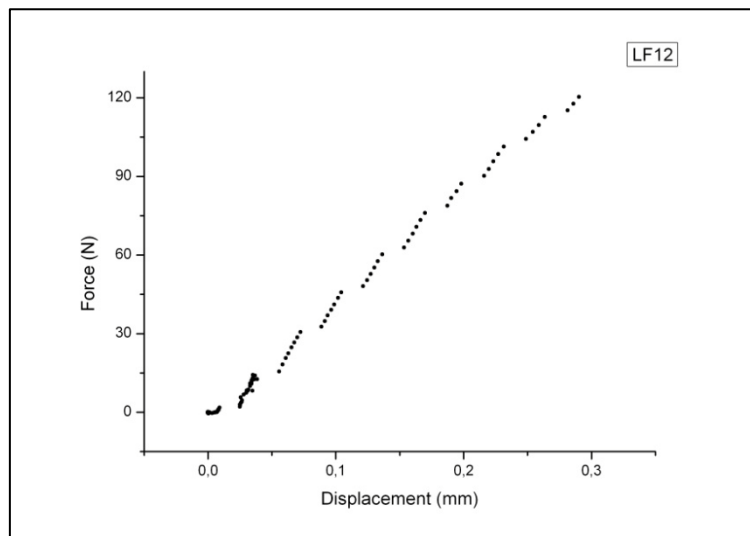
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 25/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 5/10/2011



Εικόνα 64: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF12 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 23: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF12

Μέγιστο φορτίο: 124,63N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,29mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 17,5mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε σε τρία κομμάτια.

Κωδικός δοκιμίου: RF12

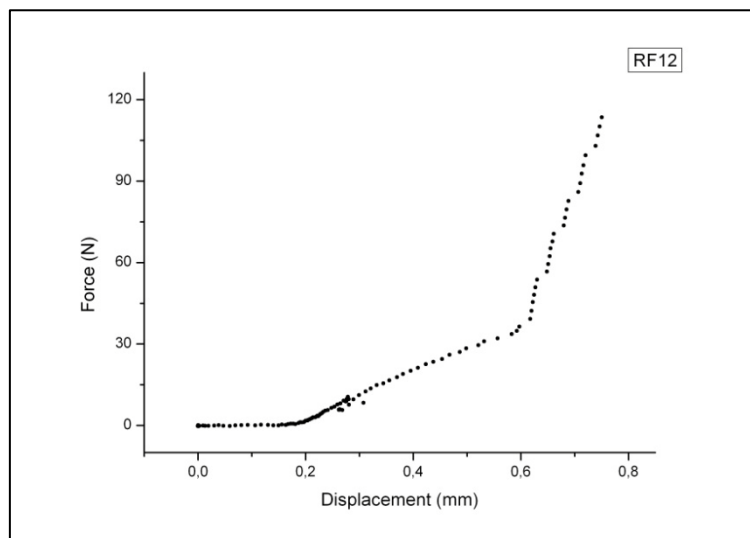
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 25/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 5/10/2011



Εικόνα 65 : Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF12 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

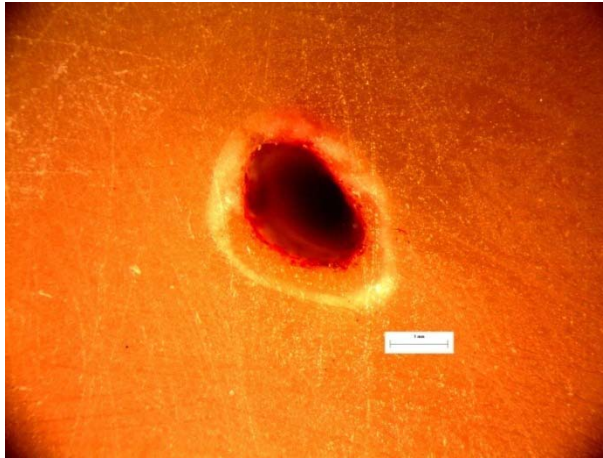


Γράφημα 24: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF12

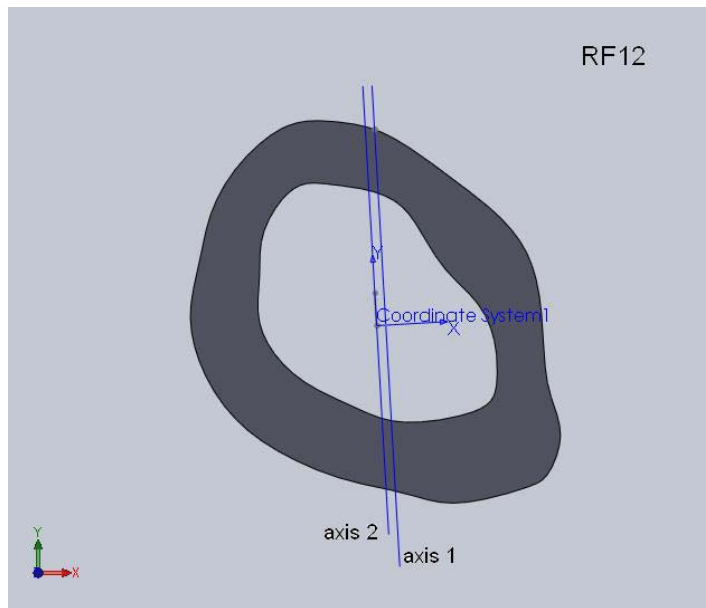
Μέγιστο φορτίο: 119,0N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,75mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 18,9mJ



Εικόνα 66: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF12



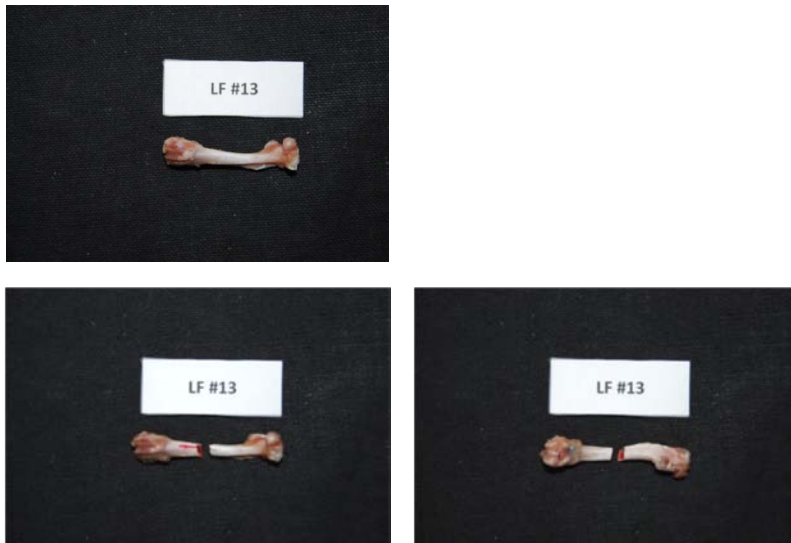
Εικόνα 67: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF12 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF13

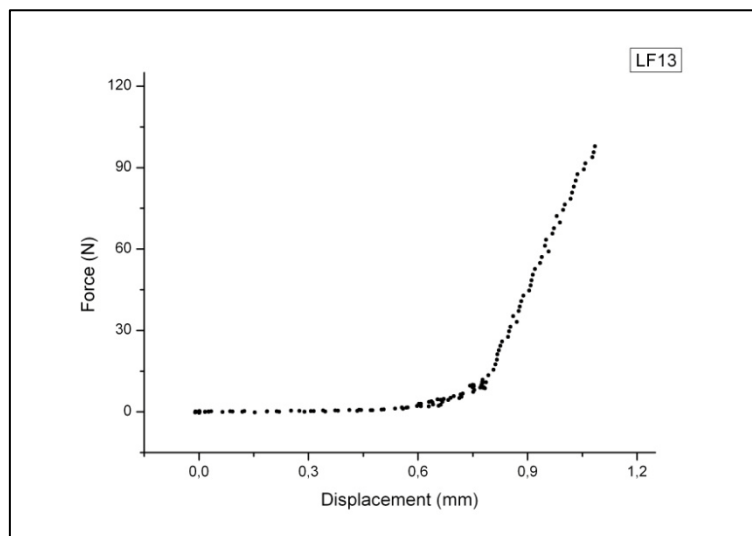
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 24/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 7/10/2011



Εικόνα 68: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF13 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

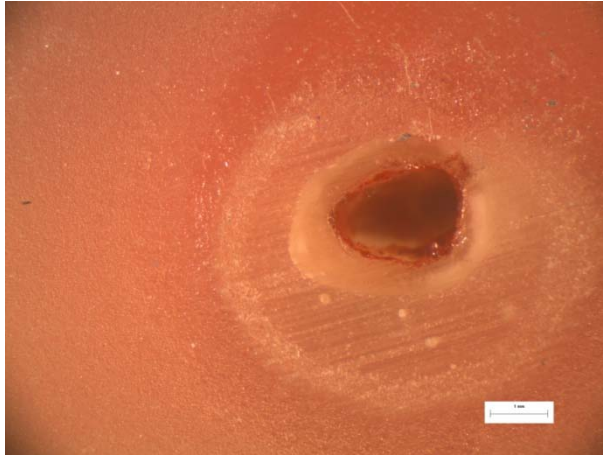


Γράφημα 25: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF13

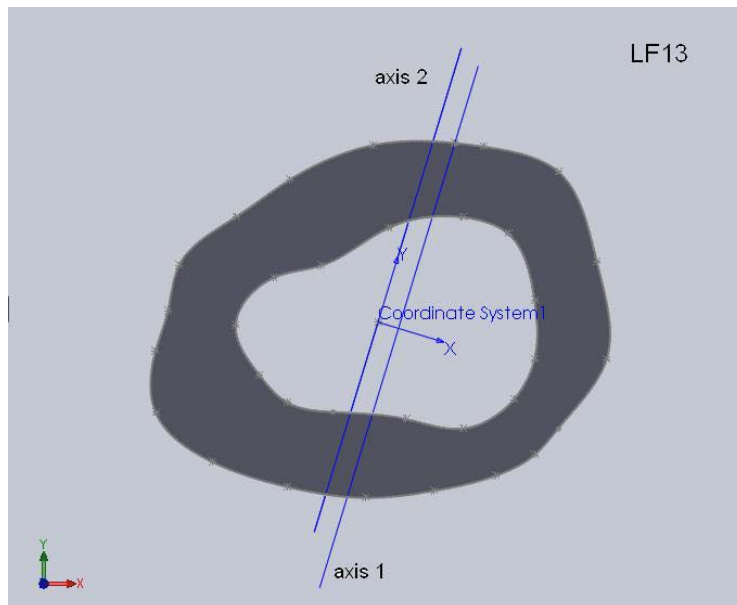
Μέγιστο φορτίο: 100,25N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 1,08mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 17,8mJ



Εικόνα 69 : Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF13



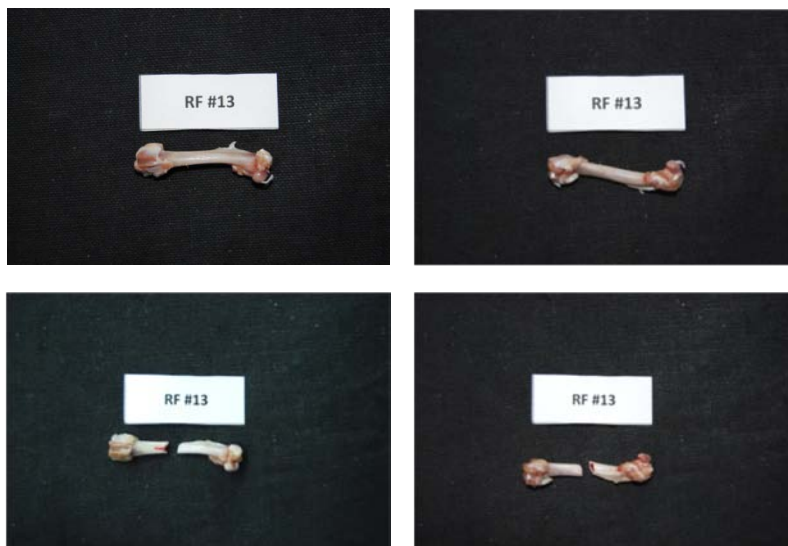
Εικόνα 70: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF13 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF13

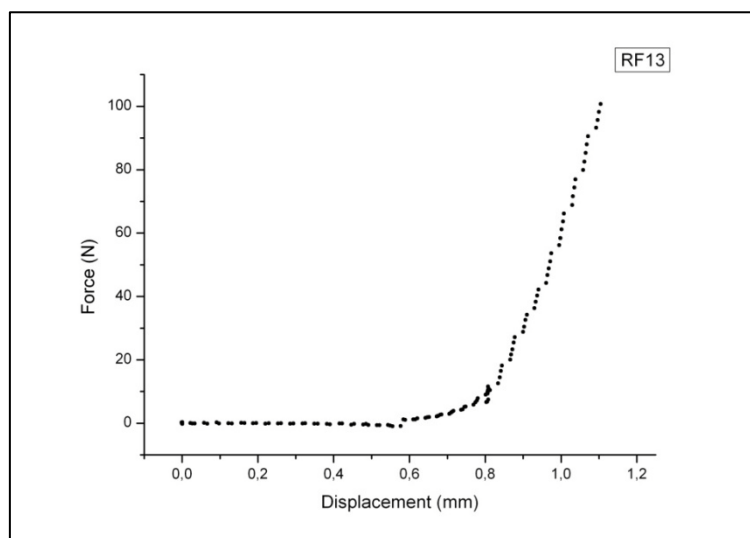
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 24/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 7/10/2011



Εικόνα 71: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF13 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

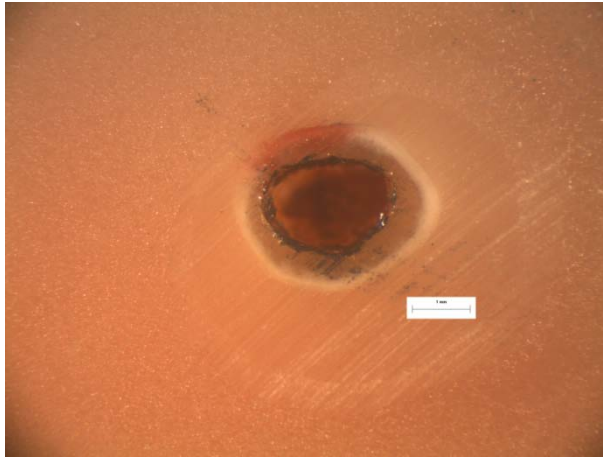


Γράφημα 26: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF13

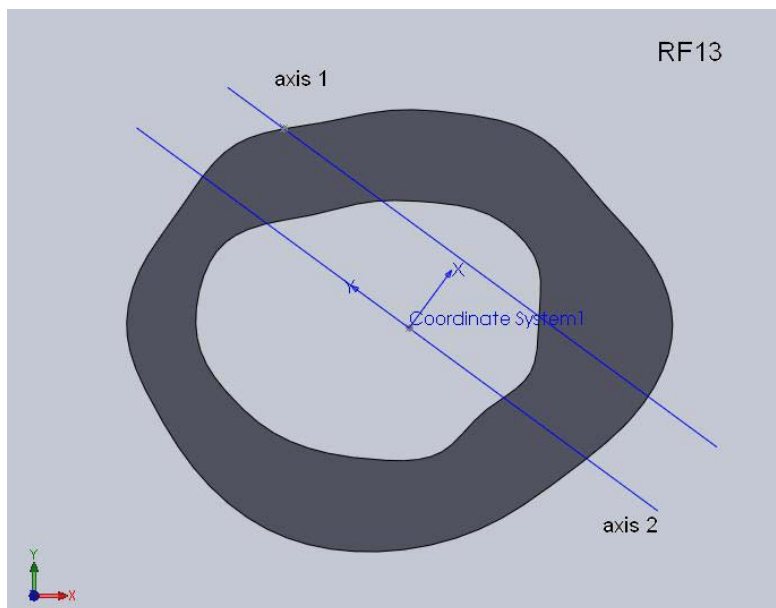
Μέγιστο φορτίο: 103,14N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 1,10mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 15,3mJ



Εικόνα 72 : Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF13. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.



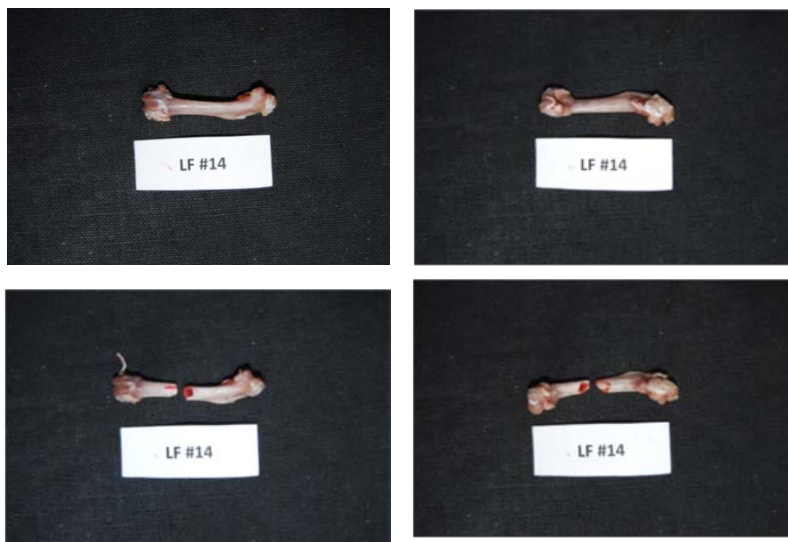
Εικόνα 73: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF13 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF14

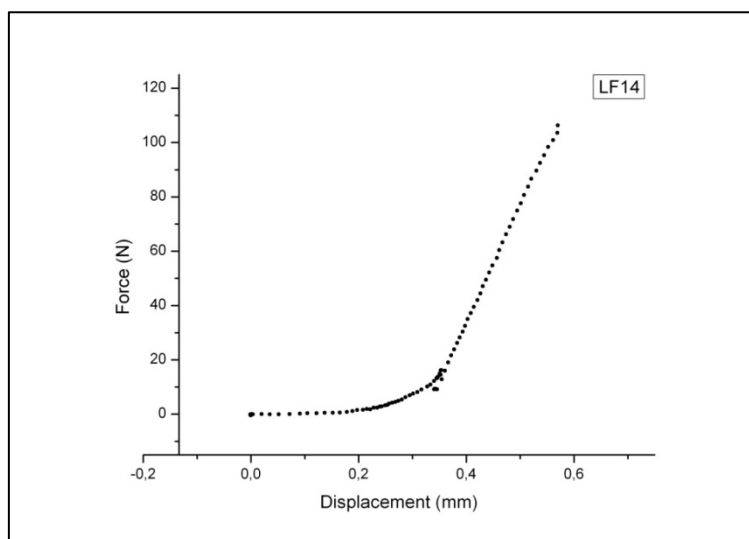
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 24/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 7/10/2011



Εικόνα 74: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF14 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 27: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF14

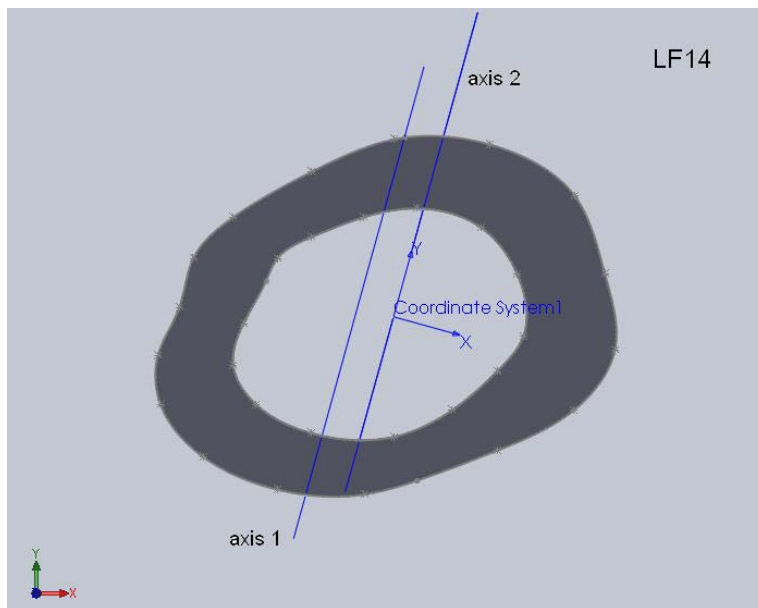
Μέγιστο φορτίο: 108,13N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,57mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 14,0mJ



Εικόνα 75: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής κοντά στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF14. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



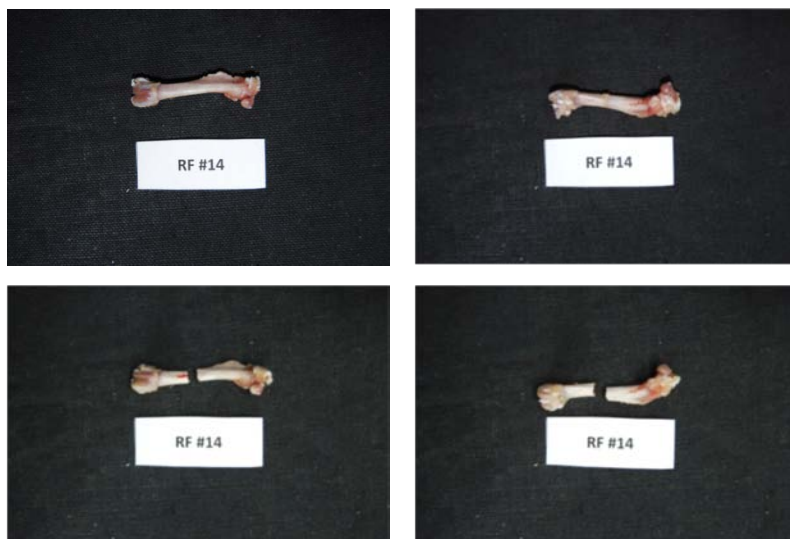
Εικόνα 76: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF14 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF14

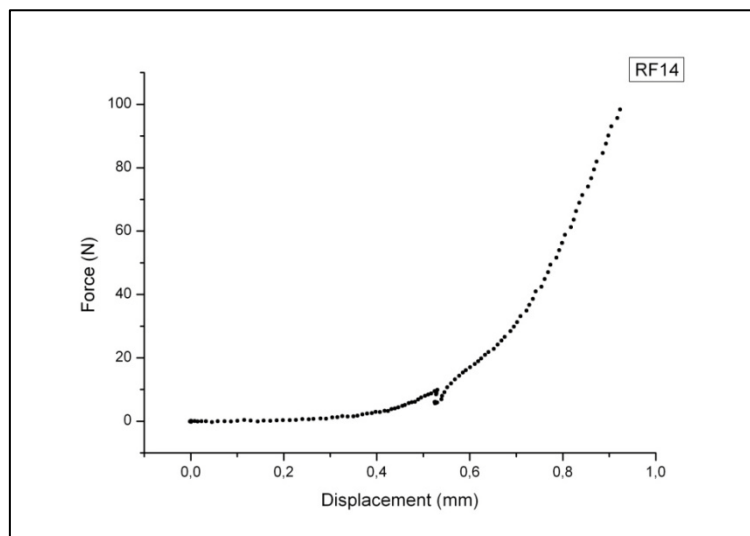
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 24/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 7/10/2011



Εικόνα 77: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF14 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 28: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF14

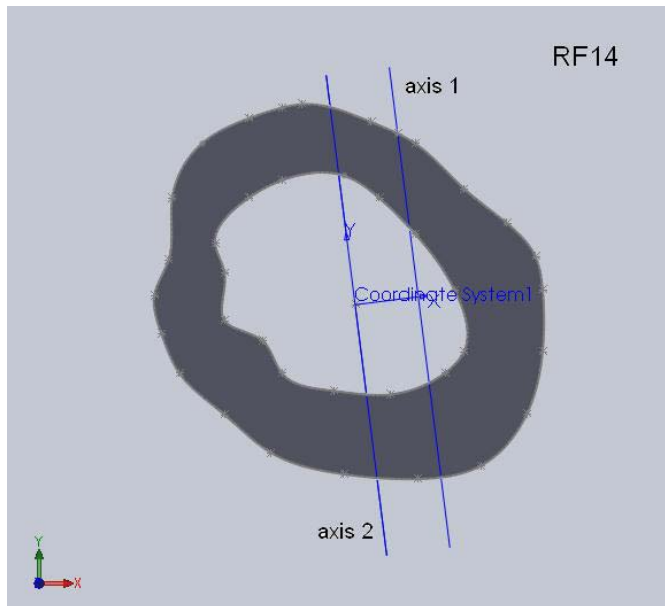
Μέγιστο φορτίο: 103,36N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,92mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 18,0mJ



Εικόνα 78 : Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής κοντά στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF14. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



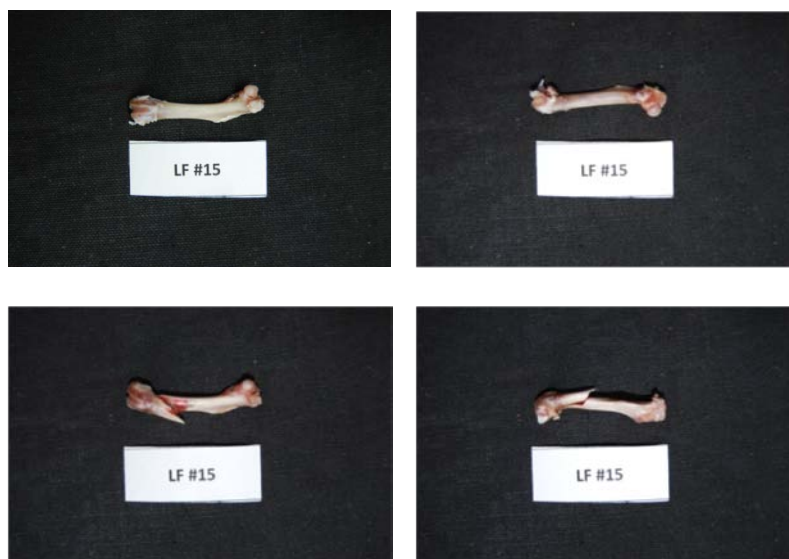
Εικόνα 79: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF14 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF15

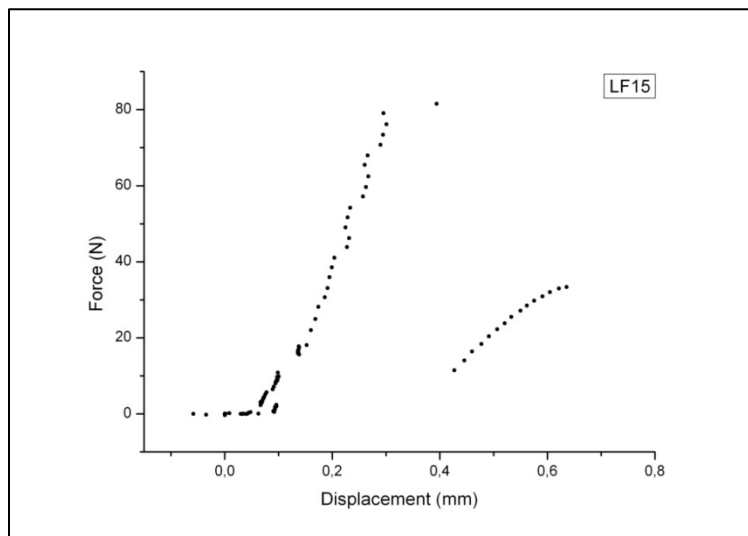
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 24/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 7/10/2011



Εικόνα 80: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF15 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



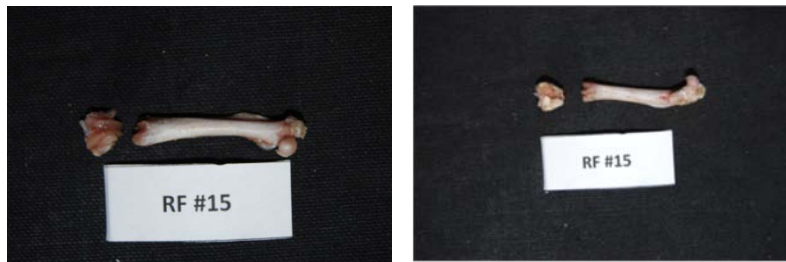
Γράφημα 29 : Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF15

Μέγιστο φορτίο: 83,33N

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έκανε ρωγή κατά τη φόρτισή του και συνέχισε να παραλαμβάνει φορτίο, έσπασε τελικά πλάγια κοντά στην περιοχή του γονάτου.

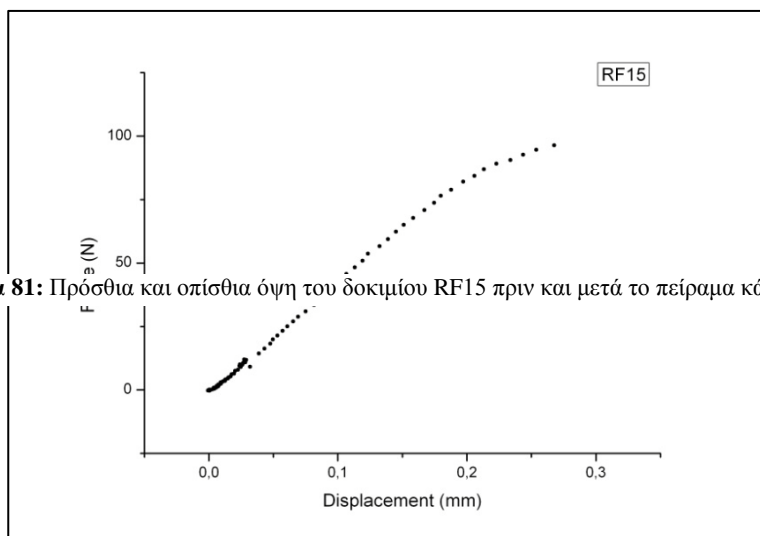
Κωδικός δοκιμίου: RF15

Ομάδα: A high



Ημερομηνία γέννησης: 24/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 7/10/2011

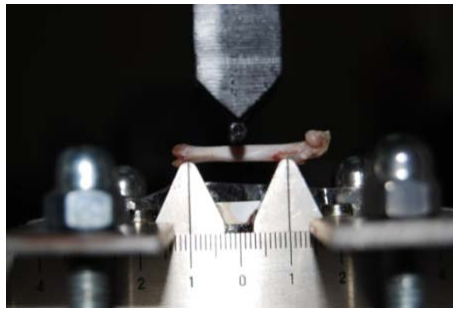


Εικόνα 81: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF15 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

Γράφημα 30: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF15

Μέγιστο φορτίο:
Μέγιστη βύθιση
φόρτισης: 0,27mm
Δαπανηθείσα
14,5mJ

Παρατηρήσεις: Το
στην περιοχή των
γονάτου κατά την
διαδικασία.
στη μηχανή κάμψης
εικόνα.



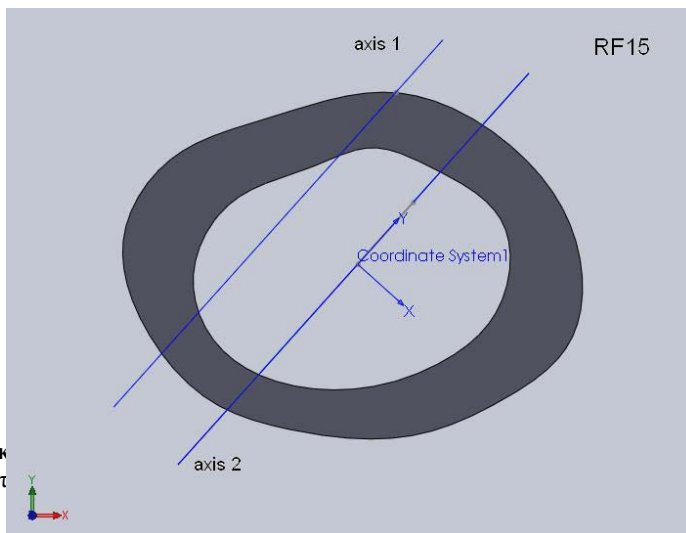
97,77N
σημείου

ενέργεια:

δοκίμιο έσπασε
κονδύλων του
χειρουργική
Τοποθετήθηκε
όπως δείχνει η



Εικόνα 82 : Κάμψη δοκιμίου RF15



Εικ
αστ

σημείο



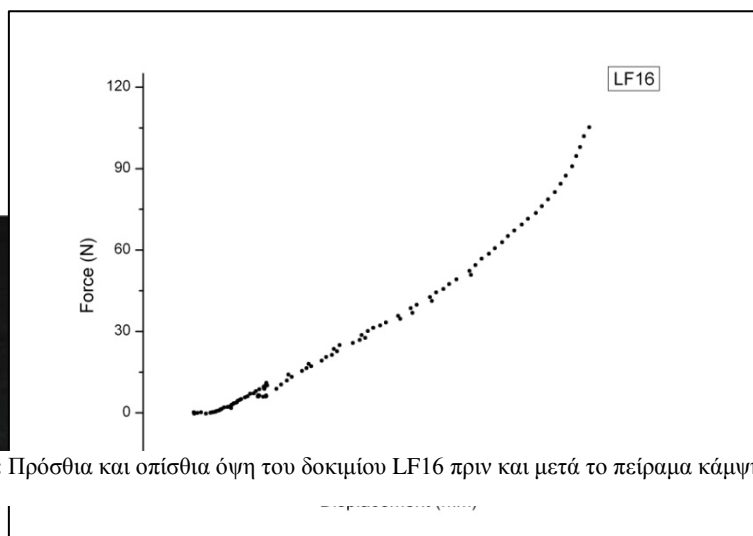
Εικόνα 84: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF15 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF16

Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 24/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 7/10/2011



Εικόνα 85: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF16 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

Γράφημα 31: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF16

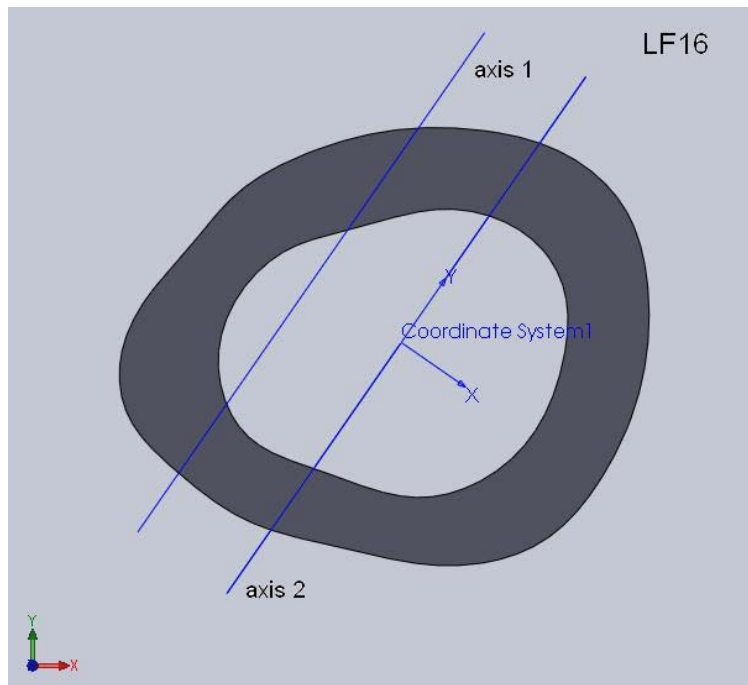
Μέγιστο φορτίο: 110,61N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,77mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 29,4mJ



Εικόνα 86 : Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής κοντά στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF16. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



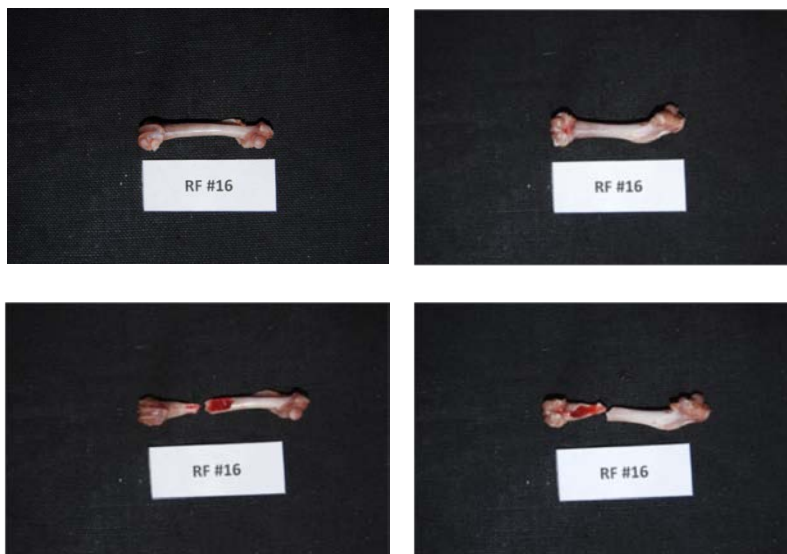
Εικόνα 87 : Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF16 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF16

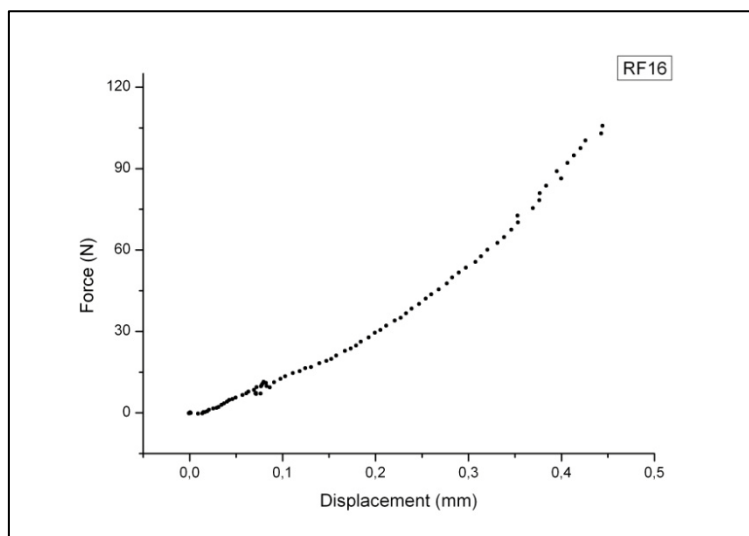
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 24/4/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 7/10/2011



Εικόνα 88 : Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF16 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



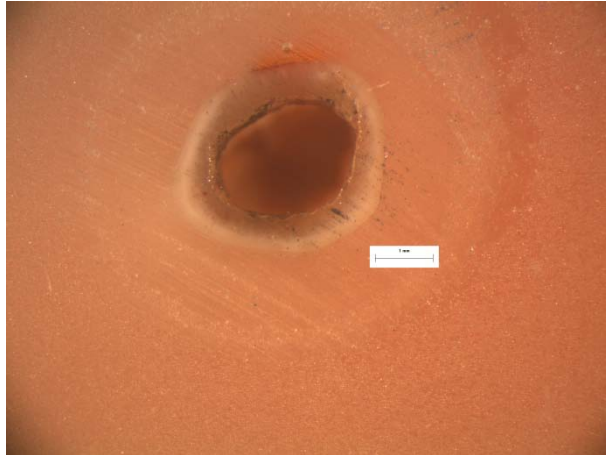
Γράφημα 32: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF16

Μέγιστο φορτίο: 107,95N

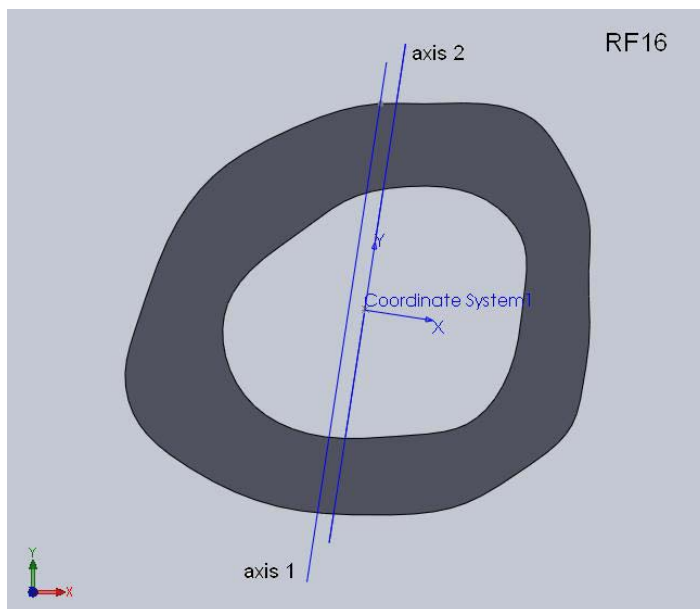
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,44mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 18,0mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.



Εικόνα 89: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής κοντά στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF16. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.

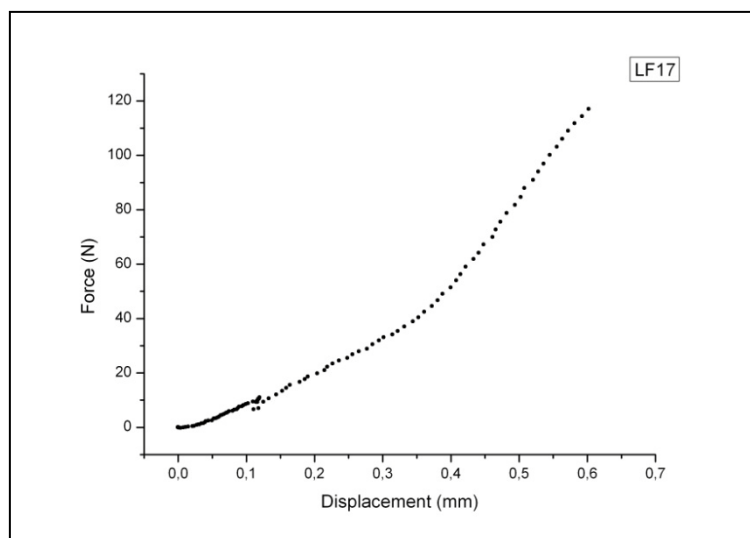


Εικόνα 90: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF16 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF17
Ομάδα: Control με OVX
Ημερομηνία γέννησης: 25/5/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 4/11/2011



Εικόνα 91: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF17 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

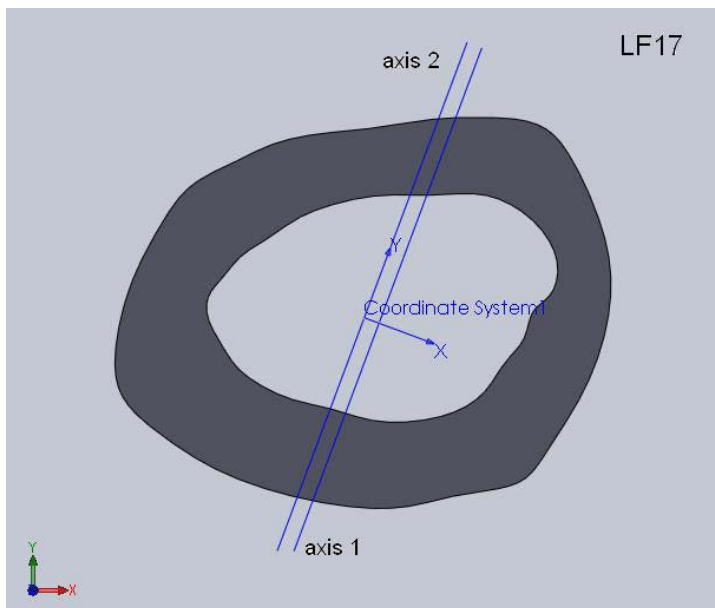


Γράφημα 33 : Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF17

Μέγιστο φορτίο: 119,49N
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,60mm
Δαπανηθείσα ενέργεια: 25,5mJ



Εικόνα 92: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF17. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.

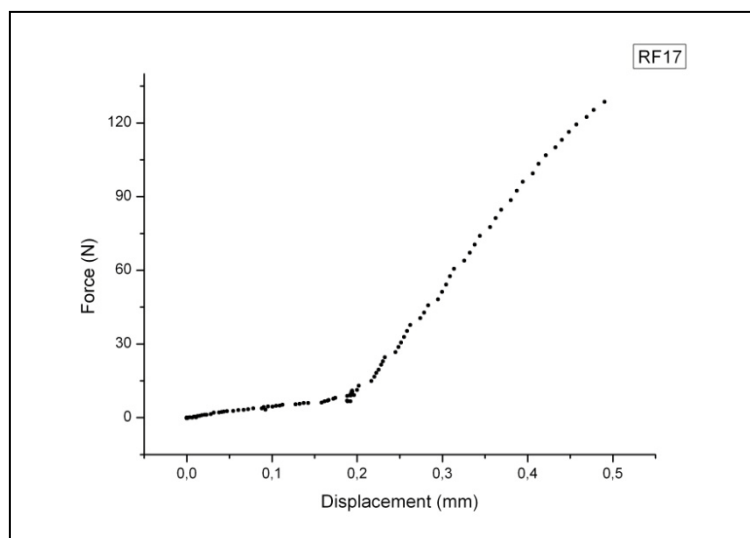


Εικόνα 93: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF17 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF17
Ομάδα: Control με OVX
Ημερομηνία γέννησης: 25/5/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 4/11/2011



Εικόνα 94: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF17 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

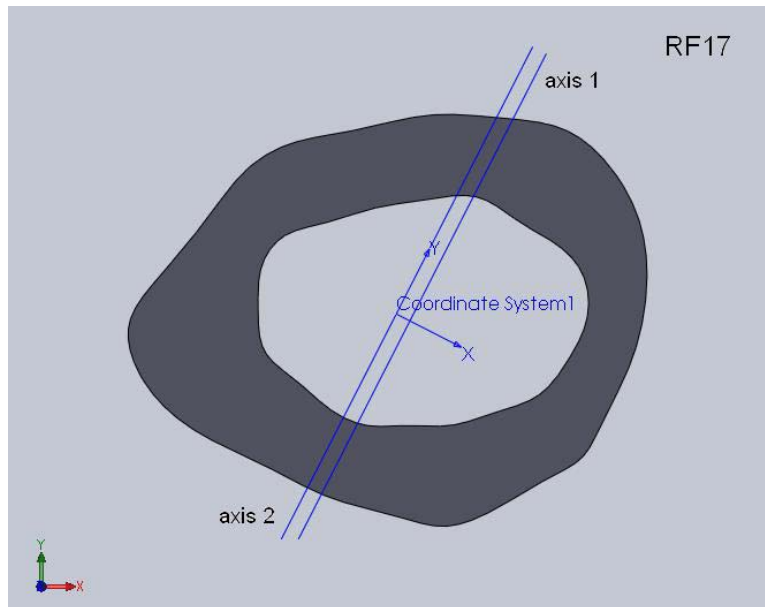


Γράφημα 34: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF17

Μέγιστο φορτίο: 132,47N
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,49mm
Δαπανηθείσα ενέργεια: 21,9mJ



Εικόνα 95: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF17. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.

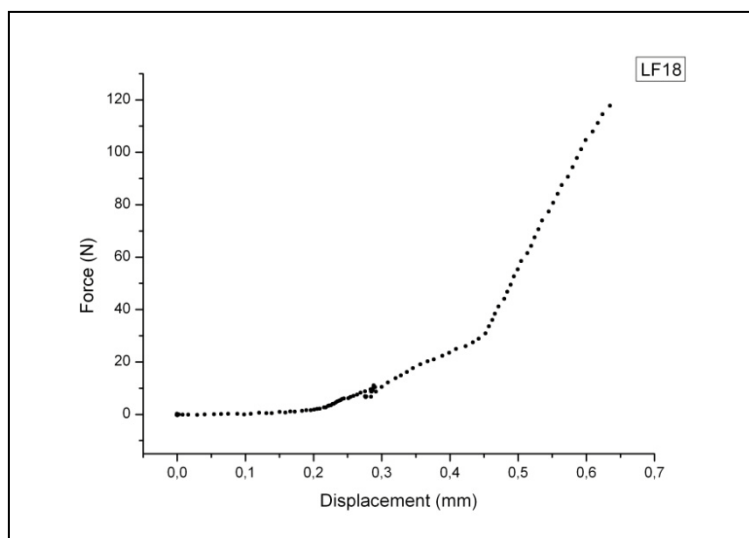


Εικόνα 96: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF17 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF18
Ομάδα: Control με OVX
Ημερομηνία γέννησης: 25/5/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 4/11/2011



Εικόνα 97: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF18 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

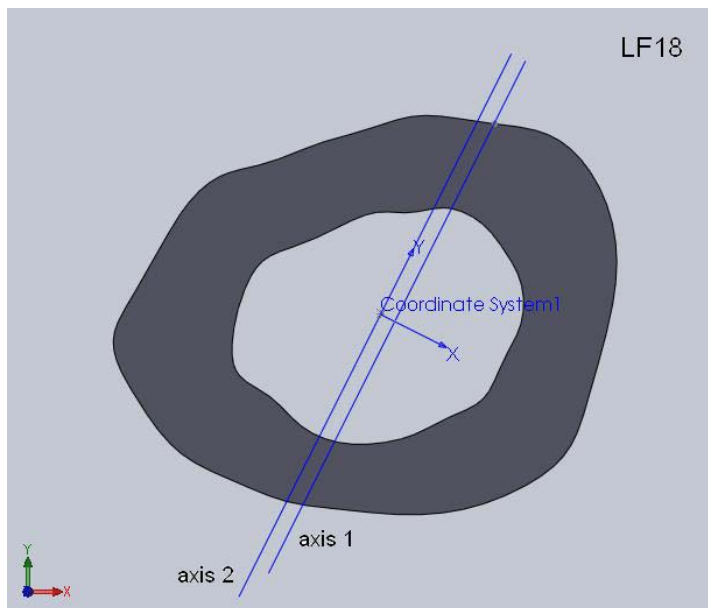


Γράφημα 35: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF18

Μέγιστο φορτίο: 120,27N
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,63mm
Δαπανηθείσα ενέργεια: 17,8mJ



Εικόνα 98: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF18. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.

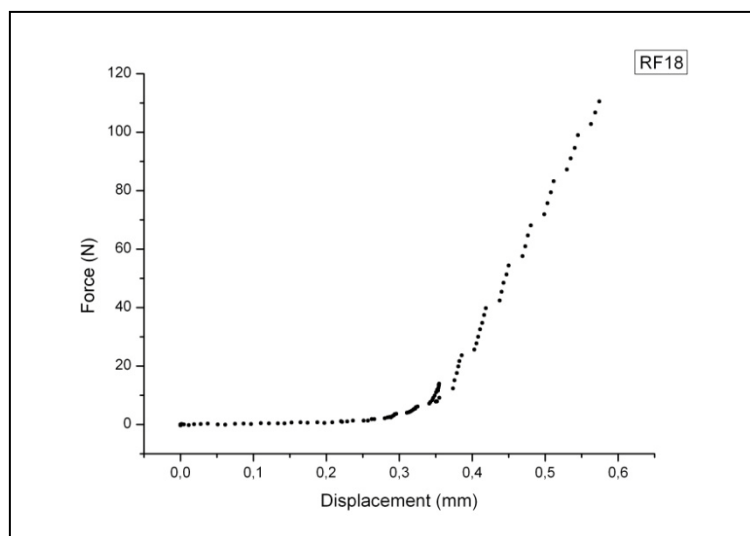


Εικόνα 99: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF18 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF18
Ομάδα: Control με OVX
Ημερομηνία γέννησης: 25/5/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 4/11/2011

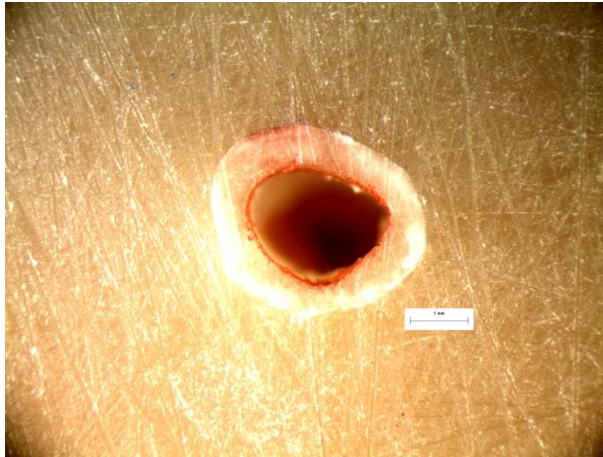


Εικόνα 100: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF18 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

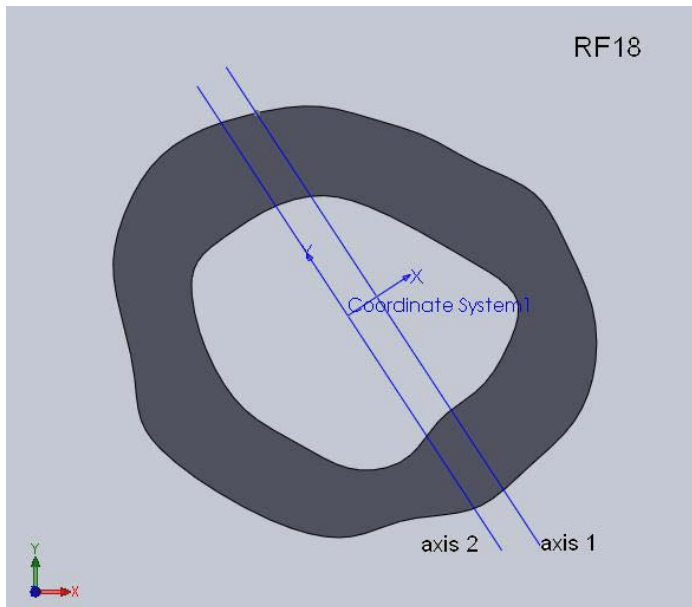


Γράφημα 36: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF18

Μέγιστο φορτίο: 117,07N
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,57mm
Δαπανηθείσα ενέργεια: 13,3mJ



Εικόνα 101: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF18. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.

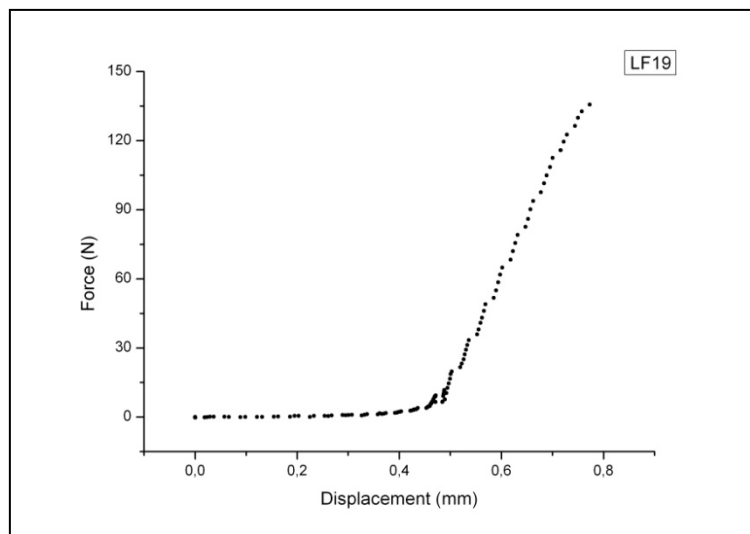


Εικόνα 102: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF18 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF19
Ομάδα: Control με OVX
Ημερομηνία γέννησης: 25/5/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 4/11/2011



Εικόνα 103: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF19 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

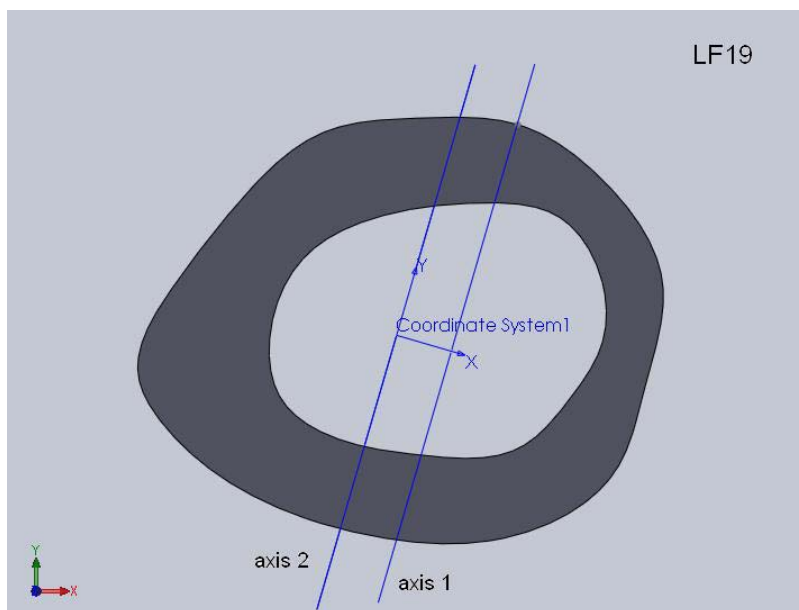


Γράφημα 37: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF19

Μέγιστο φορτίο: 139,00N
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,77mm
Δαπανηθείσα ενέργεια: 22,2mJ



Εικόνα 104: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF19. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.

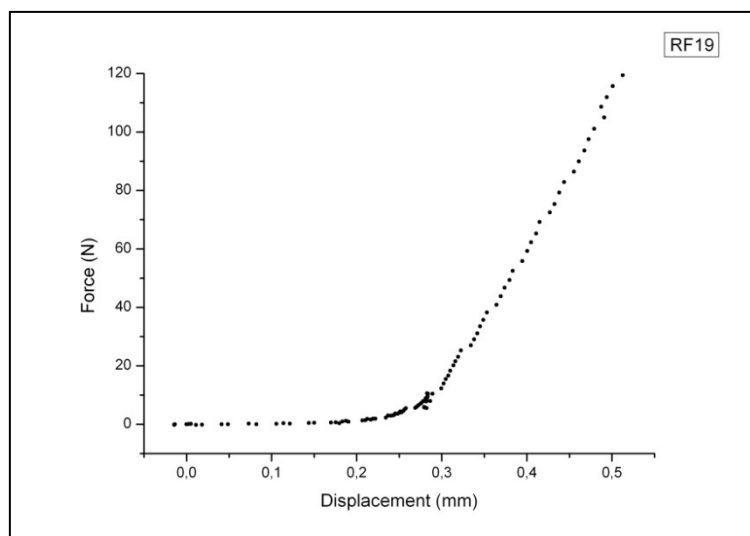


Εικόνα 105: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF19 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF19
Ομάδα: Control με OVX
Ημερομηνία γέννησης: 25/5/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 4/11/2011



Εικόνα 106: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF19 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

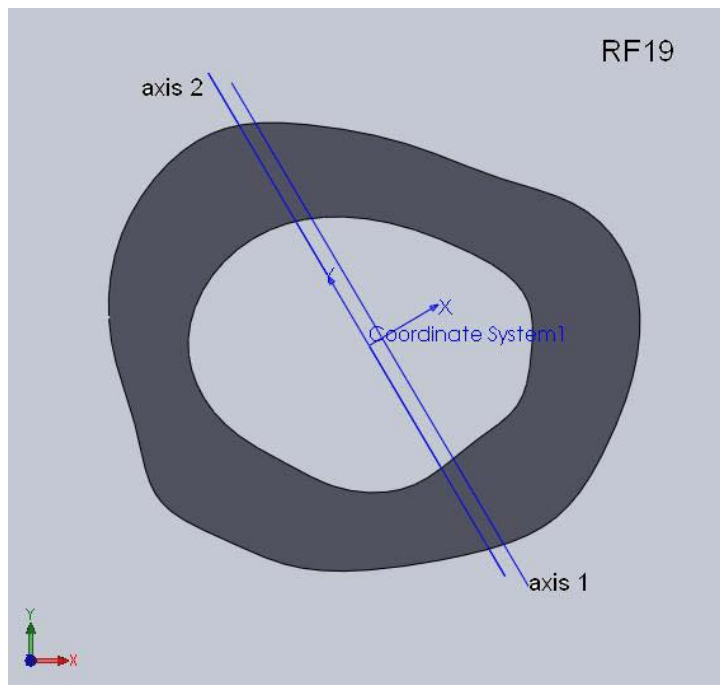


Γράφημα 38: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF19

Μέγιστο φορτίο: 124,42N
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,51mm
Δαπανηθείσα ενέργεια: 14,2mJ

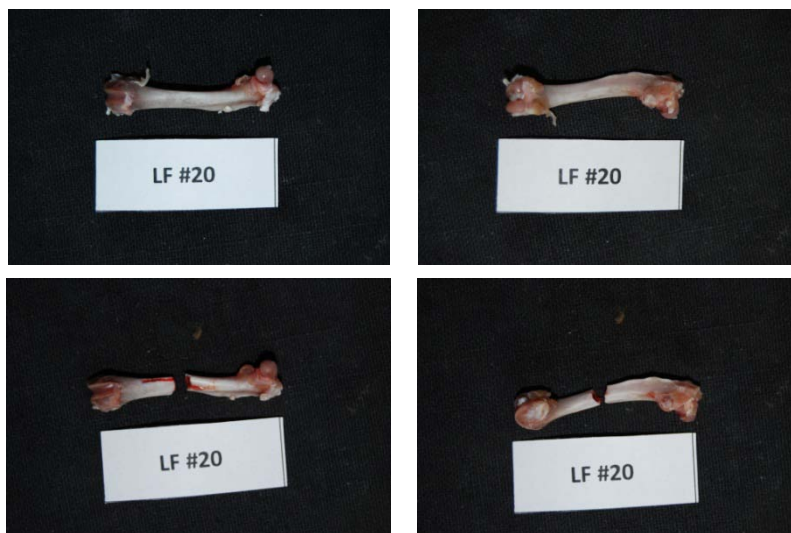


Εικόνα 107: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF19. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.

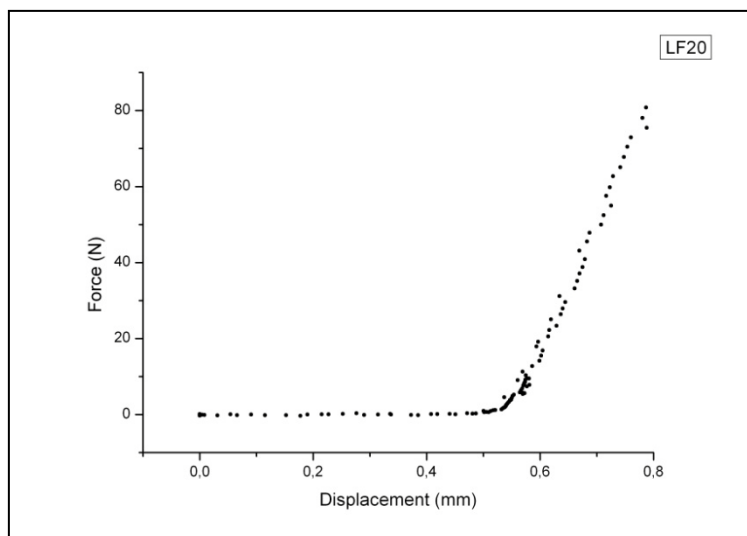


Εικόνα 108: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF19 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF20
Ομάδα: Control με OVX
Ημερομηνία γέννησης: 25/5/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 4/11/2011



Εικόνα 109: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF20 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 39: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF20

Μέγιστο φορτίο: 83,90N

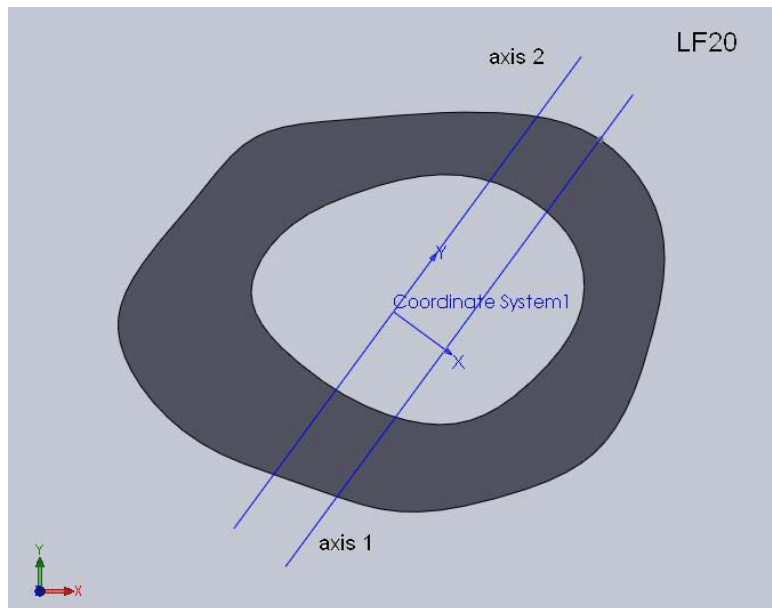
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,79mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 9,5mJ

Παρατηρήσεις: Παρατηρούμε στο διάγραμμα μία μικρή διασπορά των σημείων επειδή “έπαιξε” η γραμμή αναφοράς.

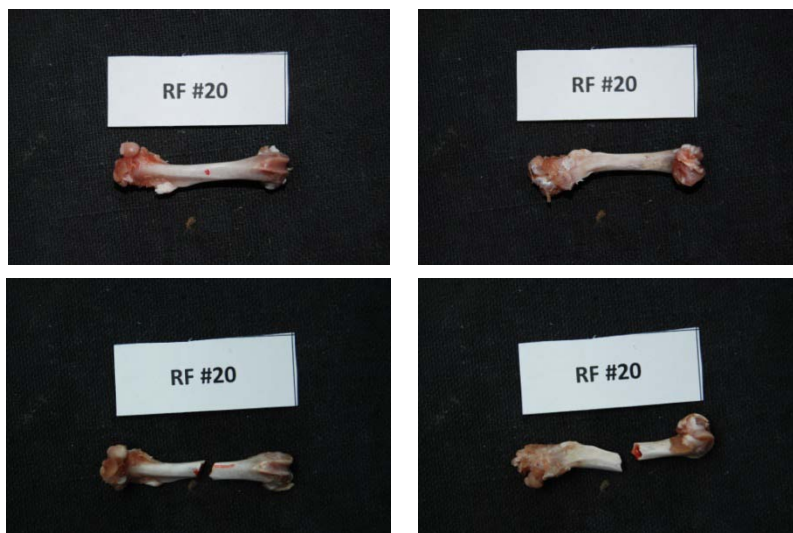


Εικόνα 110: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF20. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.

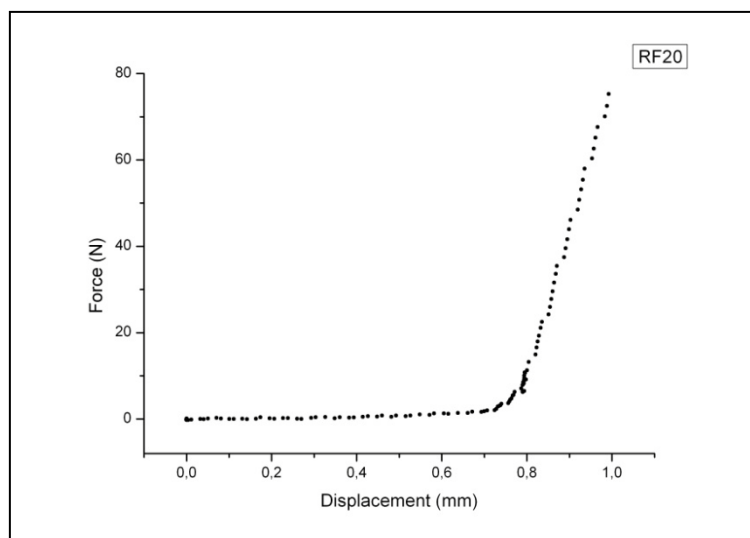


Εικόνα 111: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF20 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF20
Ομάδα: Control με OVX
Ημερομηνία γέννησης: 25/5/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 4/11/2011

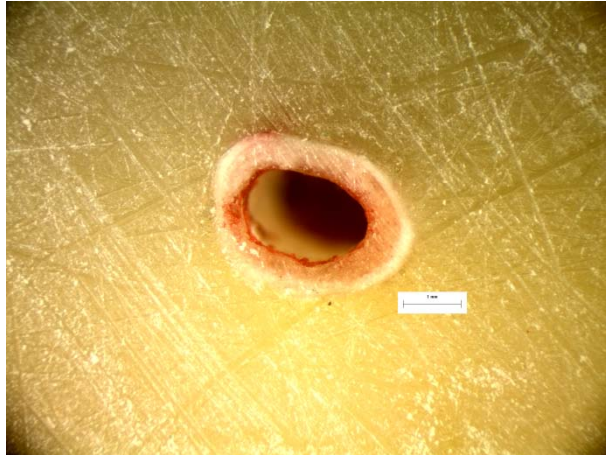


Εικόνα 112: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF20 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

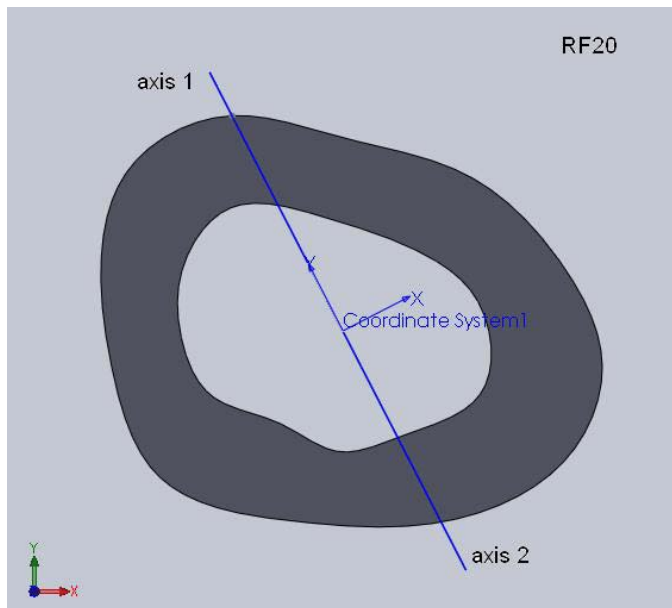


Γράφημα 40: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF20

Μέγιστο φορτίο: 79,38N
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,99mm
Δαπανηθείσα ενέργεια: 8,9mJ



Εικόνα 113: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF20. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 114: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF20 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Ο άξονας φόρτιση διέρχεται πολύ κοντά στο κέντρο συνεπώς οι άξονες 1 και 2 σχεδόν ταυτίζονται.

Κωδικός δοκιμίου: LF21

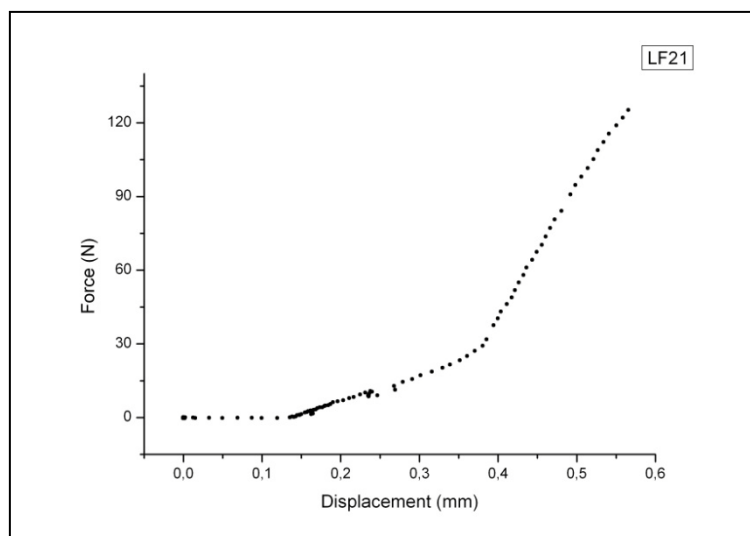
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 25/5/2010

Απεβίωσε: 12/10/2011



Εικόνα 115: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF21 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 41: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF21

Μέγιστο φορτίο: 130,09 N

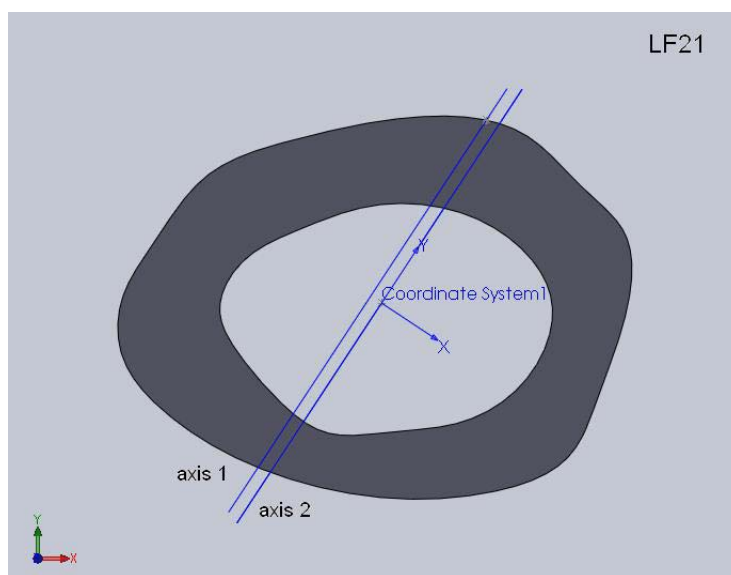
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,57 mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 17,8mJ

Παρατηρήσεις: Το πειραματόζωο απεβίωσε 21 μέρες πριν την προβλεπόμενη ημερομηνία ευθανασίας.



Εικόνα 116: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF21



Εικόνα 117: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF21 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF21

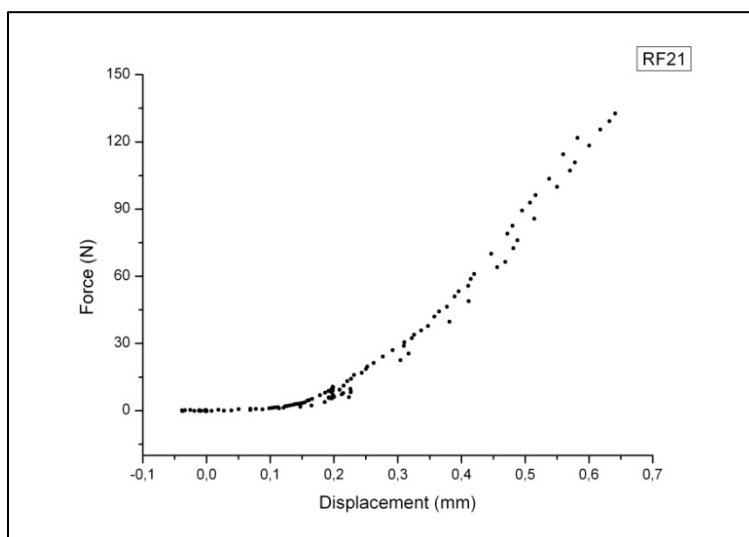
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 25/5/2010

Απεβίωσε: 12/10/2011



Εικόνα 118: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF21 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 42: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF21

Μέγιστο φορτίο: 137,40 N

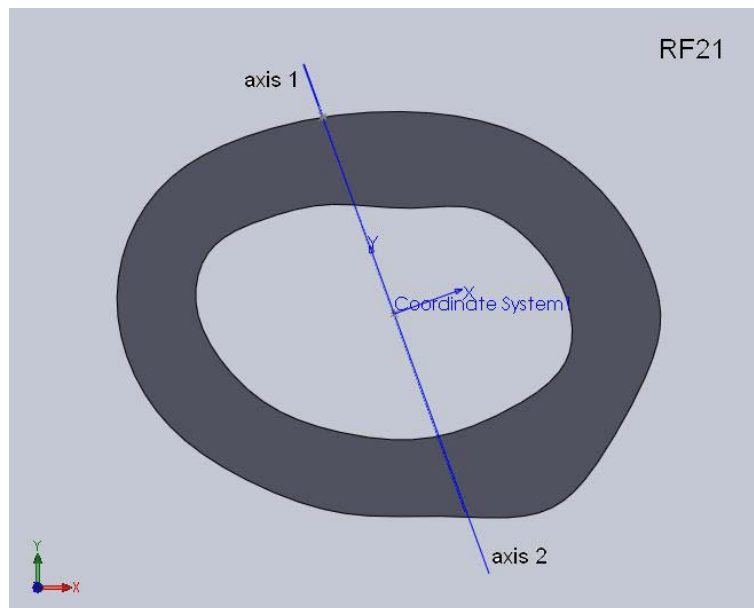
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,64 mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 28,1mJ

Παρατηρήσεις: Το πειραματόζωο απεβίωσε 21 μέρες πριν την προβλεπόμενη ημερομηνία ευθανασίας. Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου. Κατά την φόρτιση ‘έπαιζε’ η μετρητική γραμμή.



Εικόνα 119: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής κοντά στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF21. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 120: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF21 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Ο άξονας φόρτισης διέρχεται πολύ κοντά στο κέντρο συνεπώς οι άξονες 1 και 2 σχεδόν ταυτίζονται.

Κωδικός δοκιμίου: LF22

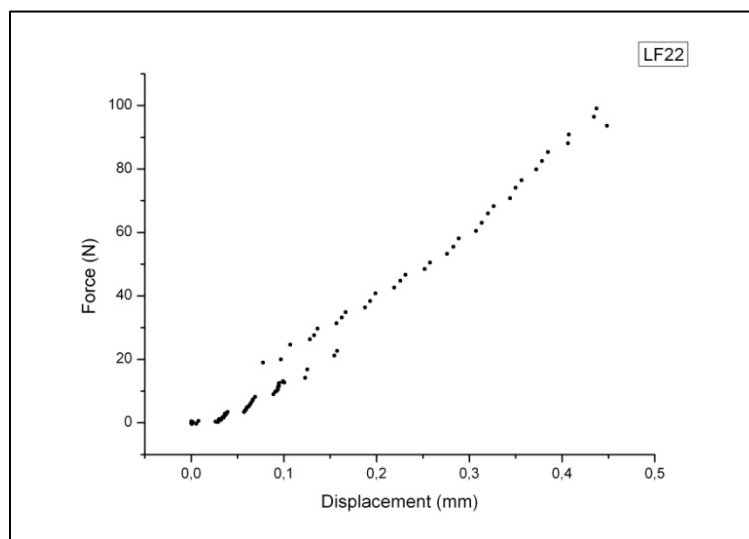
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 25/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 2/11/2011



Εικόνα 121: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF22 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Εικόνα 43: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF22

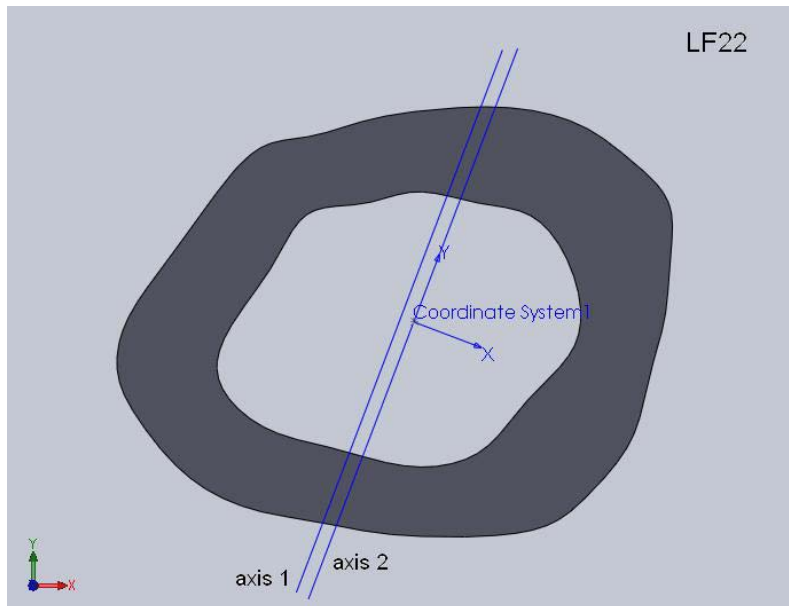
Μέγιστο φορτίο: 102,55 N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,44mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 19,0mJ



Εικόνα 122: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF22. Είναι εμφανές το σημείο προφόρτισης του δοκιμίου στα 10N.



Εικόνα 123 : Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF22 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF22

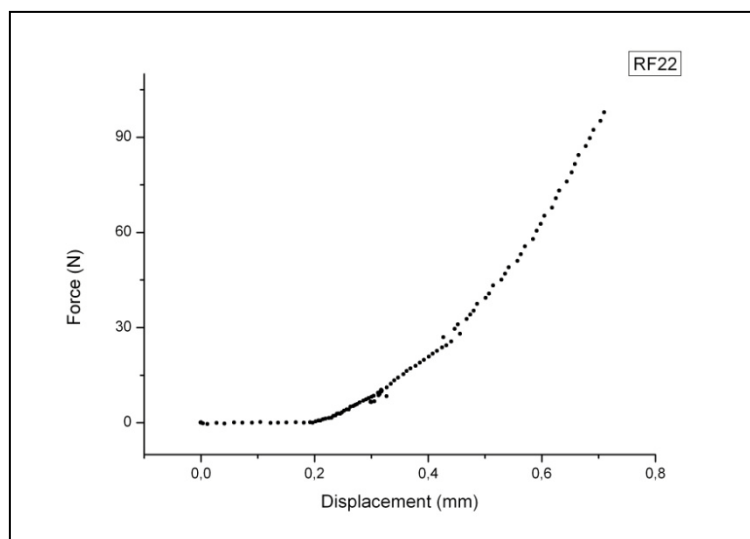
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 25/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 2/11/2011



Εικόνα 124: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF22 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 44: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF22

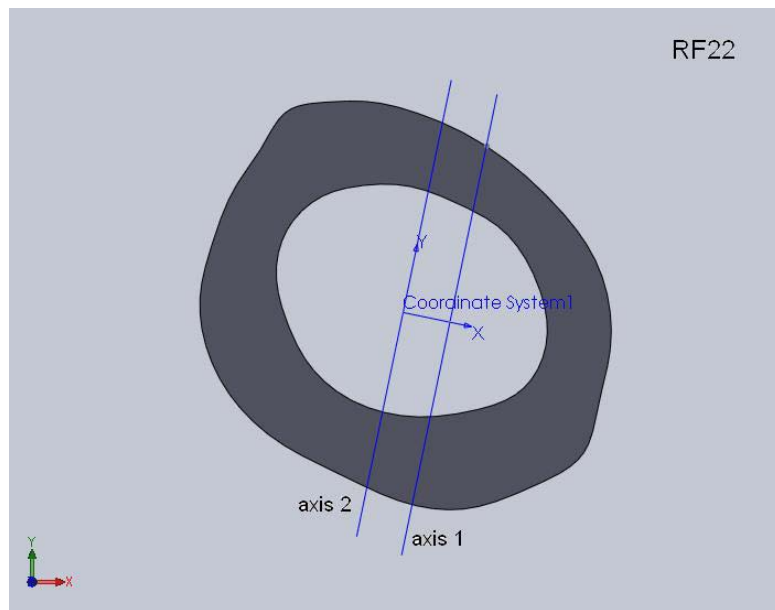
Μέγιστο φορτίο: 100,93 N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,71 mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 18,7mJ



Εικόνα 125: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF22. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



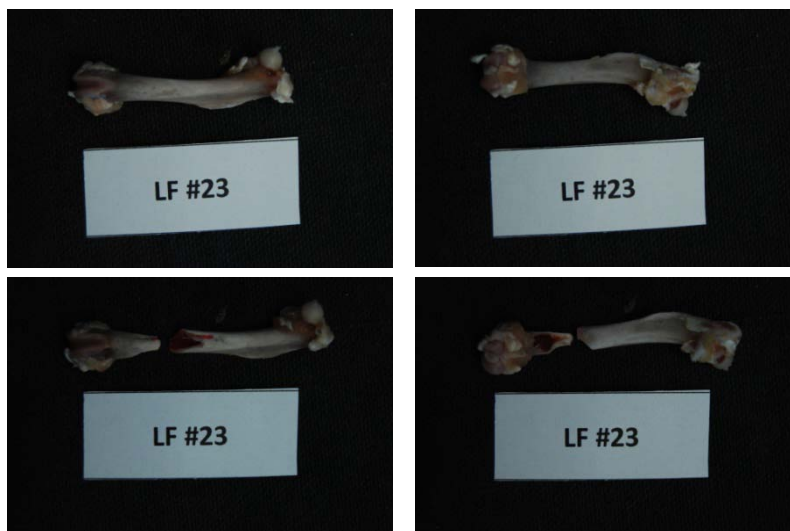
Εικόνα 126: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF22 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF23

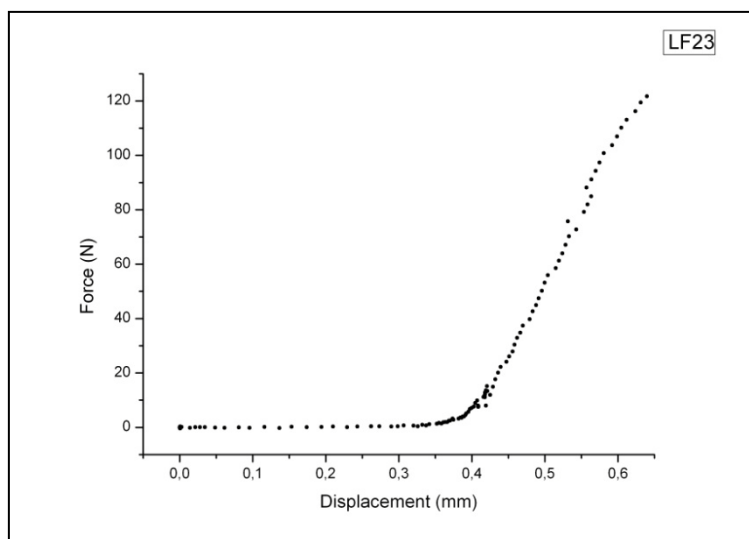
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 25/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 2/11/2011



Εικόνα 127: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF23 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



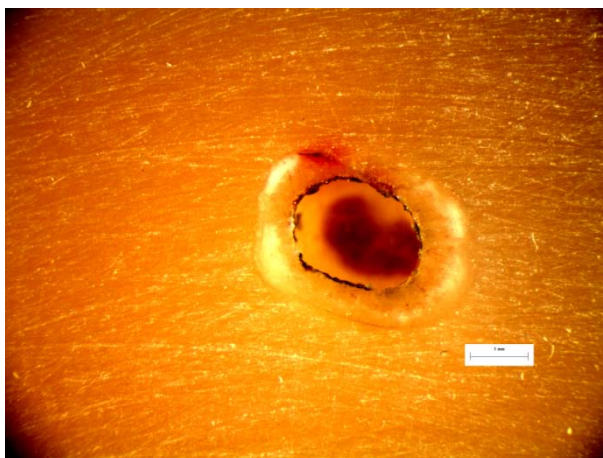
Γράφημα 45: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF23

Μέγιστο φορτίο: 125,31 N

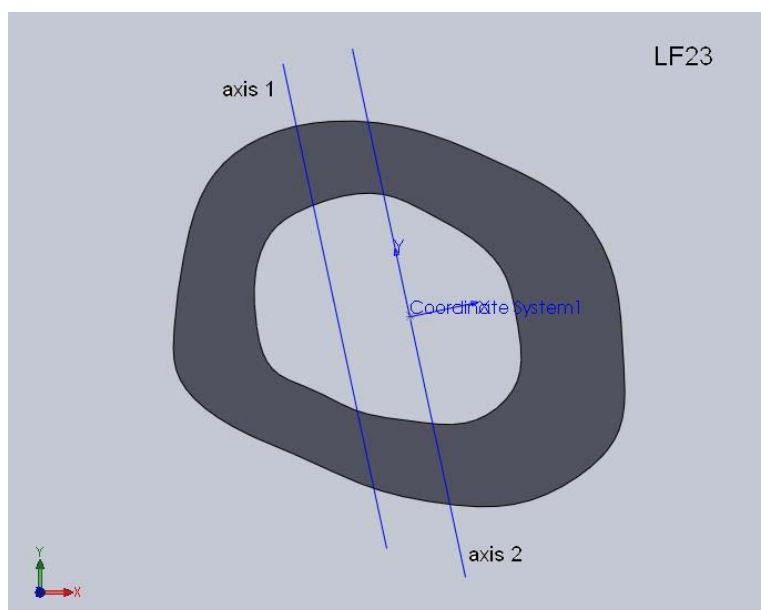
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,64 mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 15,5mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.



Εικόνα 128: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής κοντά στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF23. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



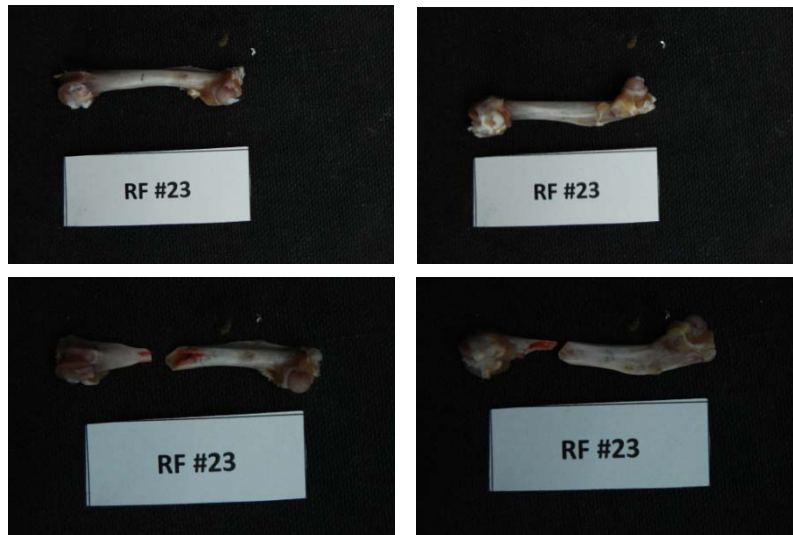
Εικόνα 129: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF23 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF23

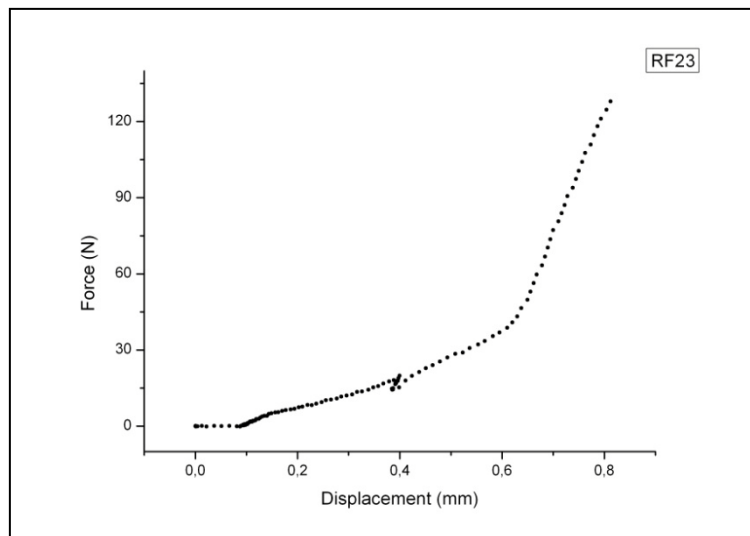
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 25/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 2/11/2011



Εικόνα 130: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF23 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 46: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF23

Μέγιστο φορτίο: 131,26 N

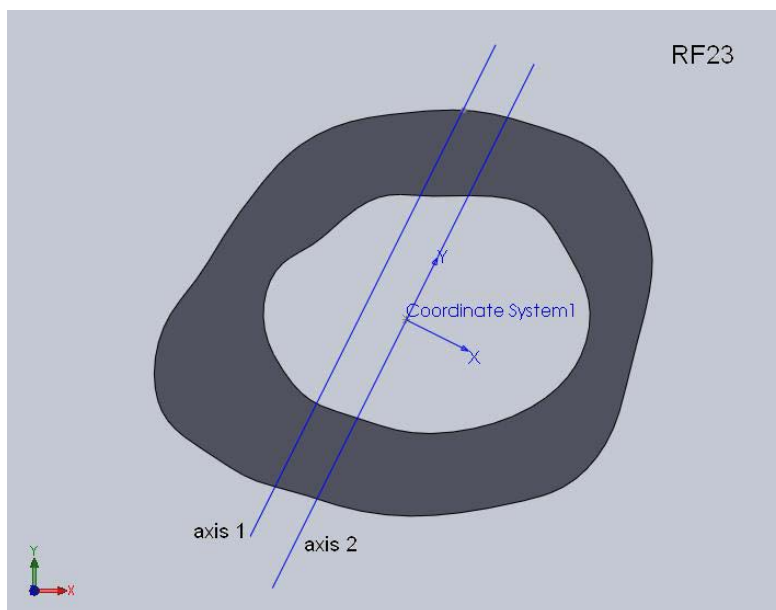
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,81 mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 25,2mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.



Εικόνα 131: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής κοντά στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF23. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 132: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF23 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF24

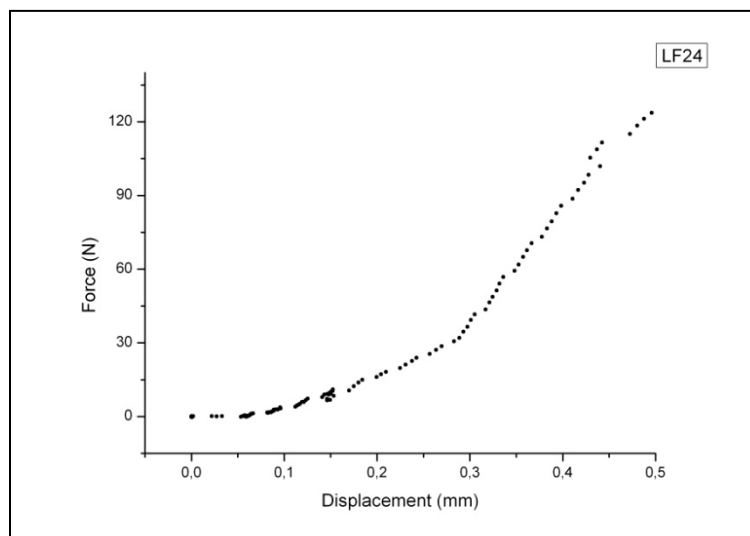
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 25/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 2/11/2011



Εικόνα 133: Πρόσθια και σπίσθια όψη του δοκιμίου LF24 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 47: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF24

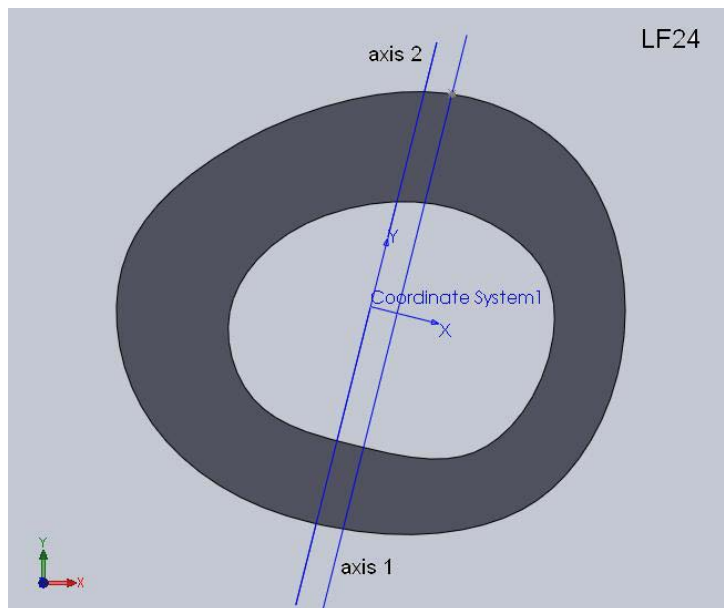
Μέγιστο φορτίο: 126,54 N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,50 mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 20,0mJ



Εικόνα 134: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής κοντά στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF24. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης του δοκιμίου στα 10N.



Εικόνα 135: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF24 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF24

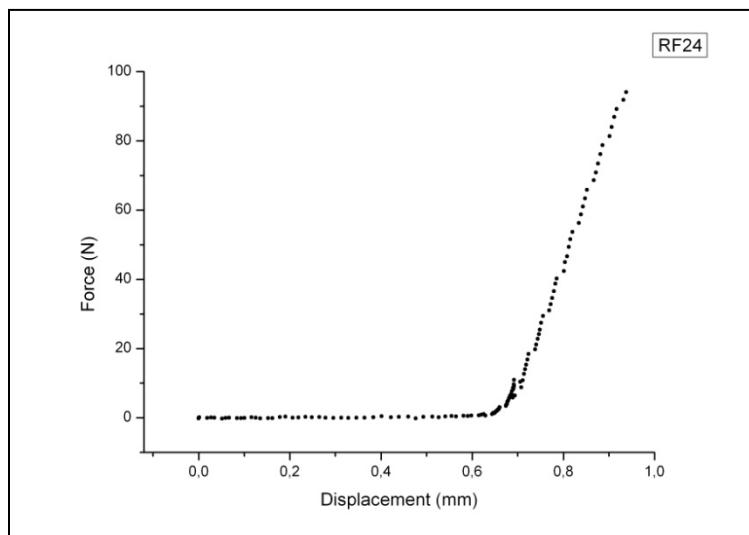
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 25/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 2/11/2011



Εικόνα 136: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF24 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 48: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF24

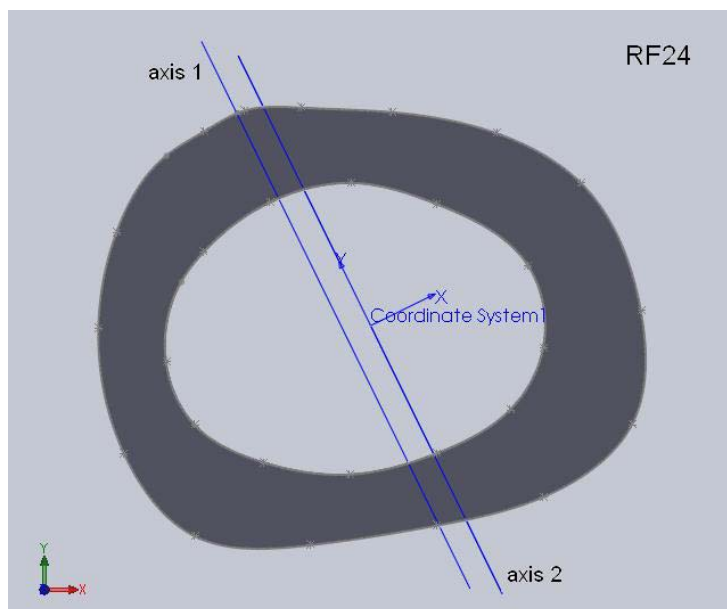
Μέγιστο φορτίο: 96,48N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,94 mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 12,6mJ



Εικόνα 137: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής κοντά στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF24. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 138: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF24 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF25

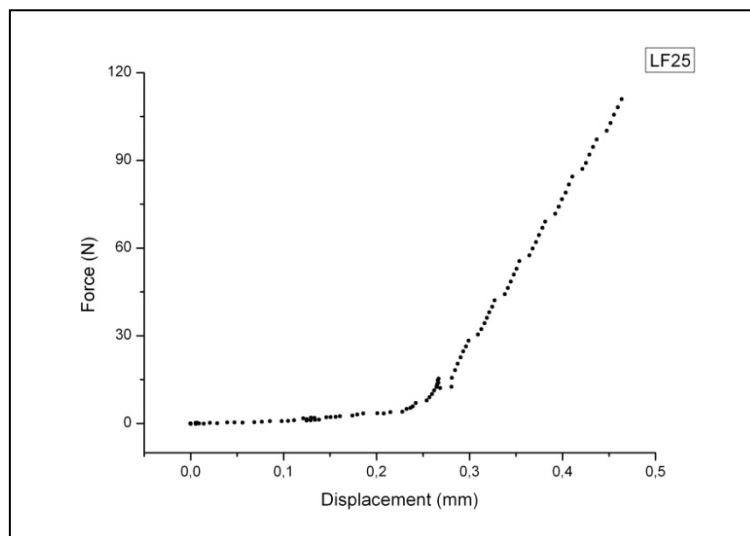
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 26/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 11/11/2011



Εικόνα 139: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF25 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 49: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF25

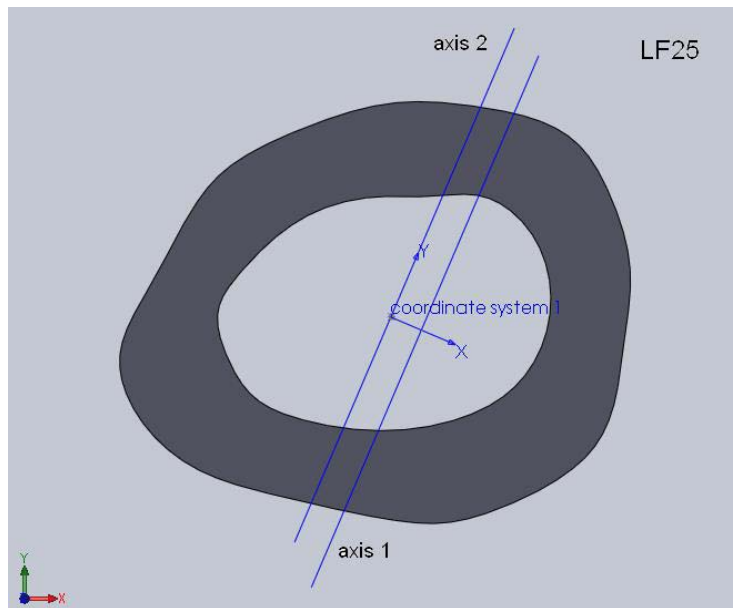
Μέγιστο φορτίο: 115,72N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,46mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 12,4mJ



Εικόνα 140: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF25. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 141: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF25 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF25

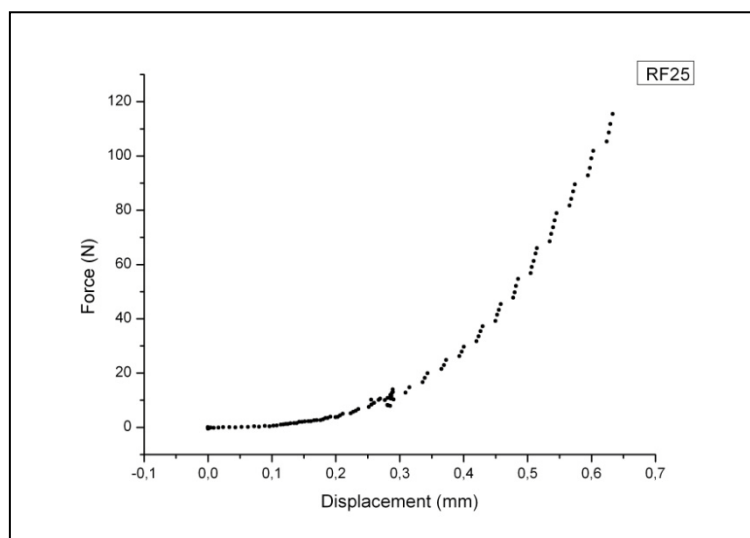
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 26/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 11/11/2011



Εικόνα 142: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF25 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 50: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF25

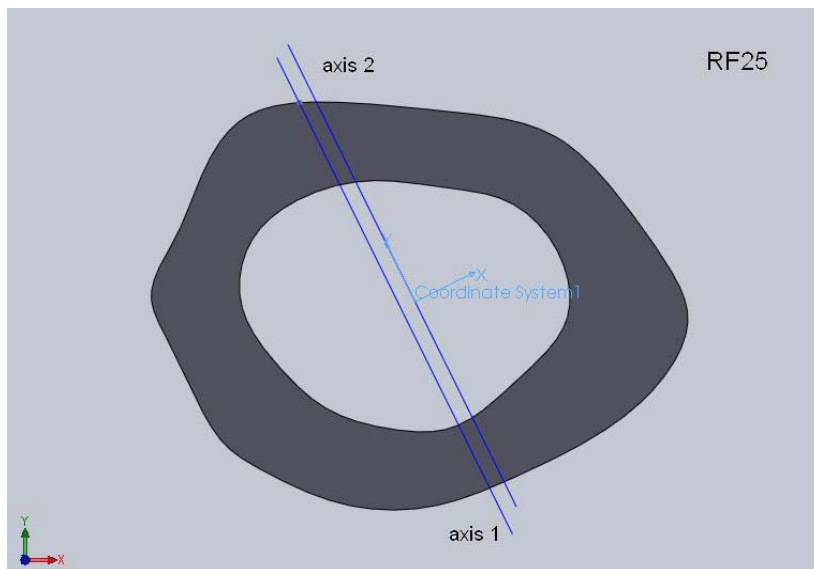
Μέγιστο φορτίο: 121,39N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,63mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 18,4mJ



Εικόνα 143: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF25. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 144: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF25 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF26

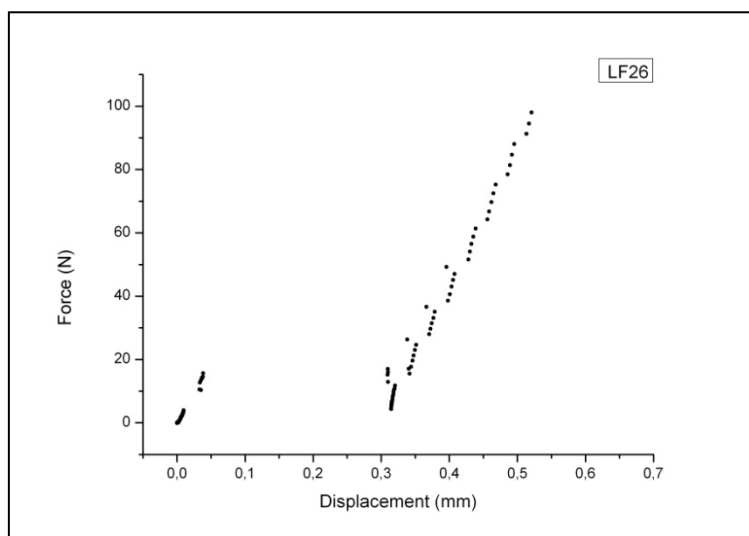
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 26/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 11/11/2011



Εικόνα 145: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF26 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 51: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF26

Μέγιστο φορτίο: 101,17N

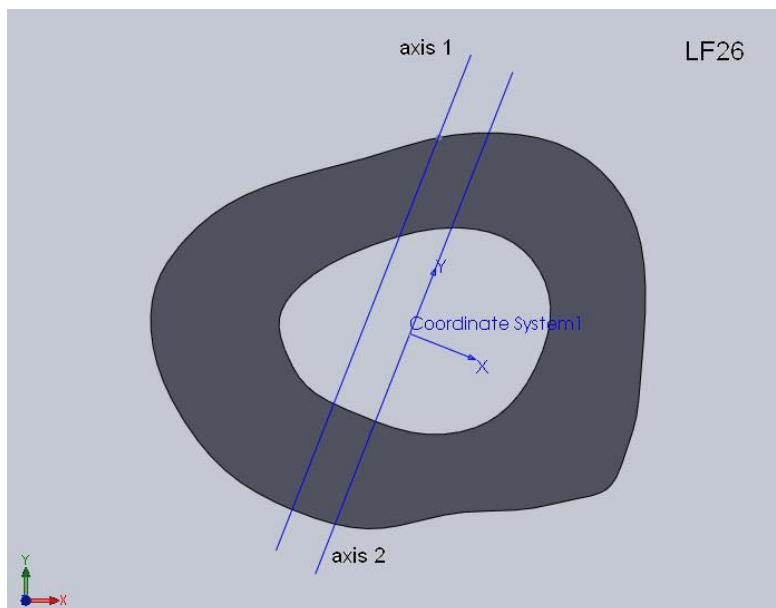
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,52mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 10,6mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου κατά την χειρουργική διαδικασία. Κατά την φόρτισή του έκανε μια περιστροφή.



Εικόνα 146: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF26. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 147: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF26 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF26

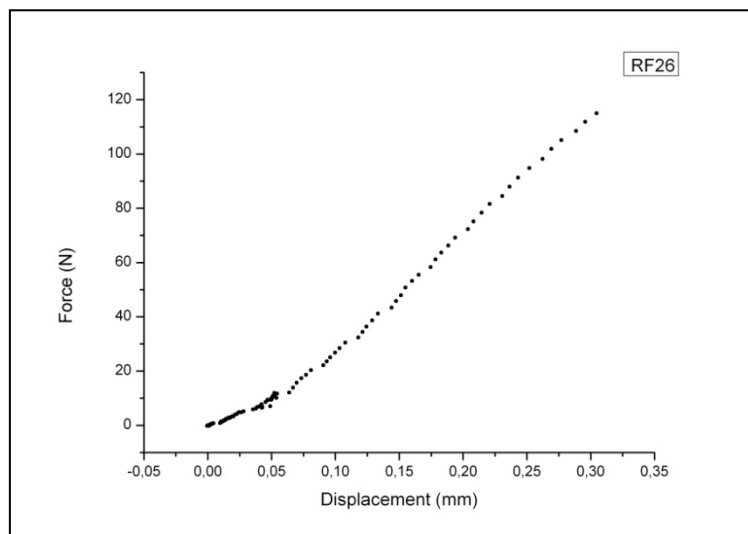
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 26/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 11/11/2011



Εικόνα 148: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF26 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 52: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF26

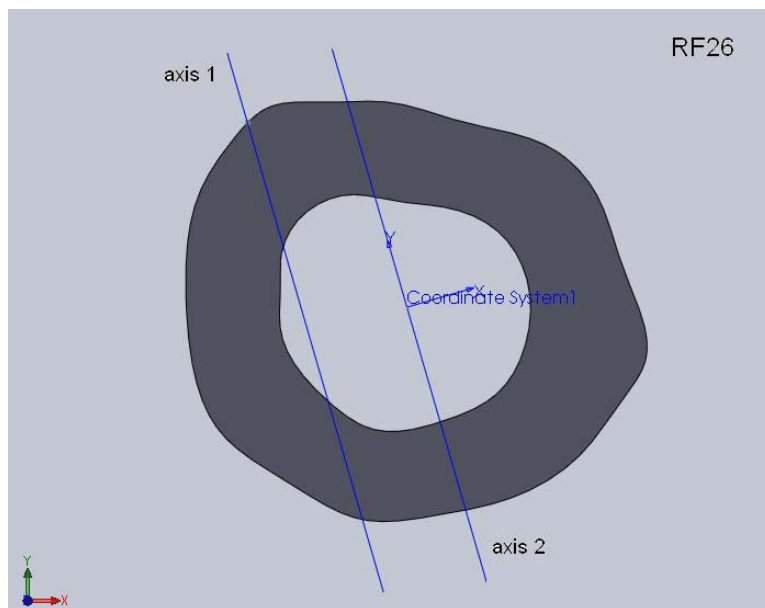
Μέγιστο φορτίο: 118,34N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,30mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 15,7mJ



Εικόνα 149: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF26. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 150: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF26 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF27

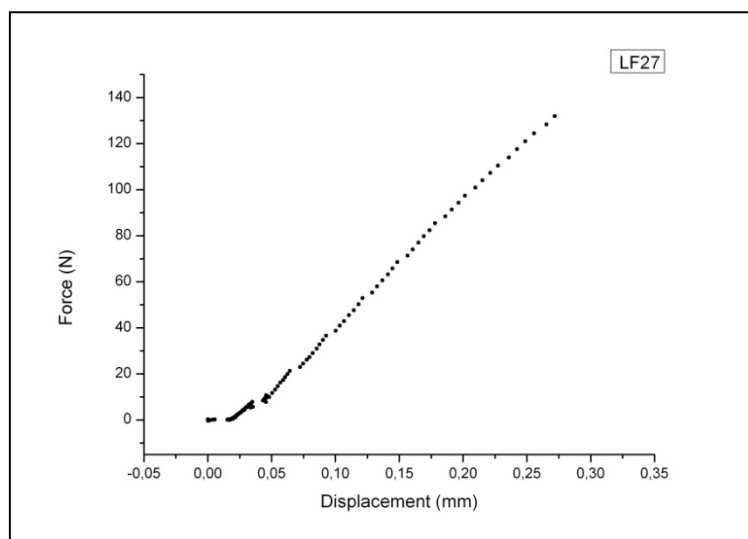
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 26/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 11/11/2011



Εικόνα 151: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF27 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 53: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF27

Μέγιστο φορτίο: 135,47N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,27mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 16,5mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF27

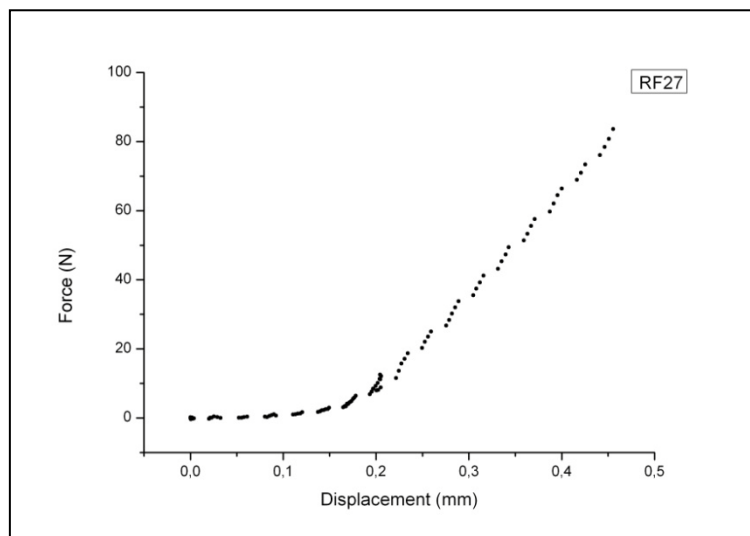
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 26/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 11/11/2011



Εικόνα 152: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF27 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 54: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF27

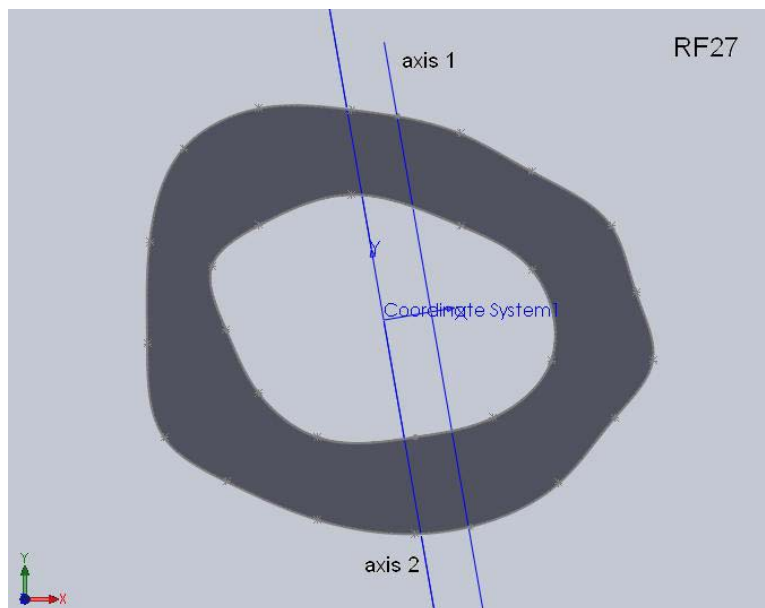
Μέγιστο φορτίο: 86,45N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,46mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 11,6mJ



Εικόνα 153: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF27. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 154: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF27 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF28

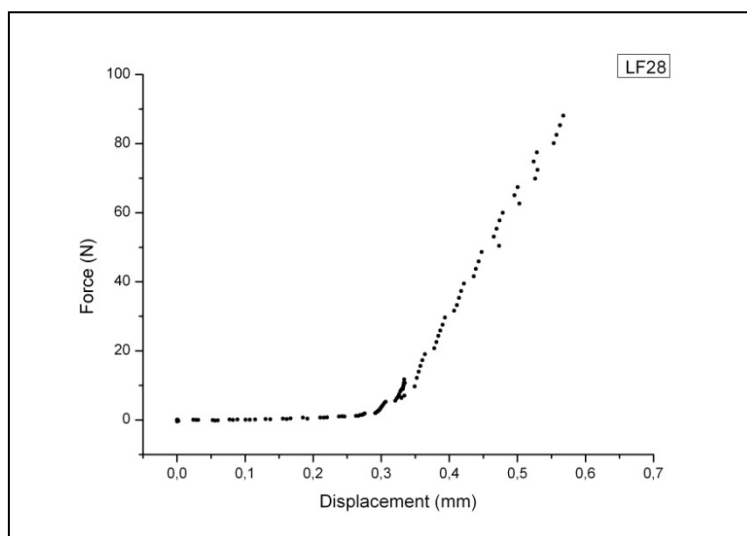
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 26/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 11/11/2011



Εικόνα 155: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF28 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 55: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF28

Μέγιστο φορτίο: 92,30N

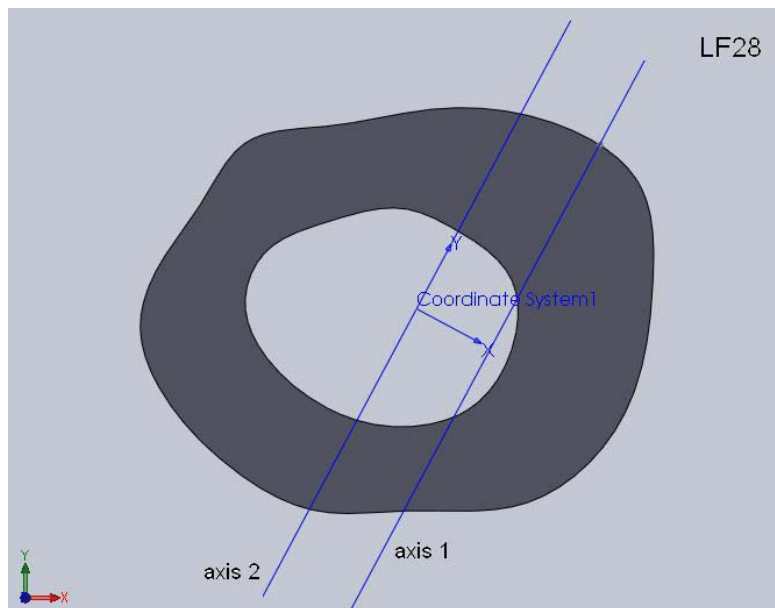
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,57mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 11,4mJ

Παρατηρήσεις: Παρατηρούμε στο διάγραμμα μία μικρή διασπορά των σημείων επειδή “έπαιξε” η γραμμή αναφοράς.



Εικόνα 156: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF28. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 157: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF28 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF28

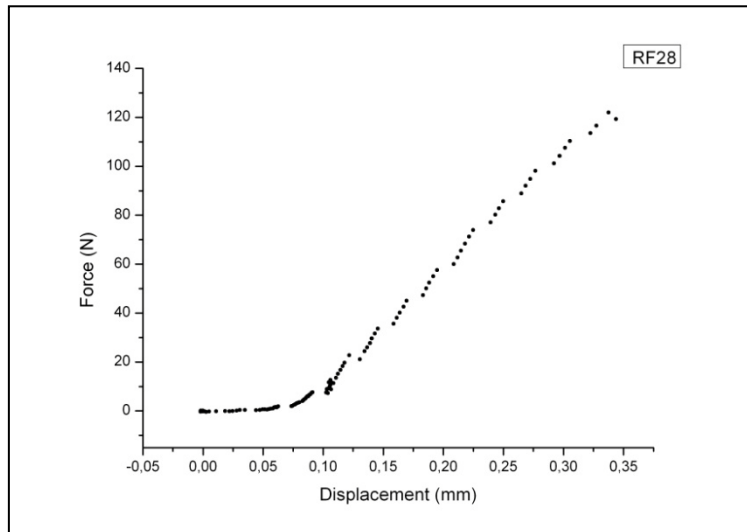
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 26/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 11/11/2011



Εικόνα 158: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF28 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 56: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF28

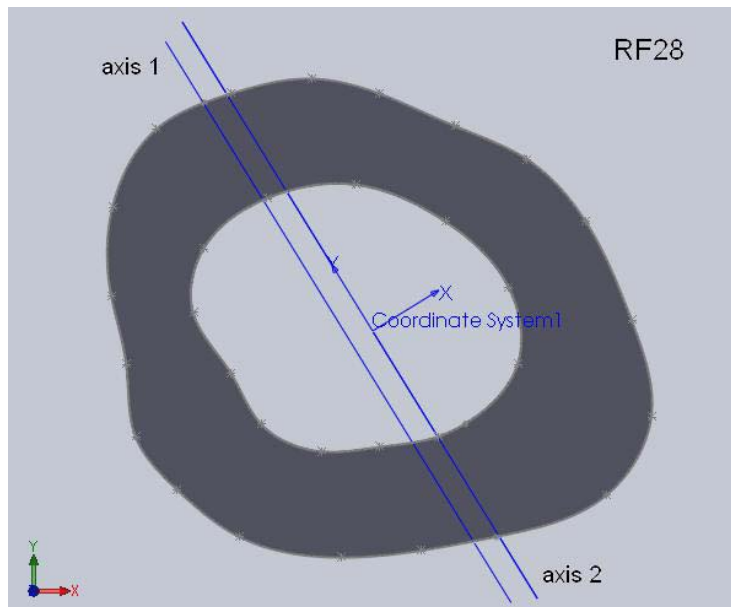
Μέγιστο φορτίο: 125,96N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,34mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 16,1mJ



Εικόνα 159: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF28. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.



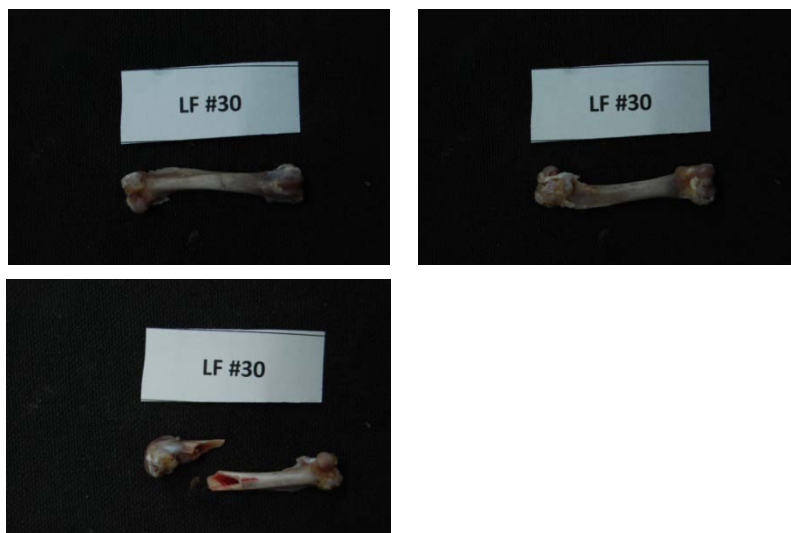
Εικόνα 160: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF28 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF30

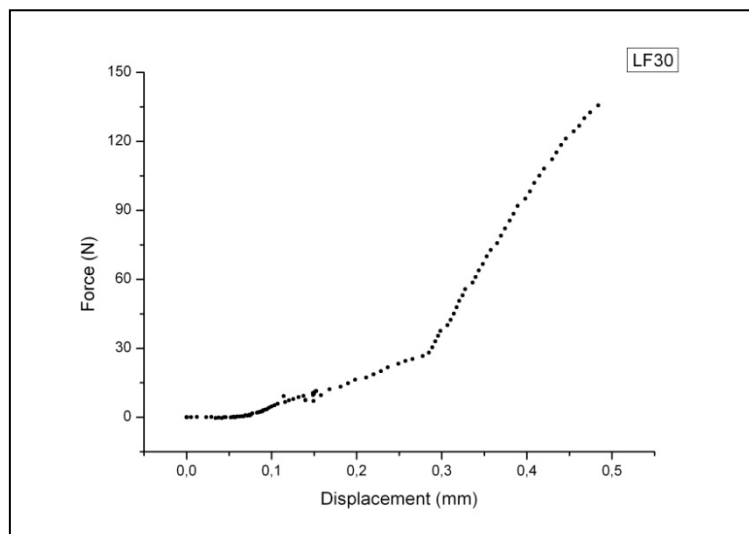
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης: 26/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 2/11/2011



Εικόνα 161: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF30 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



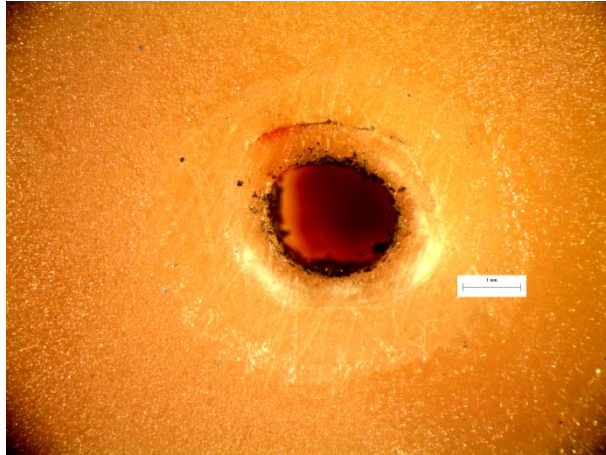
Γράφημα 57: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF30

Μέγιστο φορτίο: 138,58N

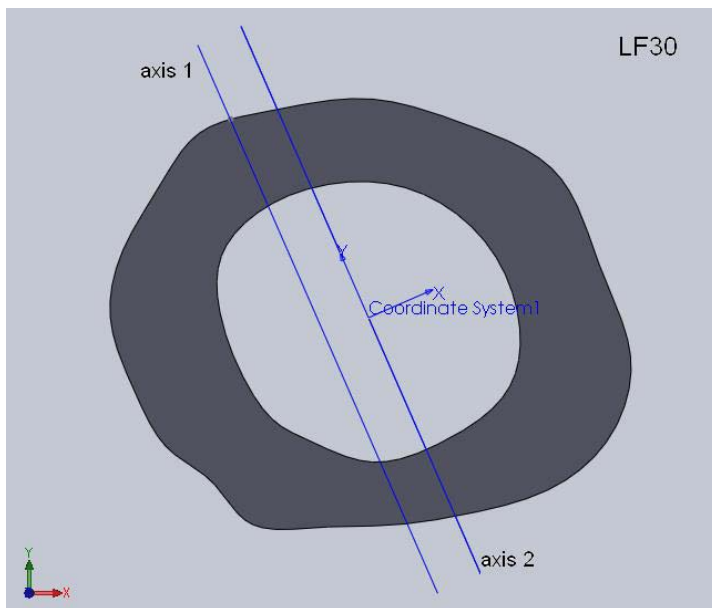
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,48mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 20,1mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.



Εικόνα 162: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF30. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



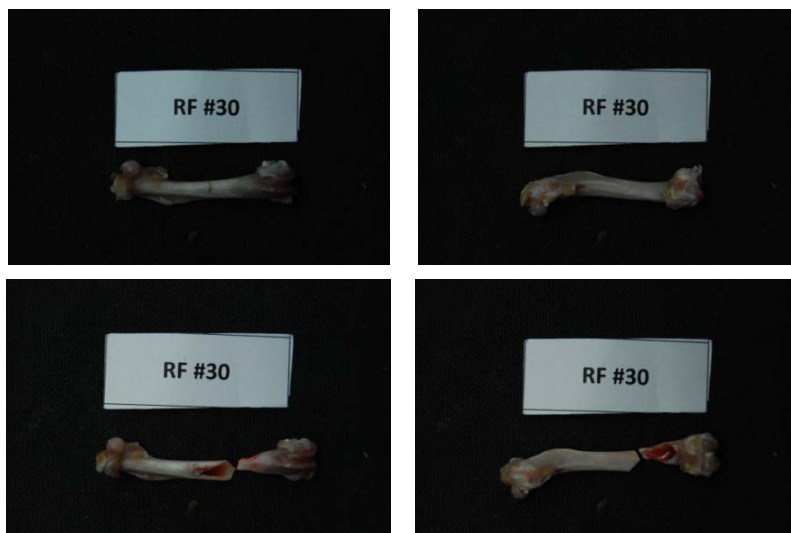
Εικόνα 163: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF30 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF30

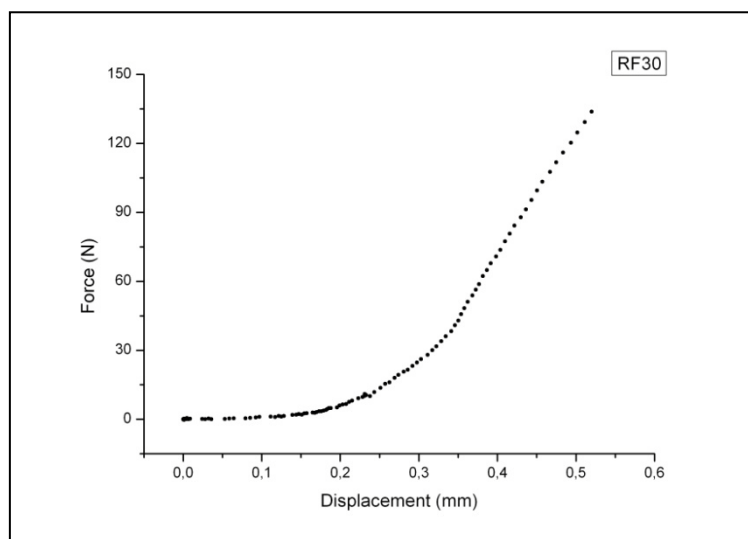
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης: 26/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 2/11/2011



Εικόνα 164: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF30 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 58: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF30

Μέγιστο φορτίο: 141,12N

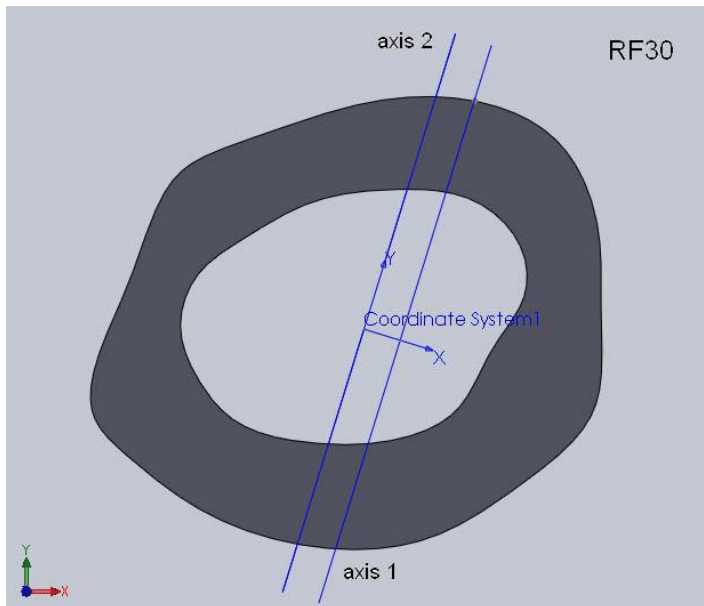
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,52mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 18,7mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.



Εικόνα 165: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF30. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 166: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF30 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF31

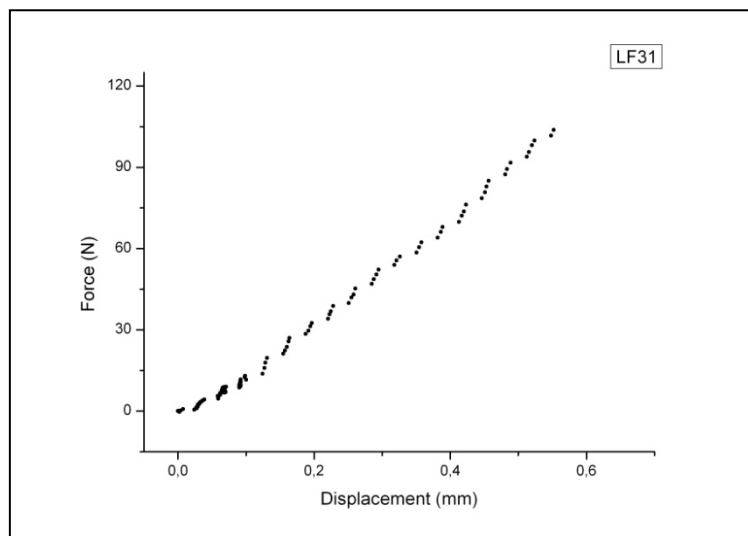
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης: 26/5/2010

Απεβίωσε: 26/10/2011



Εικόνα 167: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF31 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 59: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF31

Μέγιστο φορτίο: 105,42N

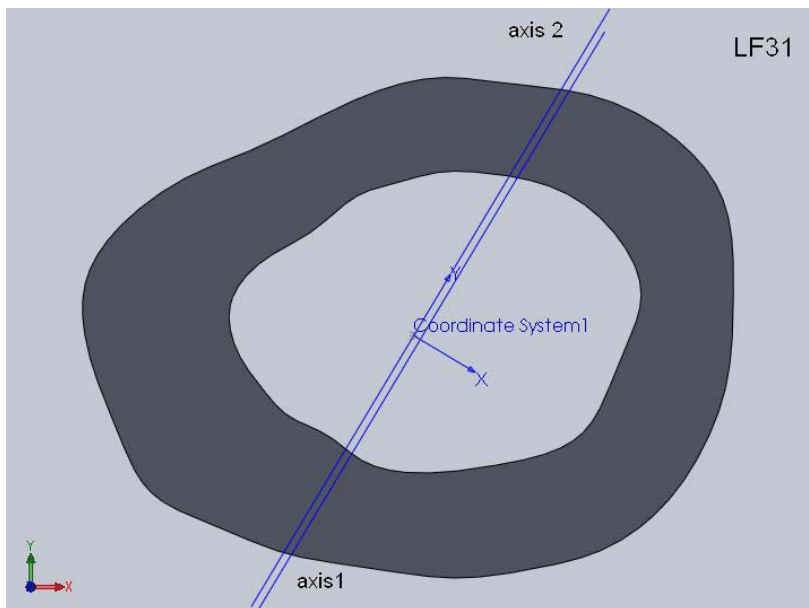
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,55mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 26,1mJ

Παρατηρήσεις: Το πειραματόζωο απεβίωσε 7 μέρες πριν την προβλεπόμενη ημερομηνία ευθανασίας.



Εικόνα 168: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF31. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 169: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF31 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF31

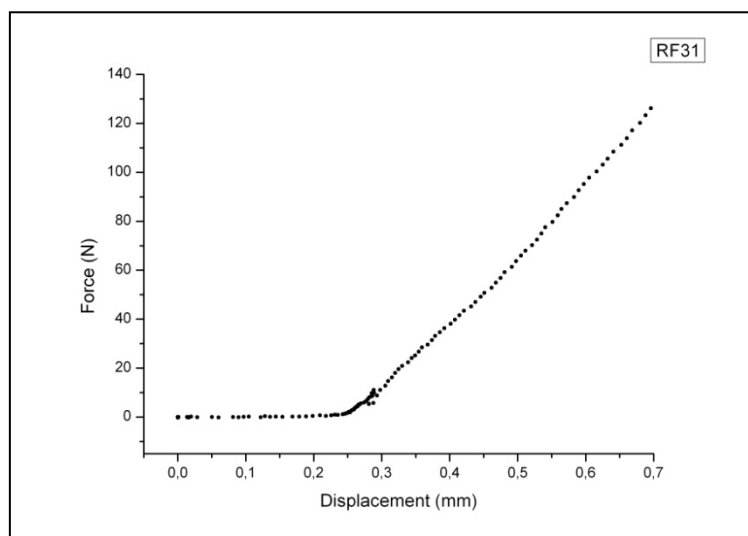
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης: 26/5/2010

Απεβίωσε: 26/10/2011



Εικόνα 170: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF31 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 60: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF31

Μέγιστο φορτίο: 131,13N

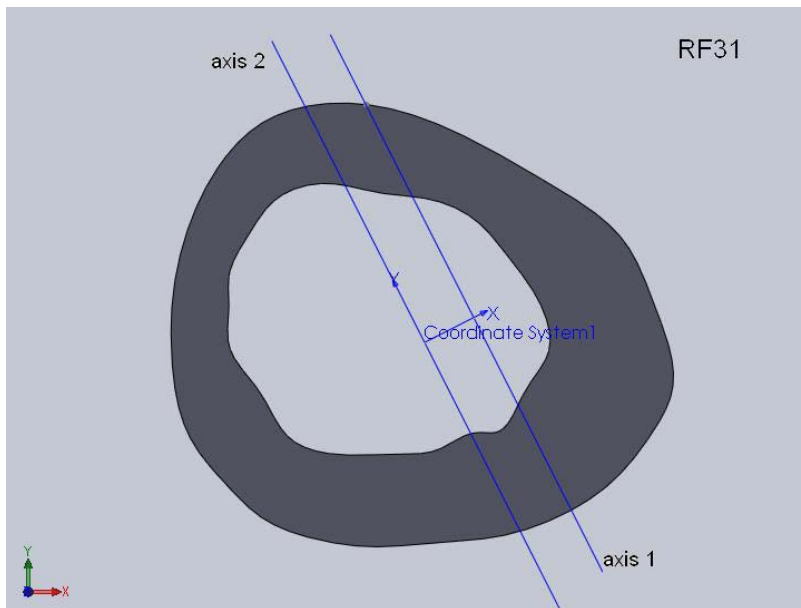
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,70mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 26,6mJ

Παρατηρήσεις: Το πειραματόζωο απεβίωσε 7 μέρες πριν την προβλεπόμενη ημερομηνία ευθανασίας.



Εικόνα 171: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF31. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 172: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF31 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF32

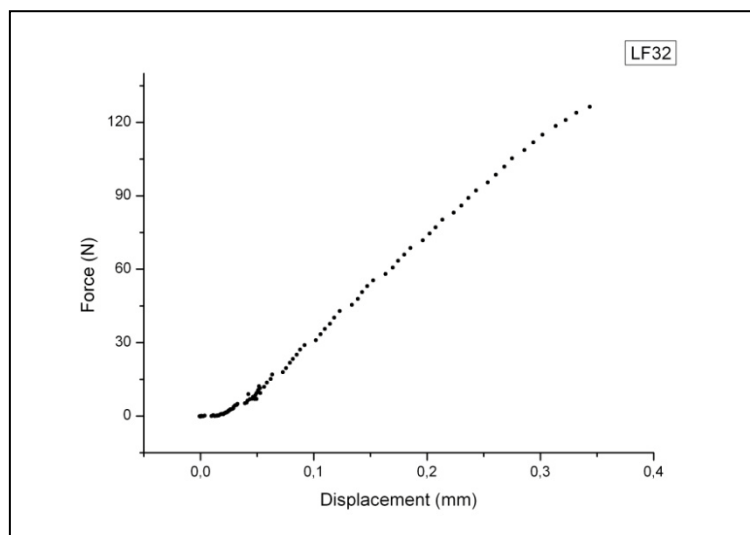
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης: 26/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 2/11/2011



Εικόνα 173: Πρόσθια όψη του δοκιμίου LF32 πριν το πείραμα κάμψης.



Γράφημα 61: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF32

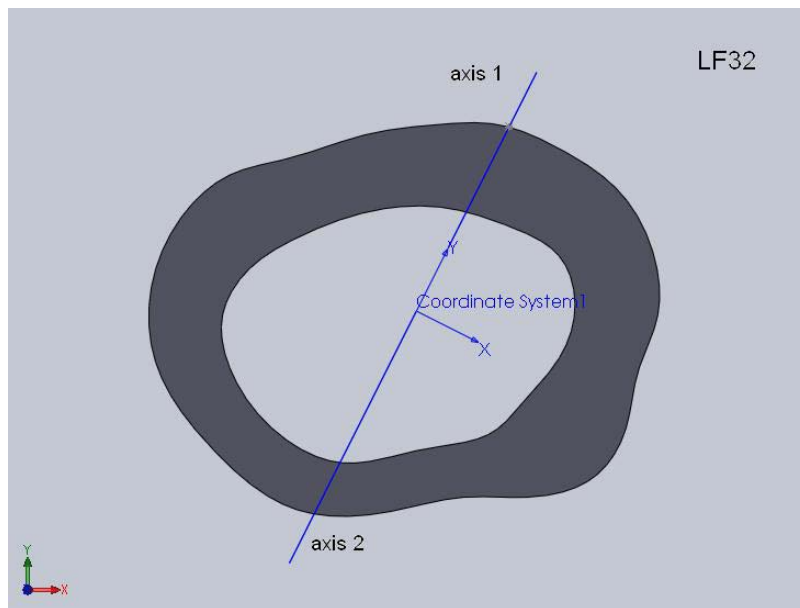
Μέγιστο φορτίο: 129,74N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,34mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 21,2mJ



Εικόνα 174: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF32. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 175: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF32 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Ο άξονας φόρτισης διέρχεται πολύ κοντά στο γεωμετρικό κέντρο της διατομής γι αυτό οι άξονες 1 και 2 σχεδόν ταυτίζονται.

Κωδικός δοκιμίου: RF32

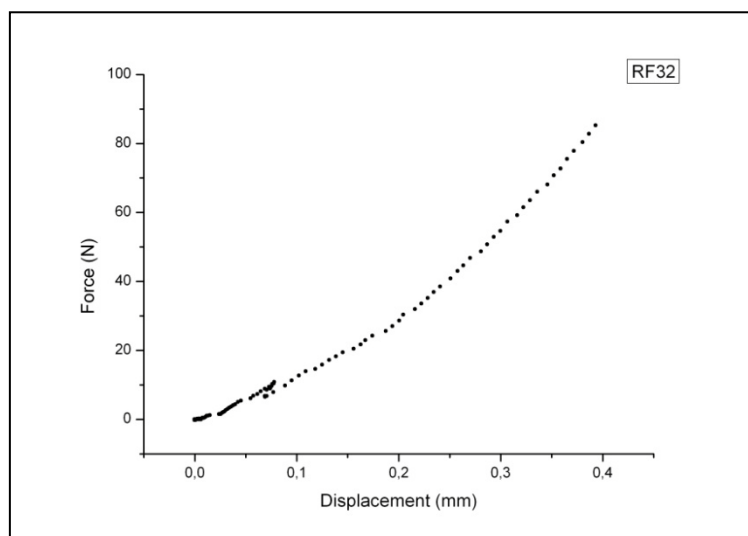
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης: 26/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 2/11/2011



Εικόνα 176: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF32 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 62: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF32

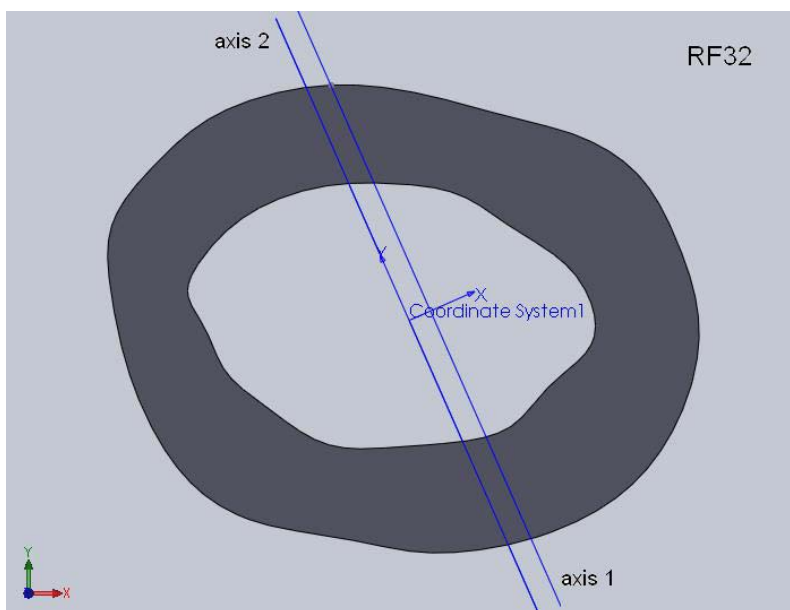
Μέγιστο φορτίο: 89,43N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,39mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 13,1mJ



Εικόνα 177: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF32. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 178: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF32 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF33

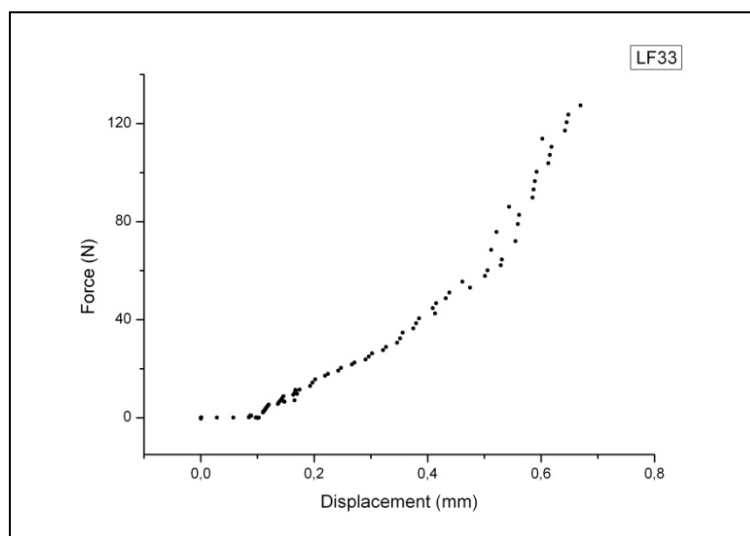
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 27/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 7/11/2011



Εικόνα 179: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF33 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 63: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF33

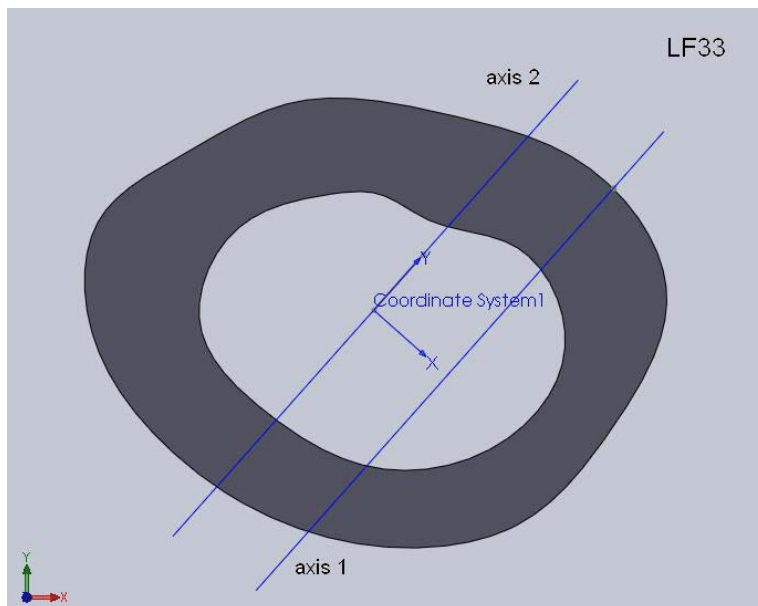
Μέγιστο φορτίο: 132,29N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,67mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 27,3mJ



Εικόνα 180: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF33. Στο δεξιά επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 181: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF33 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF33

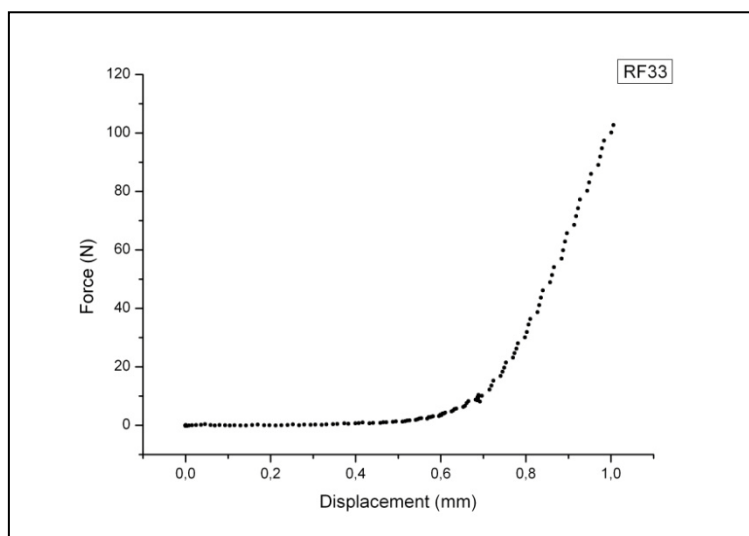
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 27/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 7/11/2011



Εικόνα 182: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF33 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 64: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF33

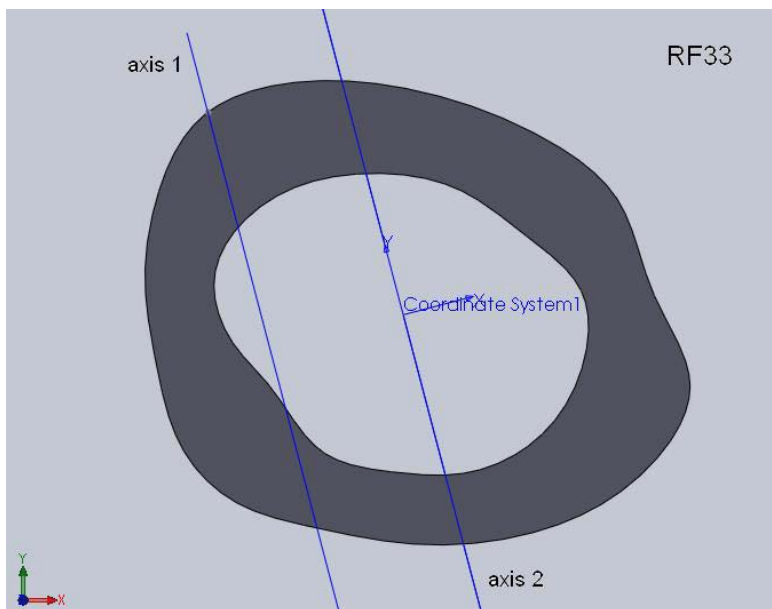
Μέγιστο φορτίο: 106,66N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 1,01mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 16,8mJ



Εικόνα 183: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF33. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 184: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF33 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF34

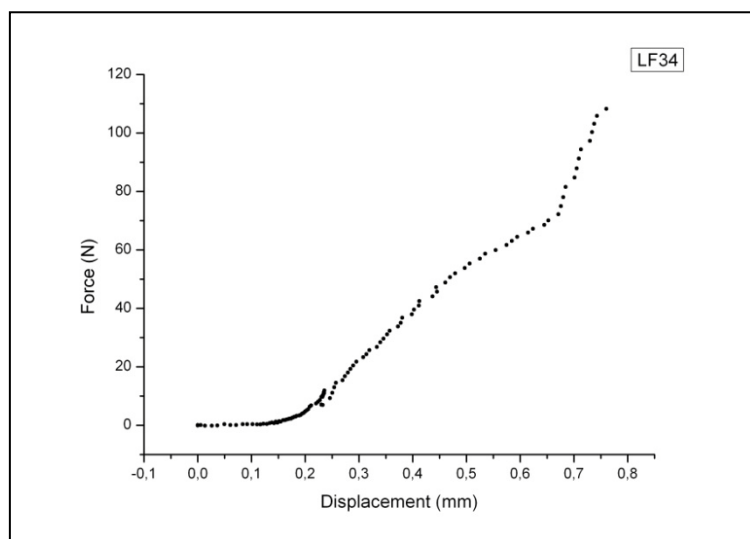
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 27/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 7/11/2011



Εικόνα 185: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF34 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 65: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF34

Μέγιστο φορτίο: 112,22N

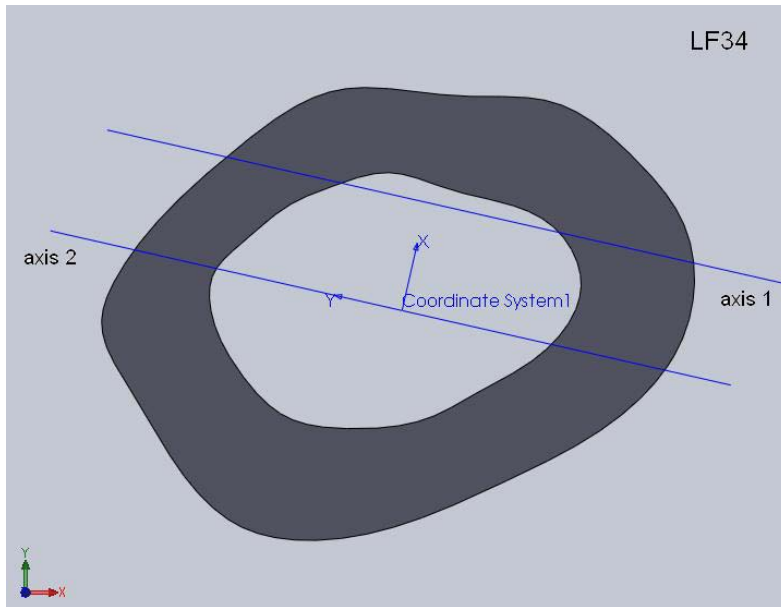
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,76mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 28,3mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.



Εικόνα 186: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF34. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 187: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF34 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF34

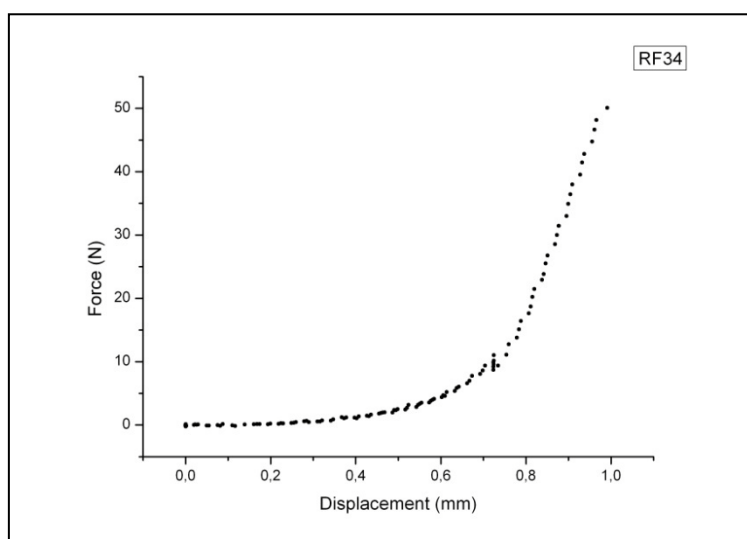
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 27/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 7/11/2011



Εικόνα 188: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF34 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 66: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF34

Μέγιστο φορτίο: 51,05N

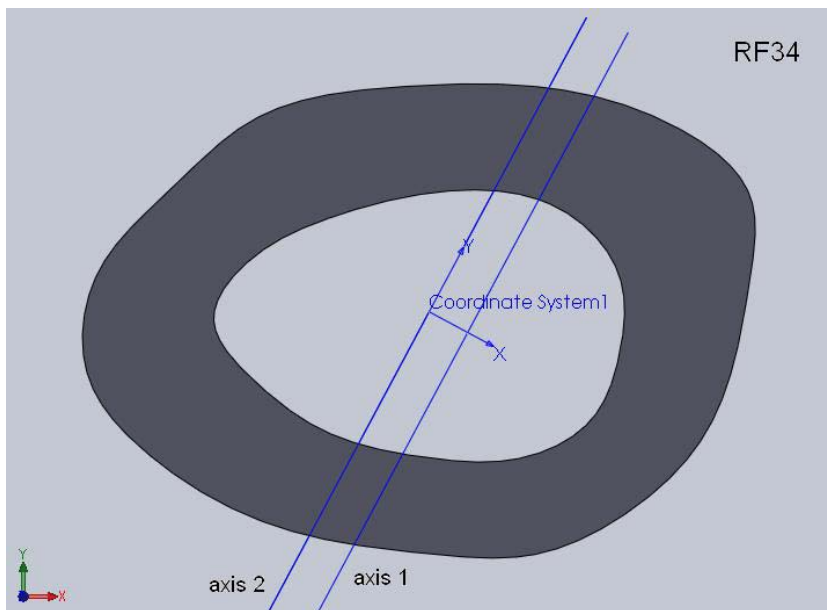
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 1,08mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 9,0mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.



Εικόνα 189: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF34. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 190: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF34 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF35

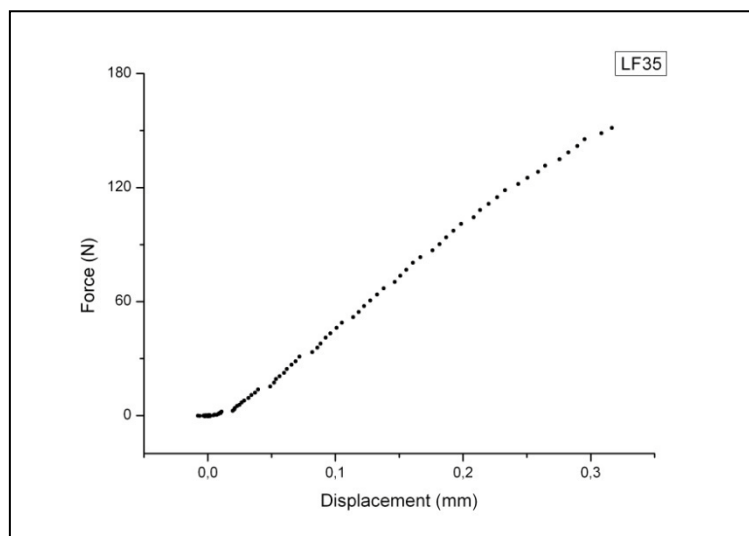
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 27/5/2010

Απεβίωσε: 18/7/2011



Εικόνα 191: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF35 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 67: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF35

Μέγιστο φορτίο: 153,44N

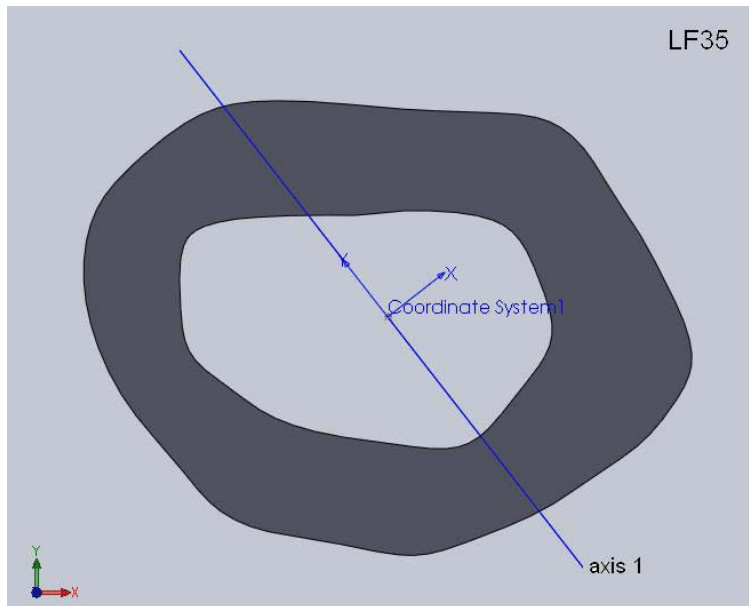
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,32mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 24,2mJ

Παρατηρήσεις: Το πειραματόζωο απεβίωσε 112 μέρες πριν την προβλεπόμενη ημερομηνία ευθανασίας. Το δοκίμιο έσπασε πλάγια με ρωγμές να εμφανίζονται γύρω από το σπάσιμο.



Εικόνα 192: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF35.



Εικόνα 193: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF35 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης του δοκιμίου.

Κωδικός δοκιμίου: RF35

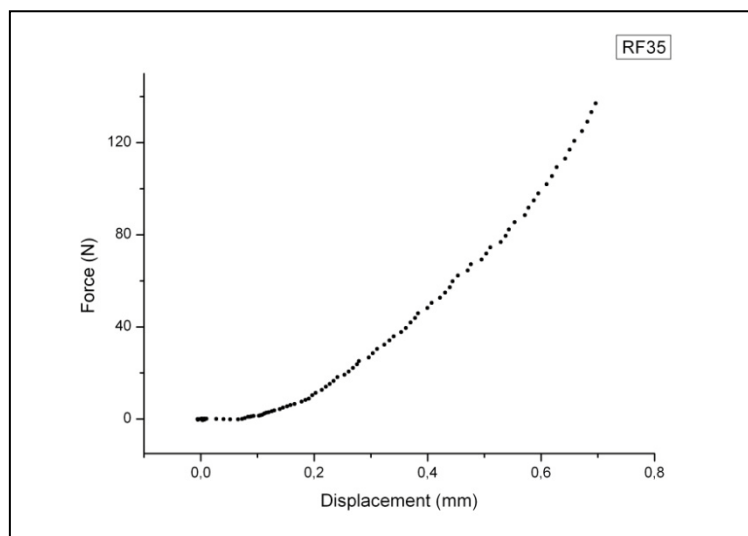
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 27/5/2010

Απεβίωσε: 18/7/2011



Γράφημα 194: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF35 πριν και μετά το πείραμα κάμγης



Γράφημα 68: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF35

Μέγιστο φορτίο: 143,01N

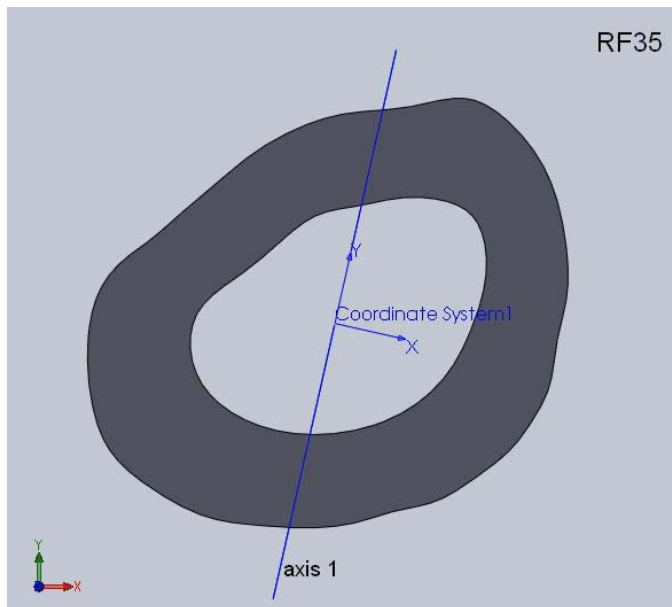
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,70mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 31,9mJ

Παρατηρήσεις: Το πειραματόζωο απεβίωσε 112 μέρες πριν την προβλεπόμενη ημερομηνία ευθανασίας. Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.



Εικόνα 195: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF35.



Εικόνα 196: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF35 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης του δοκιμίου.

Κωδικός δοκιμίου: LF36

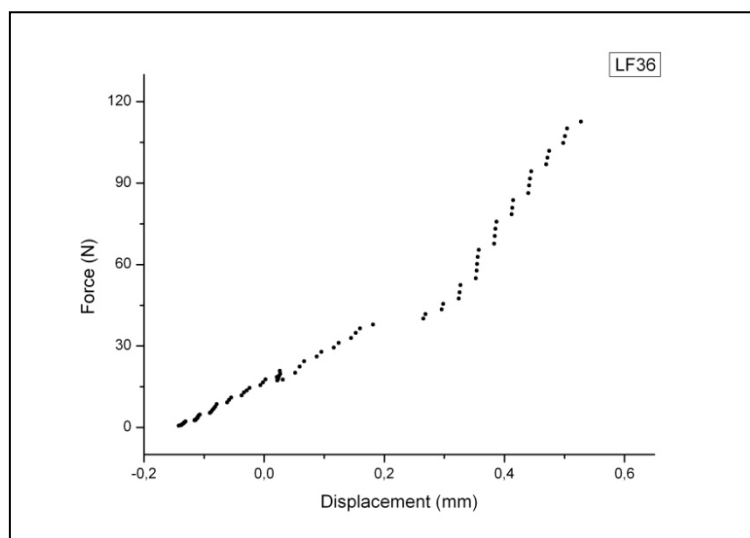
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 27/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 7/11/2011



Εικόνα 197: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF36 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 69: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF36

Μέγιστο φορτίο: 116,68N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,53mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 29,0mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε σε τρία μέρη.

Κωδικός δοκιμίου: RF36

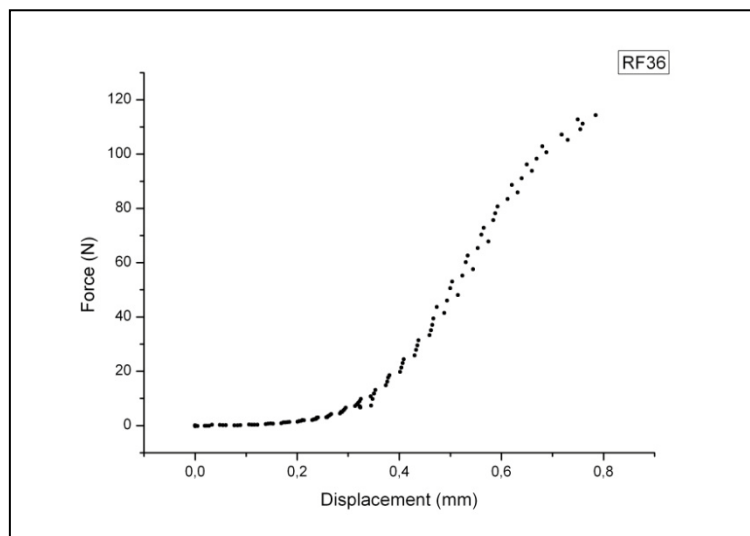
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 27/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 7/11/2011



Εικόνα 198: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF36 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 70: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF36

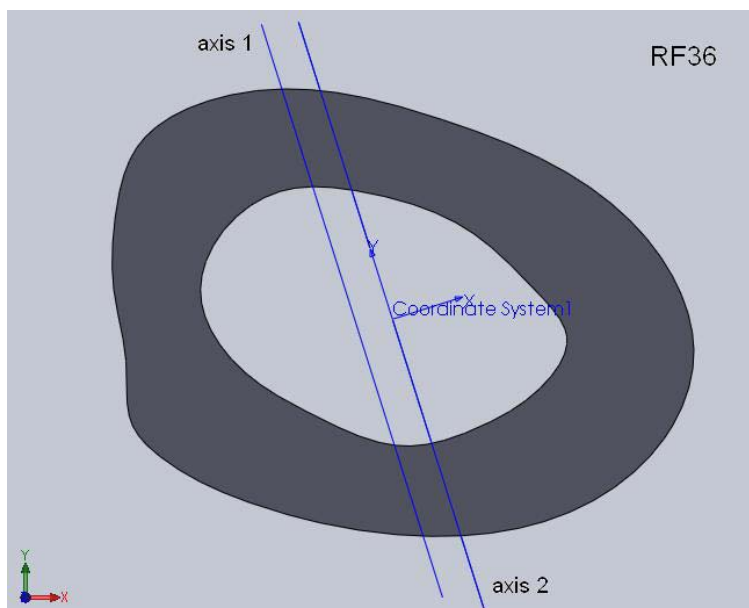
Μέγιστο φορτίο: 115,53N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,78mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 30,0mJ



Εικόνα 199: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF36. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 200: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF36 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF37
Ομάδα: Control χωρίς OVX
Ημερομηνία γέννησης: 27/5/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 9/11/2011

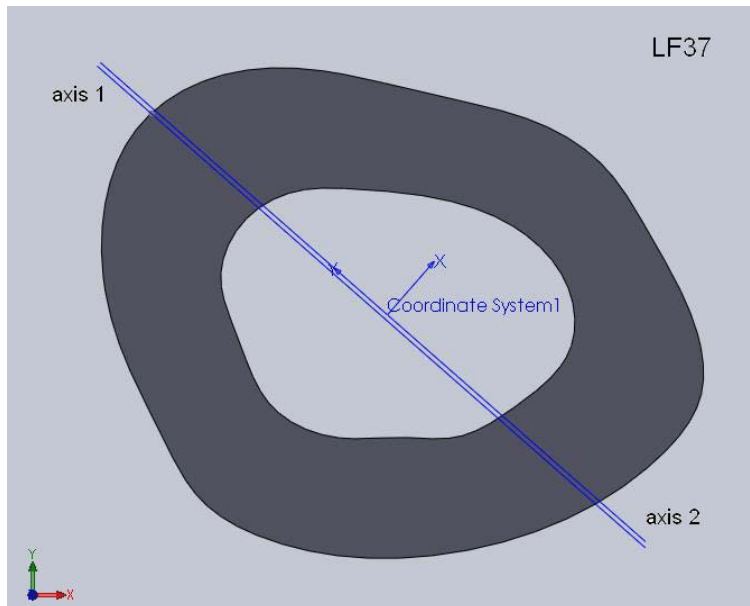


Εικόνα 201: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF37 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

Μέγιστο φορτίο: 120,20N
Παρατηρήσεις: Λόγω προβλήματος με το οπτικό μηκυσιόμετρο τα δεδομένα του δοκιμίου δεν αποθηκεύτηκαν.



Εικόνα 202: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF37



Εικόνα 203: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF37 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF37
Ομάδα: Control χωρίς OVX
Ημερομηνία γέννησης: 27/5/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 9/11/2011



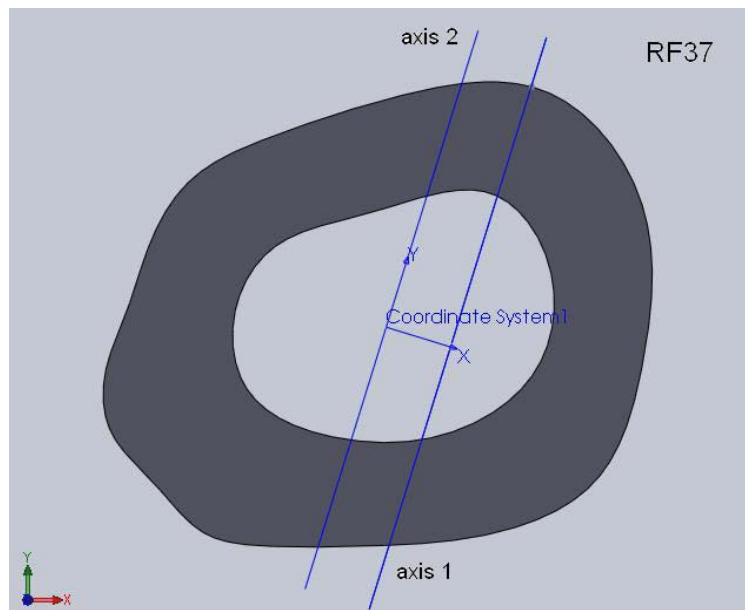
Εικόνα 204: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF37 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

Μέγιστο φορτίο: 97,15N

Παρατηρήσεις: Λόγω προβλήματος με το οπτικό μηκυσιόμετρο τα δεδομένα του δοκιμίου δεν αποθηκεύτηκαν.



Εικόνα 205: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF37. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.

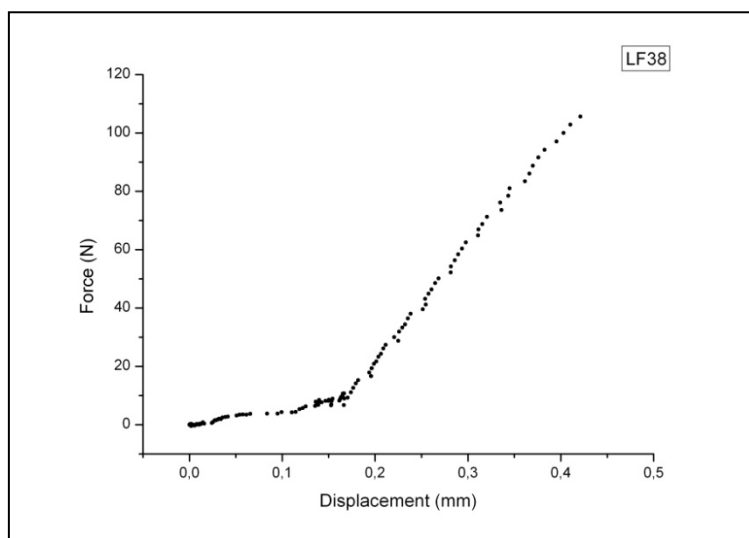


Εικόνα 206: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF37 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF38
Ομάδα: Control χωρίς OVX
Ημερομηνία γέννησης: 27/5/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 9/11/2011



Εικόνα 207: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF38 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

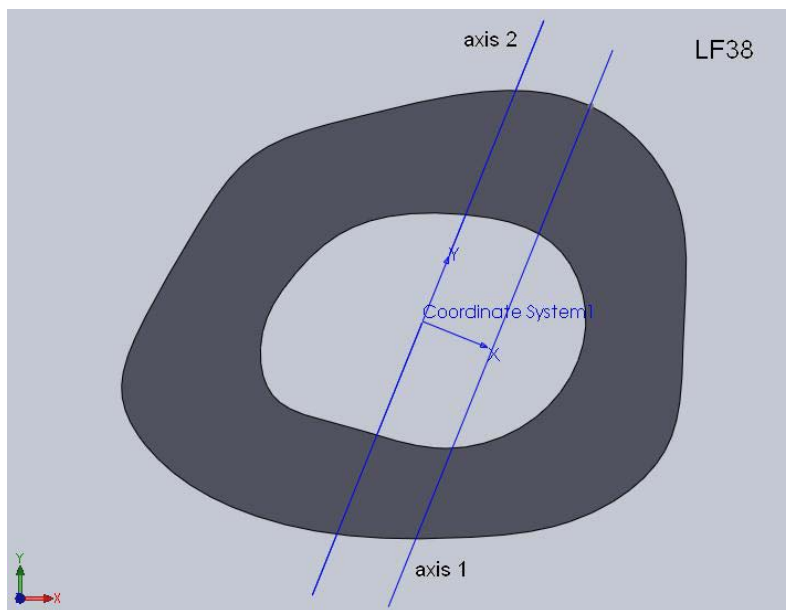


Γράφημα 71: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF38

Μέγιστο φορτίο: 109,64N
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,42mm
Δαπανηθείσα ενέργεια: 15,6mJ
Παρατηρήσεις: Το πειραματόζωο εμφάνισε όγκο στον αριστερό μαστό.



Εικόνα 208: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF38

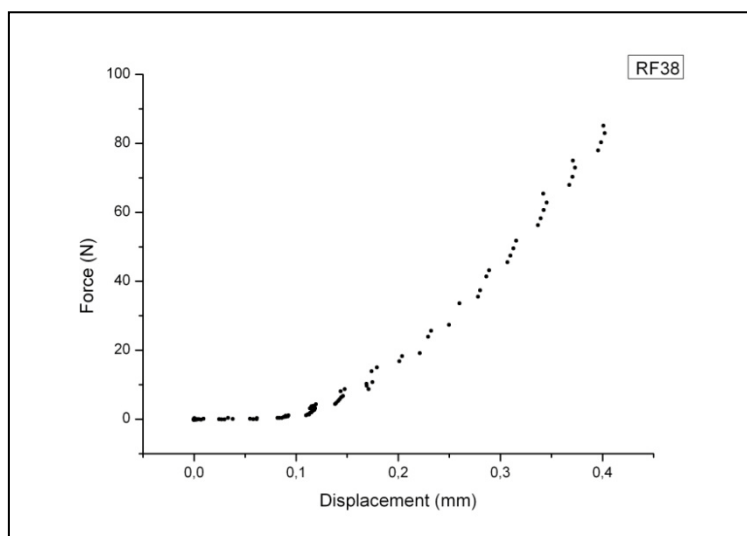


Εικόνα 209: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF38 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF38
Ομάδα: Control χωρίς OVX
Ημερομηνία γέννησης: 27/5/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 9/11/2011



Εικόνα 210: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF38 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 72: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF38

Μέγιστο φορτίο: 88,90N

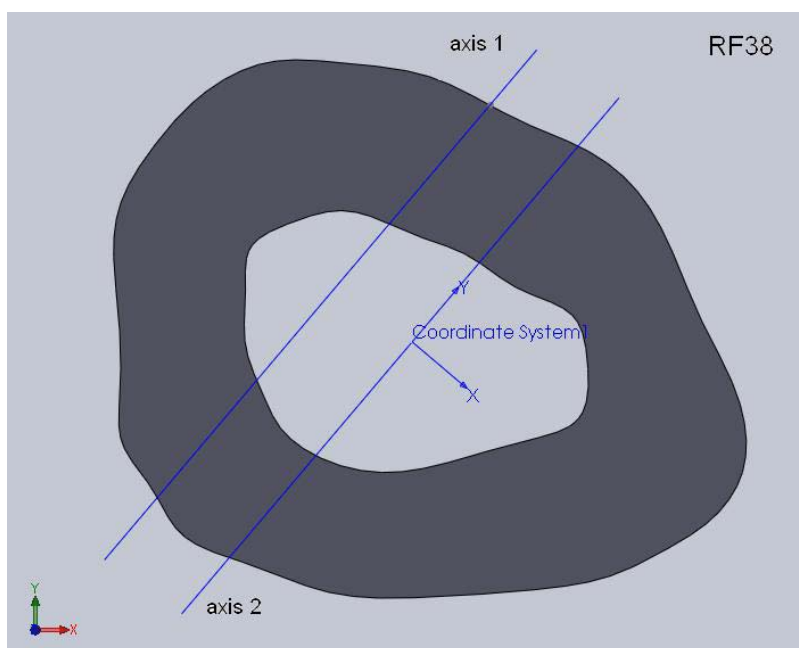
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,40mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 10,2mJ

Παρατηρήσεις: Το πειραματόζωο εμφάνισε όγκο στον αριστερό μαστό.



Εικόνα 211: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF38

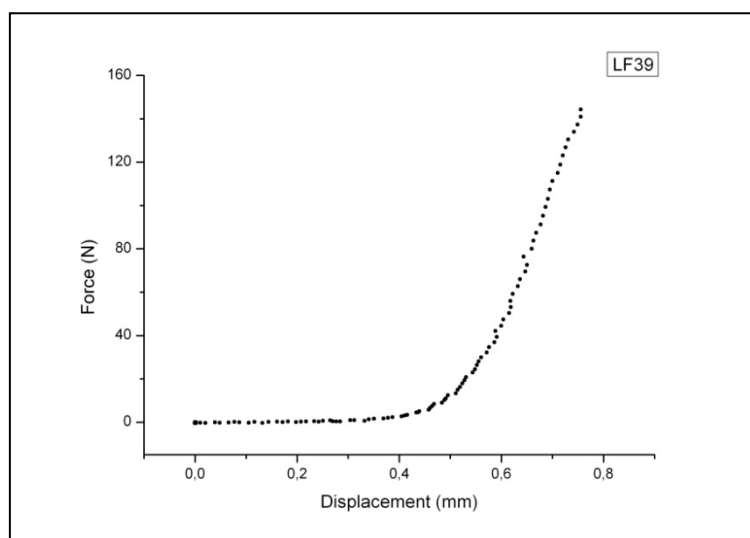


Εικόνα 212: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF38 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF39
Ομάδα: Control χωρίς OVX
Ημερομηνία γέννησης: 27/5/2010
Απεβίωσε: 18/7/2011



Εικόνα 213: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF39 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 73: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF39

Μέγιστο φορτίο: 147,56N

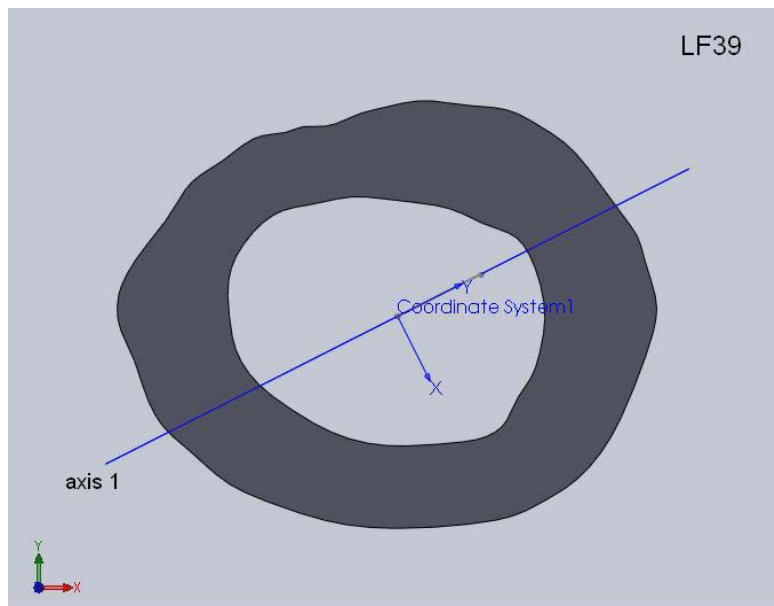
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,76mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 18,0mJ

Παρατηρήσεις: Το πειραματόζωο απεβίωσε 114 μέρες πριν την προβλεπόμενη ημερομηνία ευθανασίας.



Εικόνα 214: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF39.

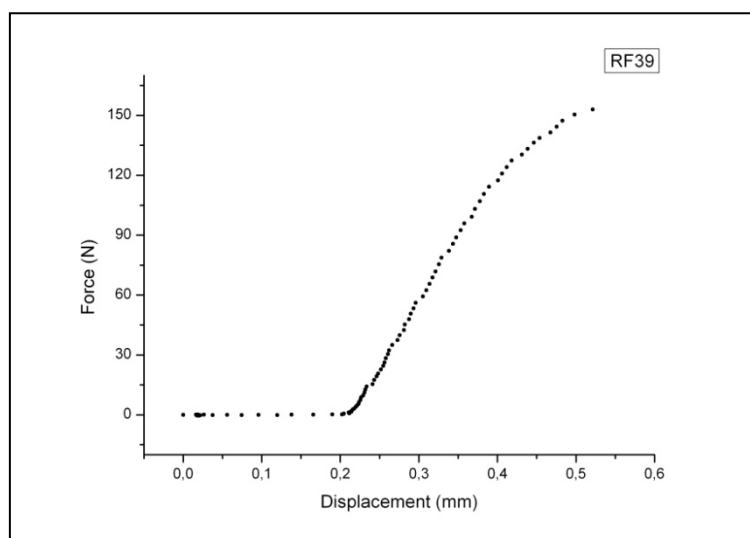


Εικόνα 215: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF39 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης του δοκιμίου.

Κωδικός δοκιμίου: RF39
Ομάδα: Control χωρίς OVX
Ημερομηνία γέννησης: 27/5/2010
Απεβίωσε: 18/7/2011

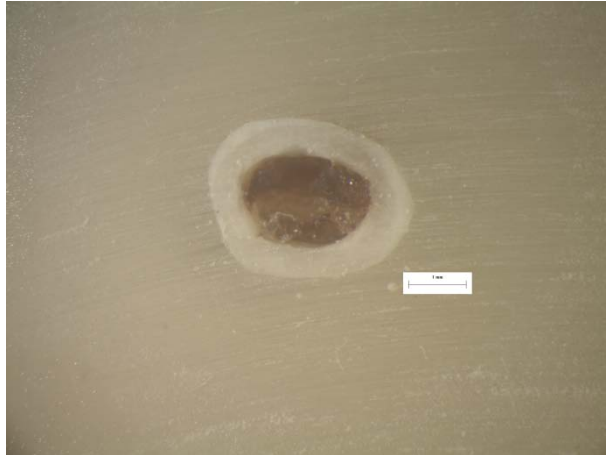


Εικόνα 216: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF39 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

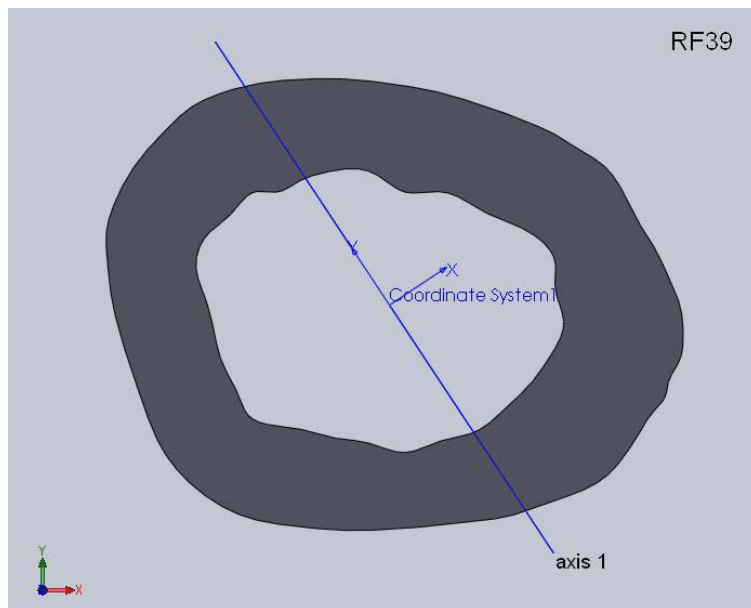


Γράφημα 74: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF39

Μέγιστο φορτίο: 154,27N
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,52mm
Δαπανηθείσα ενέργεια: 28,2mJ
Παρατηρήσεις: Το πειραματόζωο απεβίωσε 114 μέρες πριν την προβλεπόμενη ημερομηνία ευθανασίας.



Εικόνα 217: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF39.

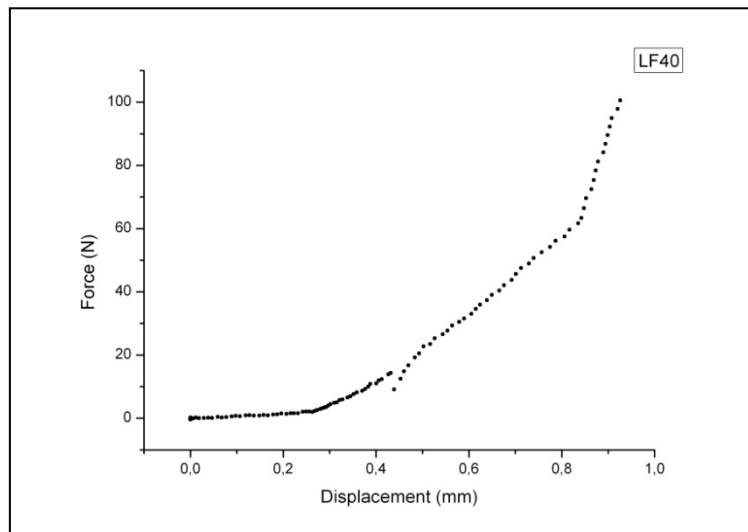


Εικόνα 218: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF39 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης του δοκιμίου.

Κωδικός δοκιμίου: LF40
Ομάδα: Control χωρίς OVX
Ημερομηνία γέννησης: 27/5/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 9/11/2011



Εικόνα 219: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF40 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

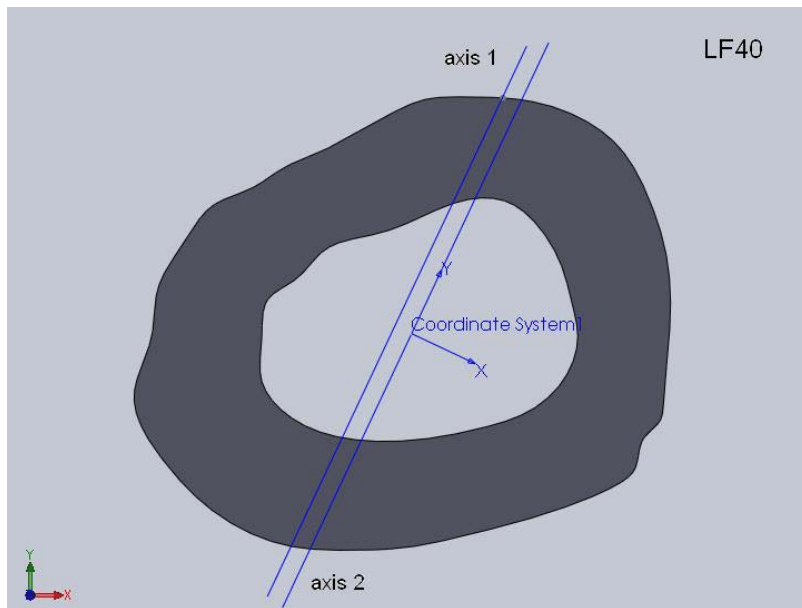


Γράφημα 75: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF40

Μέγιστο φορτίο: 104,06N
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,93mm
Δαπανηθείσα ενέργεια: 23,8mJ

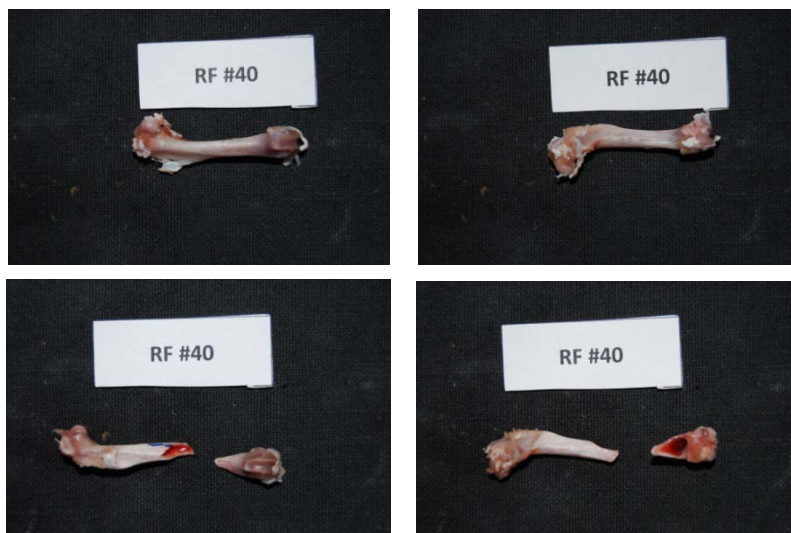


Εικόνα 220: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF40. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.

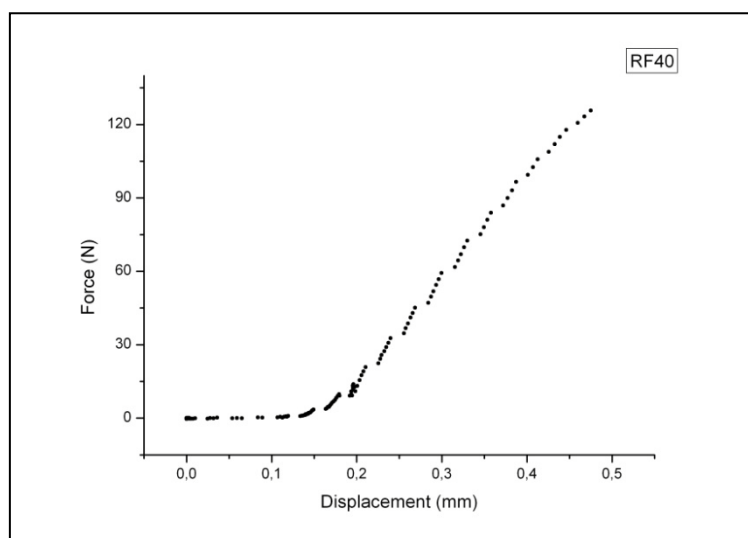


Εικόνα 221: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF40 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF40
Ομάδα: Control χωρίς OVX
Ημερομηνία γέννησης: 27/5/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 9/11/2011



Εικόνα 222: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF40 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 76: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF40

Μέγιστο φορτίο: 127,89N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,47mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 20,3mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.

Κωδικός δοκιμίου: LF41

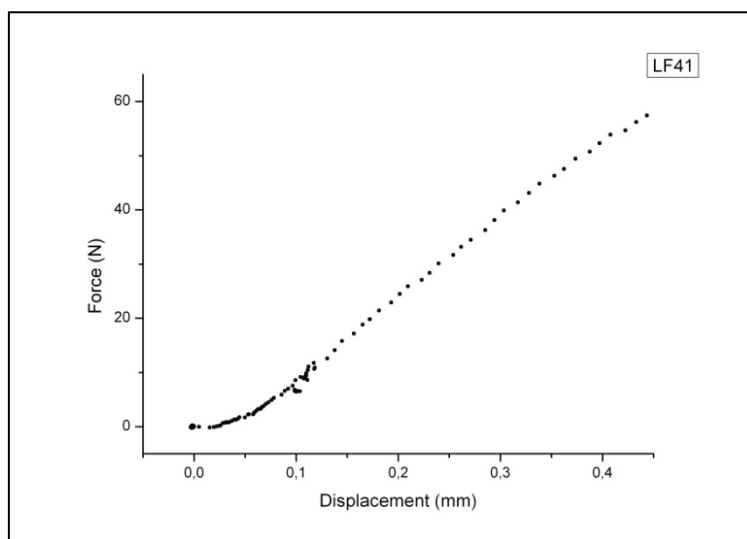
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 28/5/2010

Απεβίωσε: 15/10/2011



Εικόνα 223: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF41 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



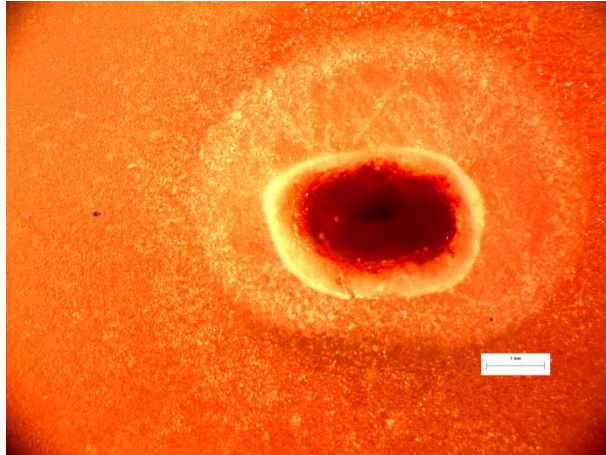
Γράφημα 77 : Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF41

Μέγιστο φορτίο: 61,13N

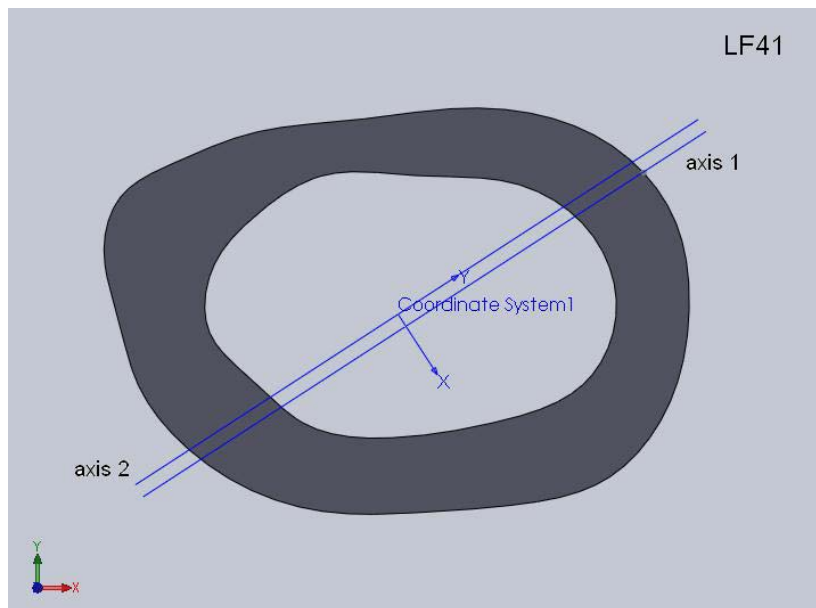
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,46mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 12,9mJ

Παρατηρήσεις: Το πειραματόζωο απεβίωσε 23 μέρες πριν την προβλεπόμενη ημερομηνία ευθανασίας.



Εικόνα 224: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF41.



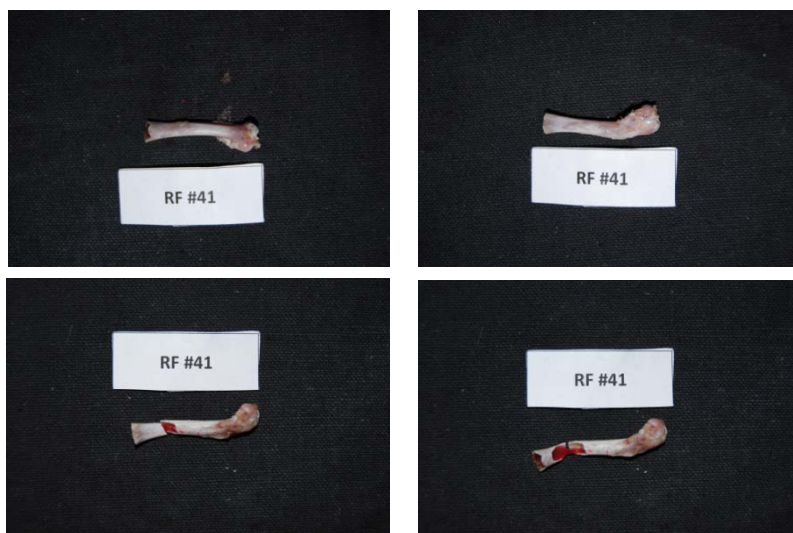
Εικόνα 225: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF41 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF41

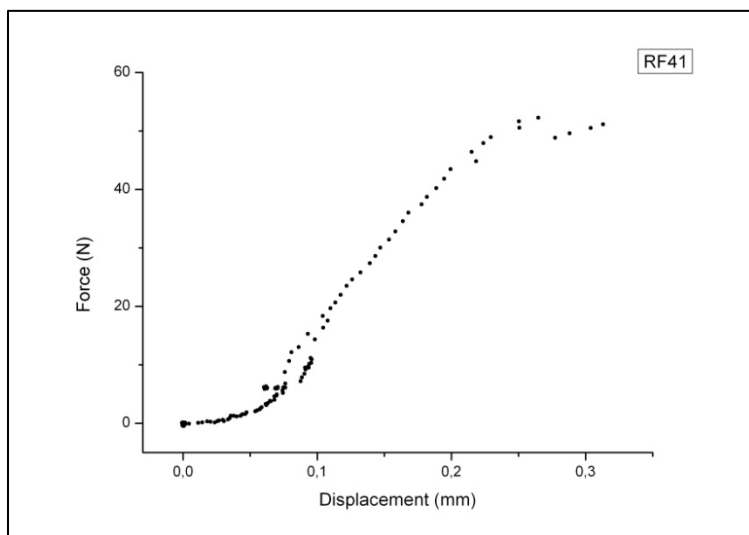
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 28/5/2010

Απεβίωσε: 15/10/2011



Εικόνα 226: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF41 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



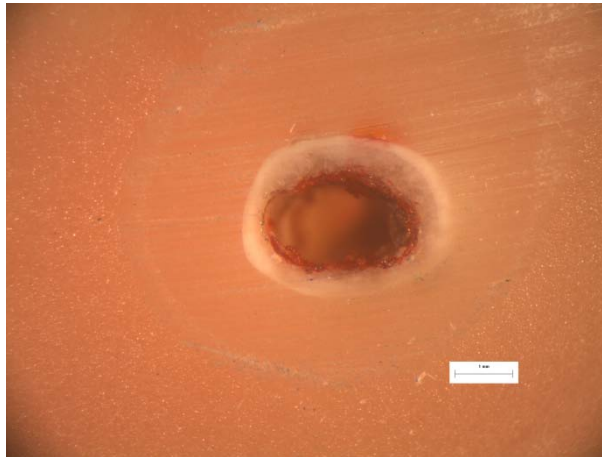
Γράφημα 78: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF41

Μέγιστο φορτίο: 52,50N

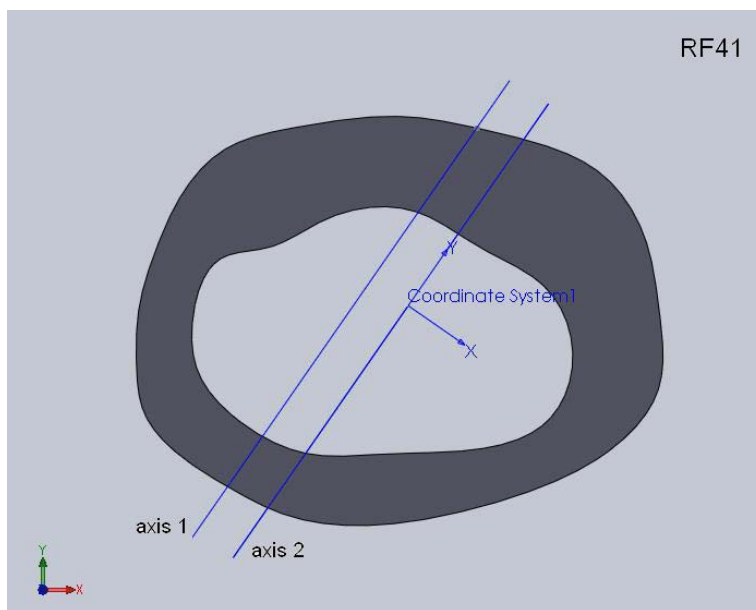
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,31mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 9,0mJ

Παρατηρήσεις: Το πειραματόζωο απεβίωσε 23 μέρες πριν την προβλεπόμενη ημερομηνία ευθανασίας. Το δοκίμιο έσπασε κοντά στο γόνατο κατά την χειρουργική διαδικασία.



Εικόνα 227: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF41. Στο επάνω μέρος της διατομής είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.

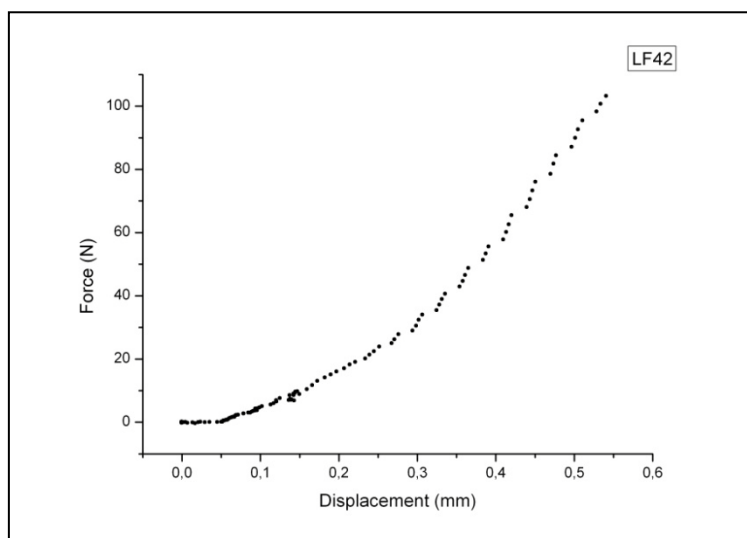


Εικόνα 228: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF41 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF42
Ομάδα: Control με OVX
Ημερομηνία γέννησης: 28/5/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 7/11/2011



Εικόνα 229: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF42 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 79: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF42

Μέγιστο φορτίο: 106,16N

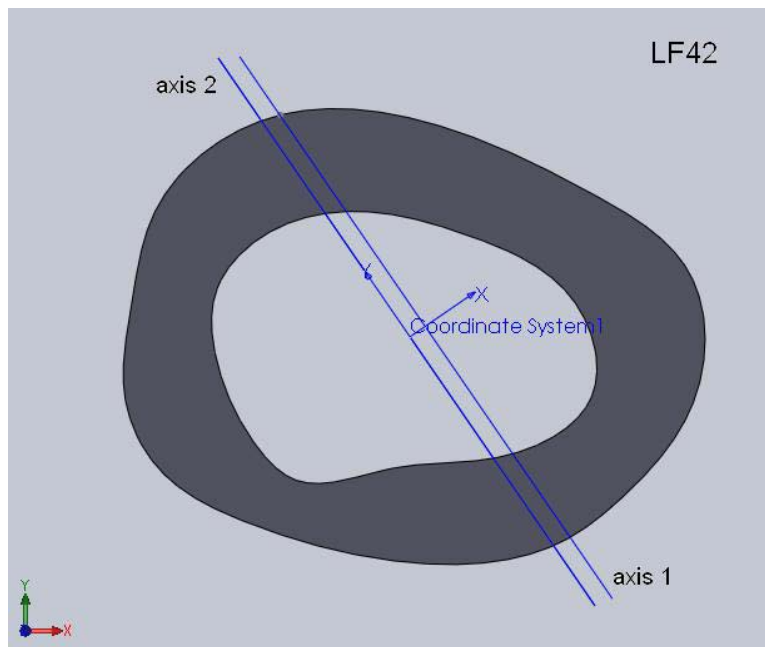
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,54mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 19,1mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.

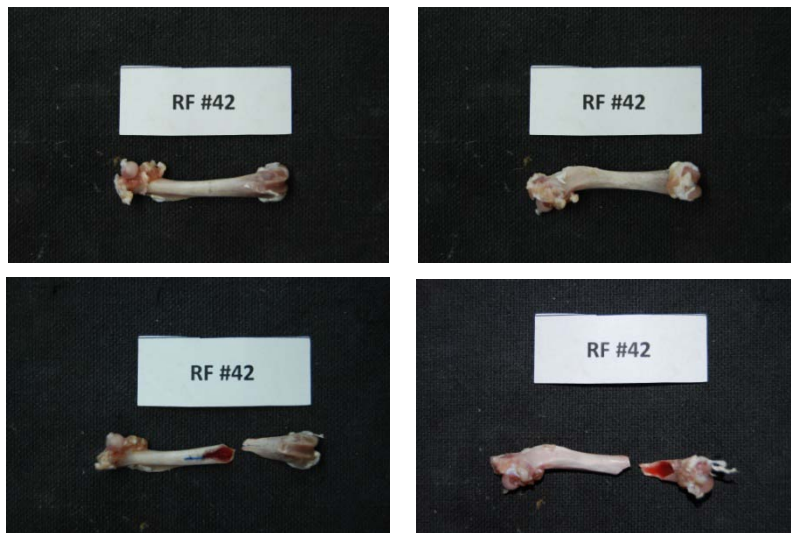


Εικόνα 230: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF42. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.

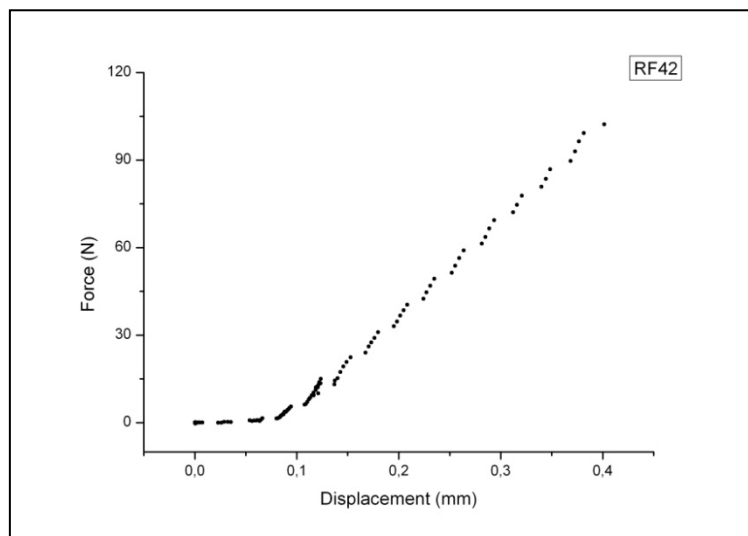


Εικόνα 231: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF42 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF42
Ομάδα: Control με OVX
Ημερομηνία γέννησης: 28/5/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 7/11/2011



Εικόνα 232: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF42 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 80: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF42

Μέγιστο φορτίο: 104,13N

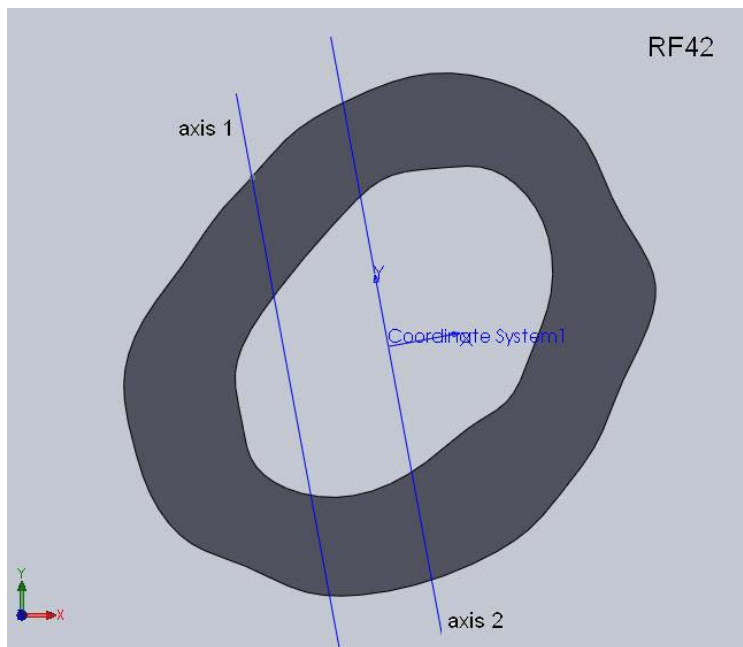
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,40mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 16,1mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.



Εικόνα 233: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF42. Στο αριστερό μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 234: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF42 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF43

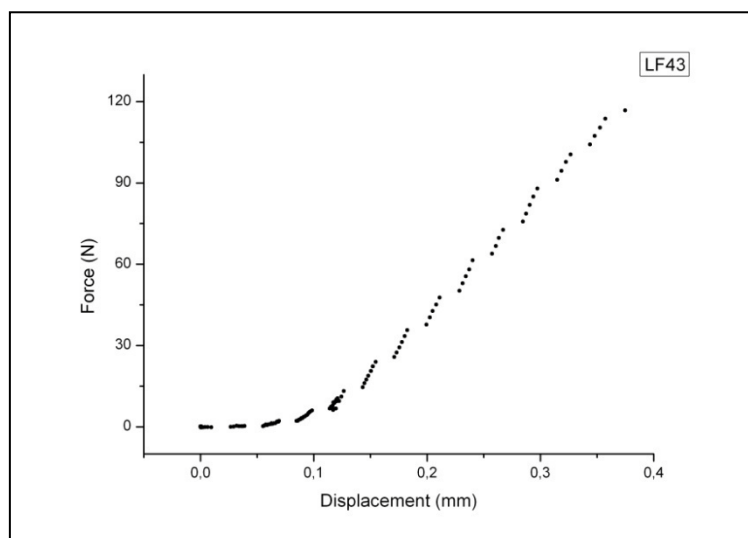
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 28/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 7/11/2011



Εικόνα 235: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF43 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 81: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF43

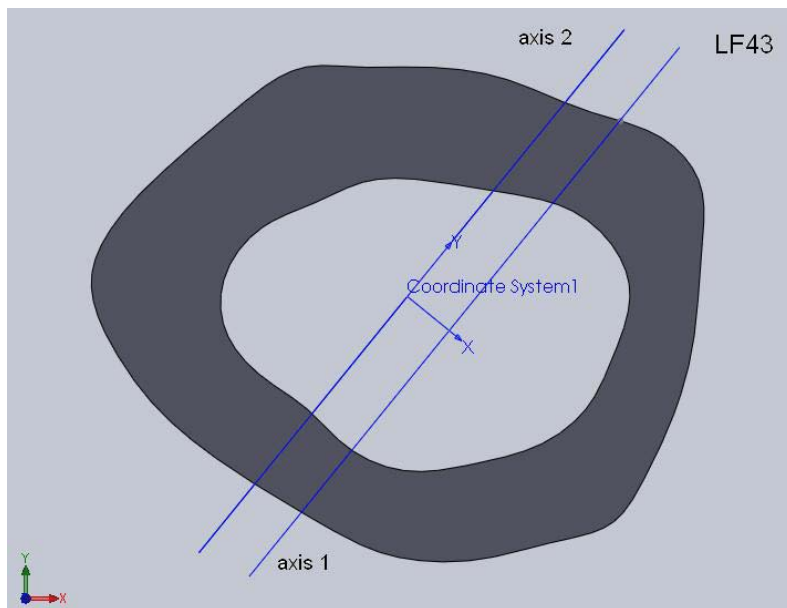
Μέγιστο φορτίο: 121,05N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,37mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 16,2mJ



Εικόνα 236: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF43.



Εικόνα 237: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF43 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF43

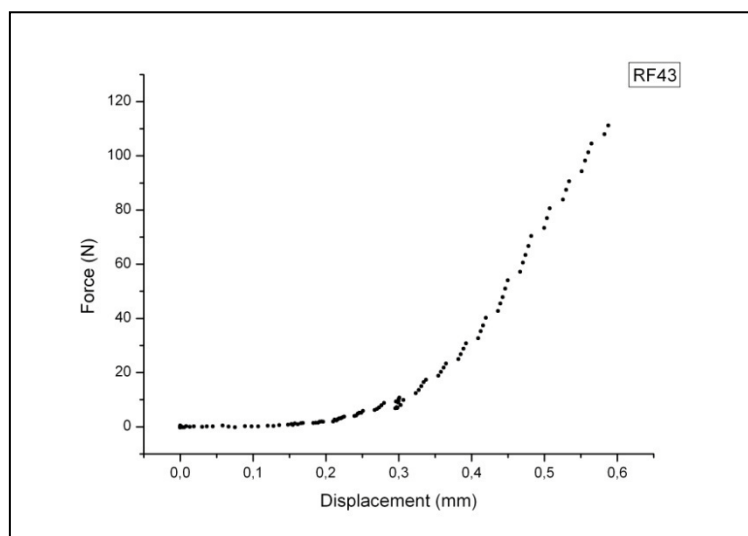
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 28/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 7/11/2011



Εικόνα 238: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF43 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

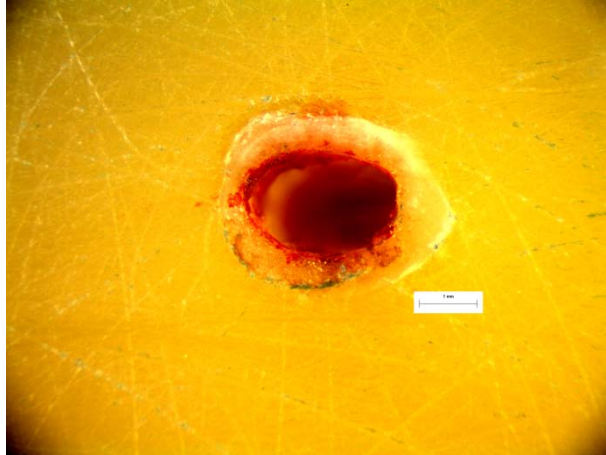


Γράφημα 82: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF43

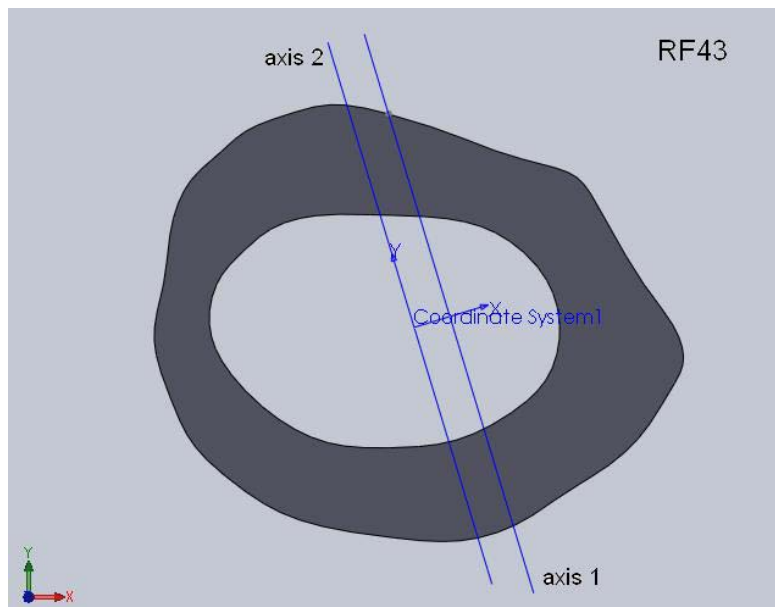
Μέγιστο φορτίο: 116,00N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,59mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 16,0mJ



Εικόνα 239: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF43. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.



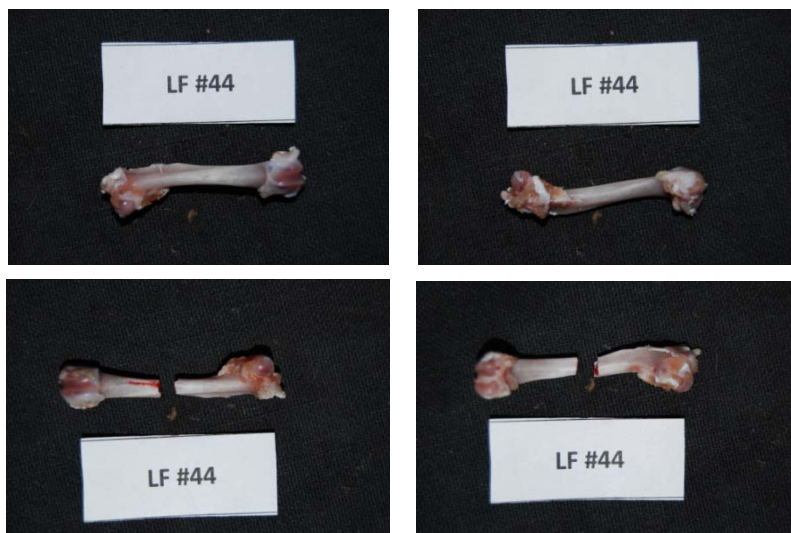
Εικόνα 240: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF43 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF44

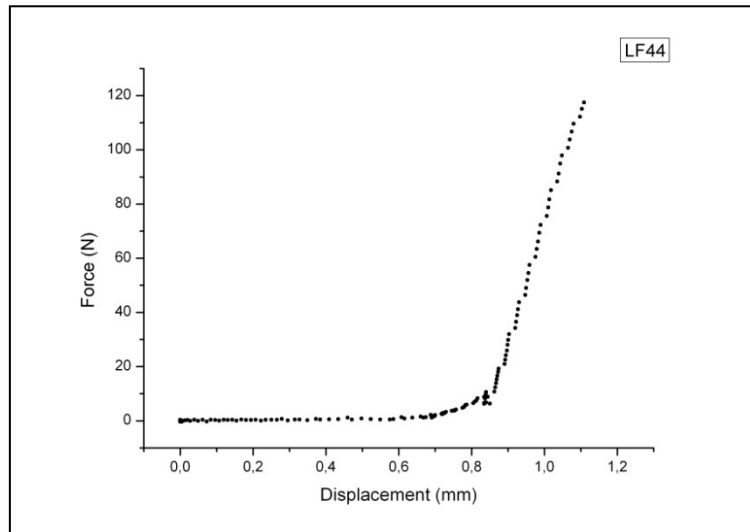
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 28/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 7/11/2011



Εικόνα 241: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF44 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 83: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF44

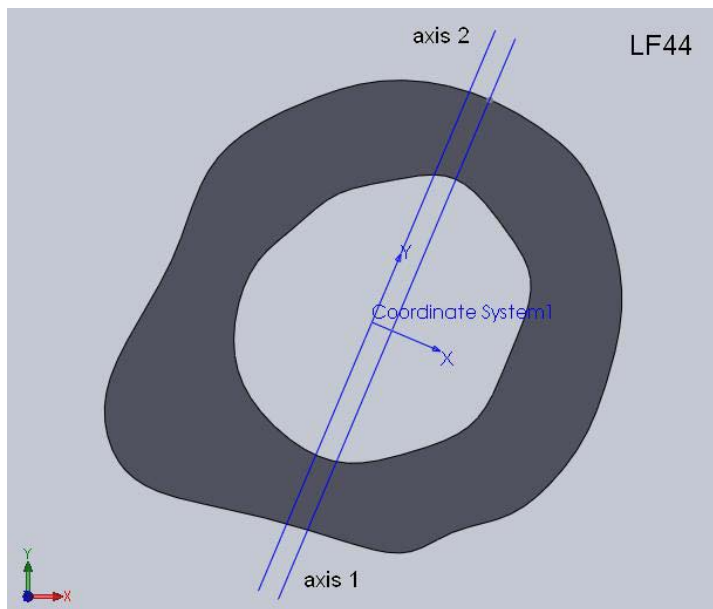
Μέγιστο φορτίο: 120,63N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 1,11mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 17,7mJ



Εικόνα 242: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF44. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτιση στα 10N.



Εικόνα 243: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF44 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF44

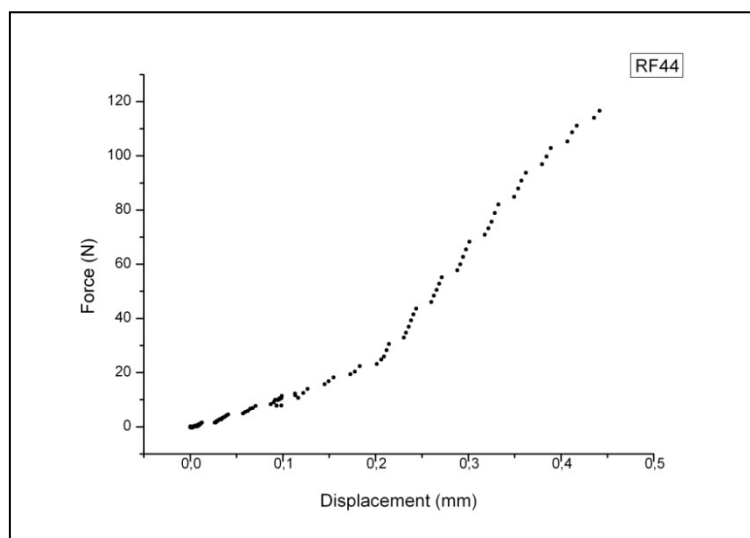
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 28/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 7/11/2011



Εικόνα 244: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF44 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 84: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF44

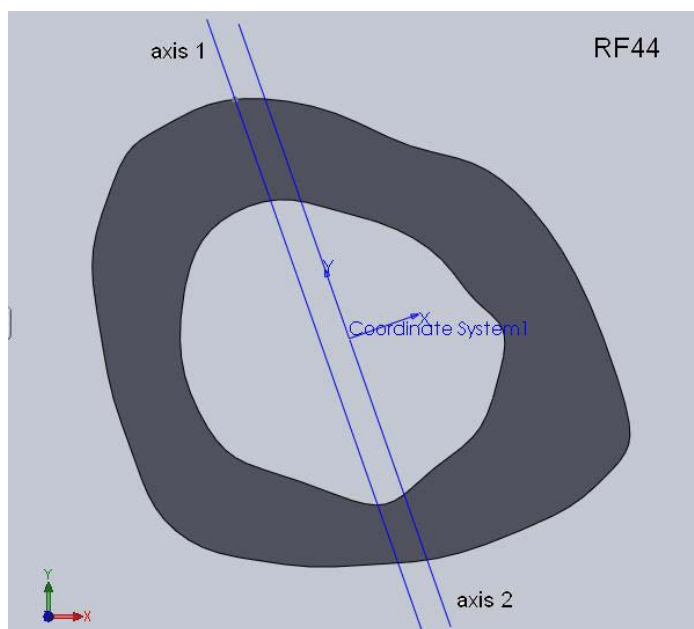
Μέγιστο φορτίο: 120,16N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,44mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 19,7mJ



Εικόνα 245: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF44. Στο επάνω αριστερά μέρος της διατομής εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.



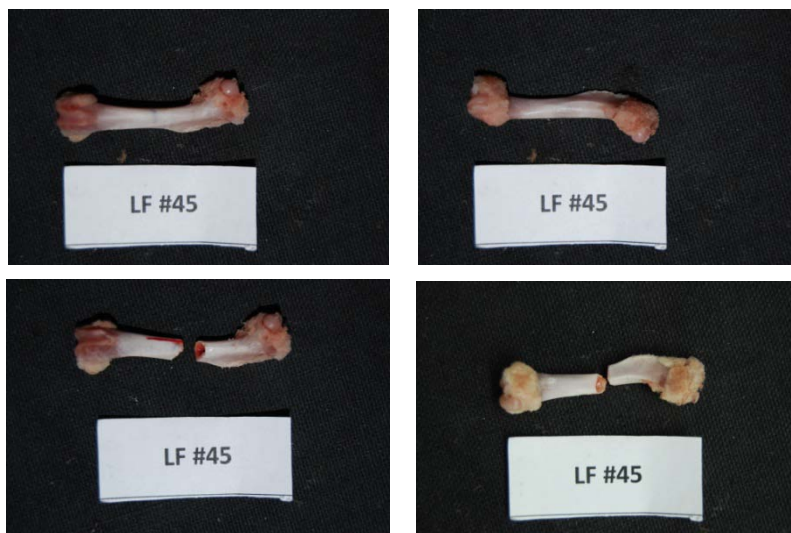
Εικόνα 246: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF44 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF45

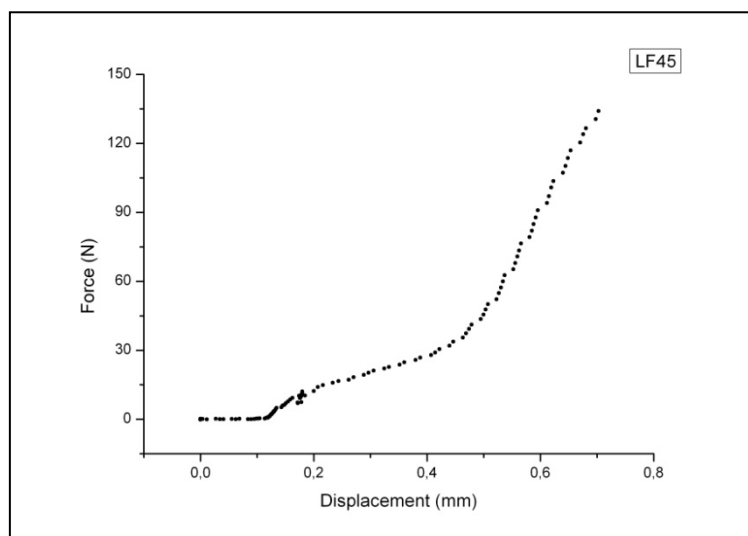
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 28/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 7/11/2011



Εικόνα 247: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF45 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 85: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF45

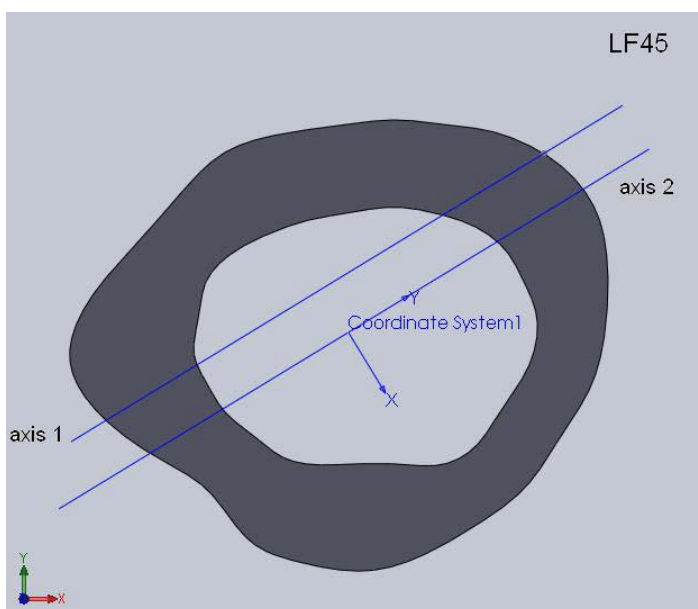
Μέγιστο φορτίο: 140,16N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,70mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 26,6mJ



Εικόνα 248: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF45. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 249: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF45 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF45

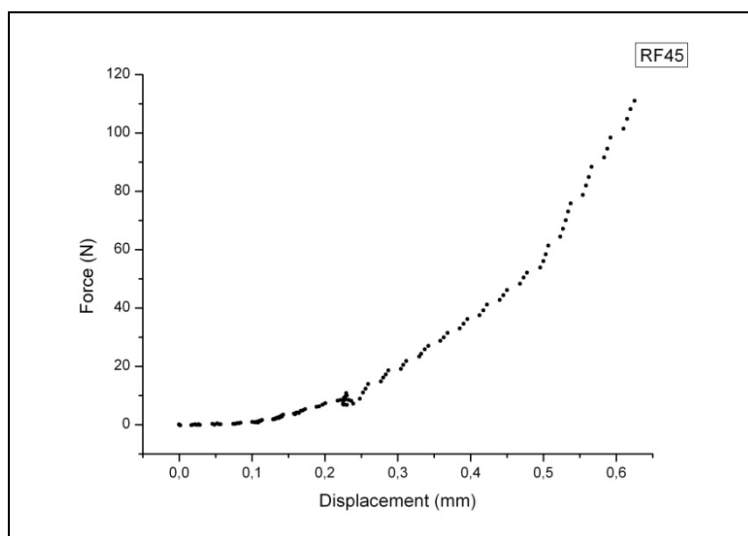
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 28/5/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 7/11/2011



Εικόνα 250: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF45 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 86: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF45

Μέγιστο φορτίο: 114,80N

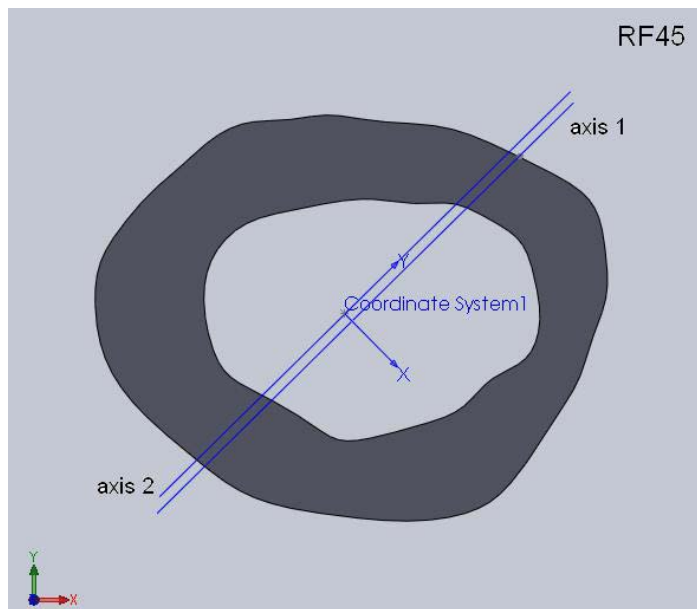
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,63mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 19,4mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.



Εικόνα 251: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF45. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 252: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF45 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF46

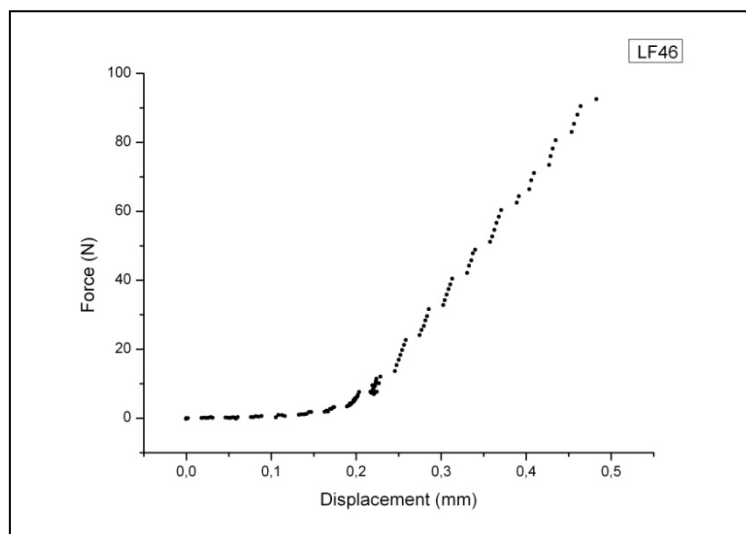
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 2/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 9/1/2012



Εικόνα 253: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF46 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 87: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF46

Μέγιστο φορτίο: 95,13N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,48mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 13,7mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF46

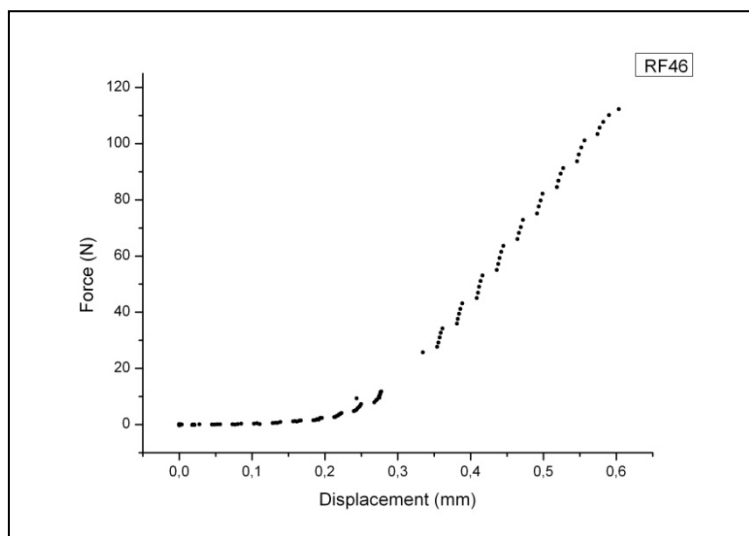
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 2/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 9/1/2012



Εικόνα 254: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF46 μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 88: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF46

Μέγιστο φορτίο: 115,33N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,60mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 20,4mJ

Κωδικός δοκιμίου: LF47

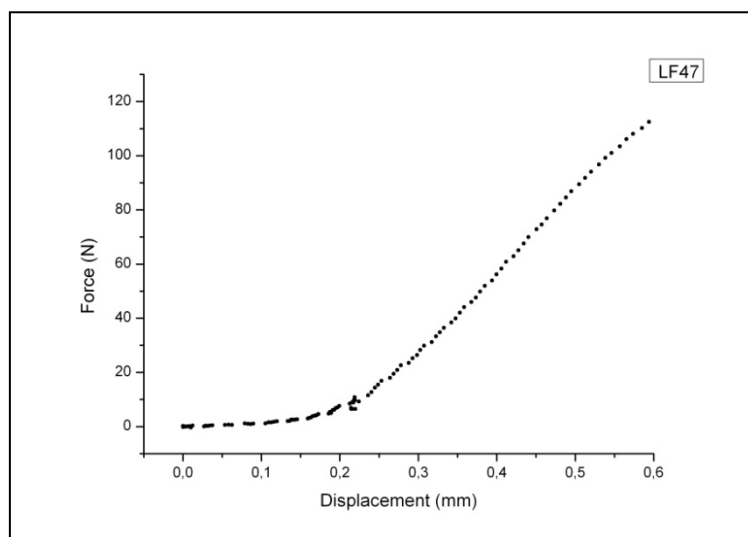
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 2/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 9/1/2012



Εικόνα 255: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF47 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 89: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF47

Μέγιστο φορτίο: 114,77N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,60mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 24,2mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.

Κωδικός δοκιμίου: RF47

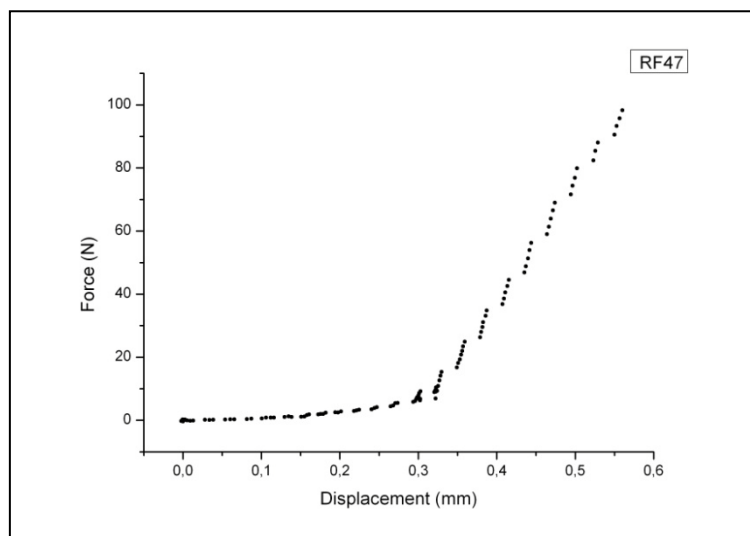
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 2/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 9/1/2012



Εικόνα 256: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF47 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 90: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF47

Μέγιστο φορτίο: 100,04N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,56mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 13,4mJ

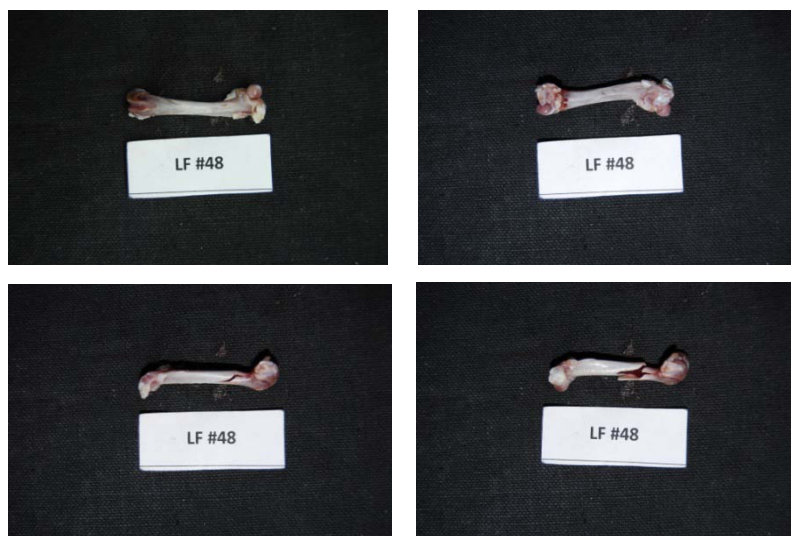
Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.

Κωδικός δοκιμίου: LF48

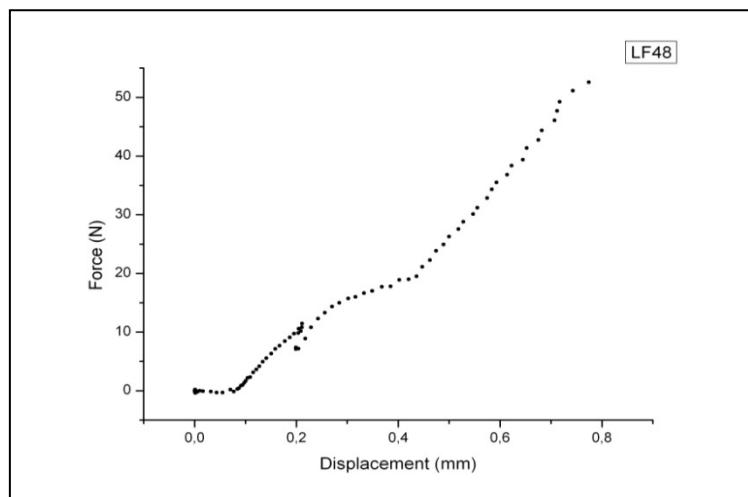
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης: 2/7/2010

Απεβίωσε: 17/10/2011



Εικόνα 257: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF48 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



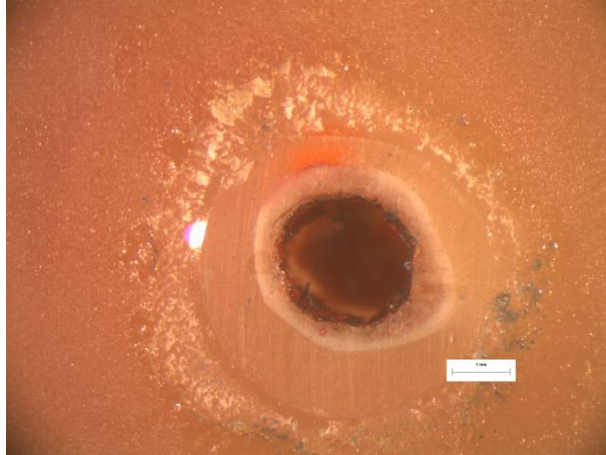
Γράφημα 91: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF48

Μέγιστο φορτίο: 53,38N

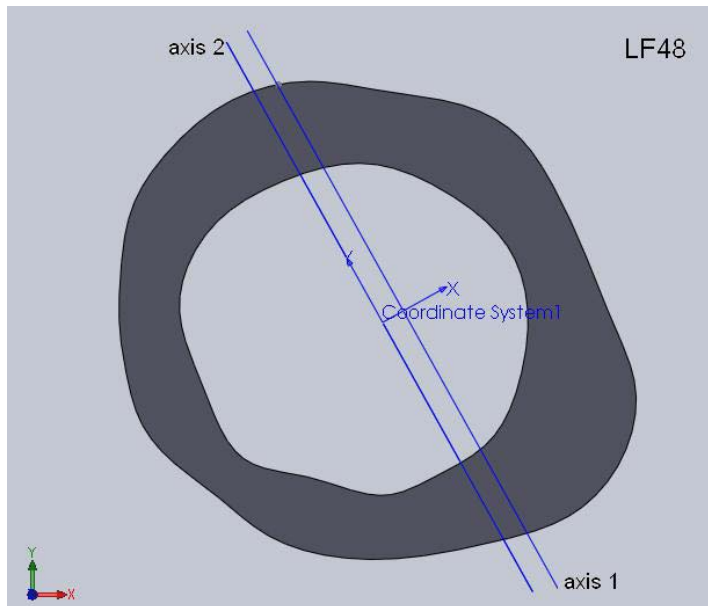
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,77mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 16,6mJ

Παρατηρήσεις: Το πειραματόζωο απεβίωσε 84 μέρες πριν την προβλεπόμενη ημερομηνία ευθανασίας. Το δοκίμιο έκανε ρωγμή και συνέχισε να παραλαμβάνει φορτίο. Έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.



Εικόνα 258: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF48. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



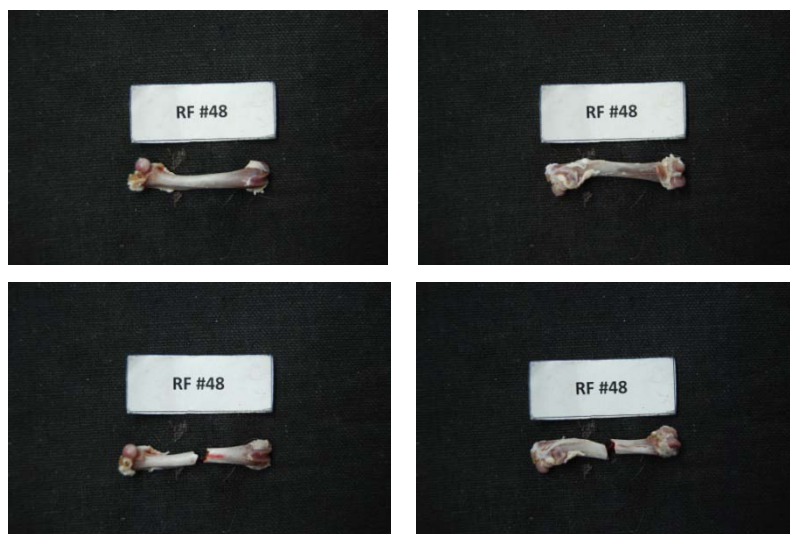
Εικόνα 259: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF48 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF48

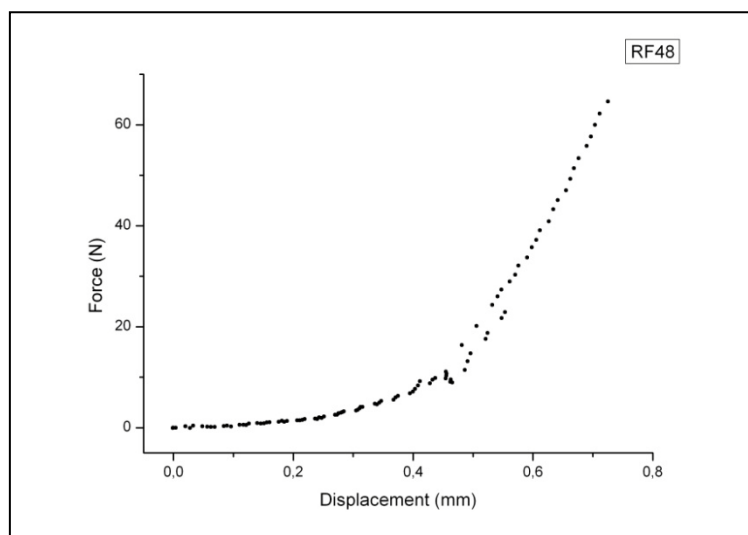
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης: 2/7/2010

Απεβίωσε: 17/10/2011



Εικόνα 260: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF48 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 92: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF48

Μέγιστο φορτίο: 67,53N

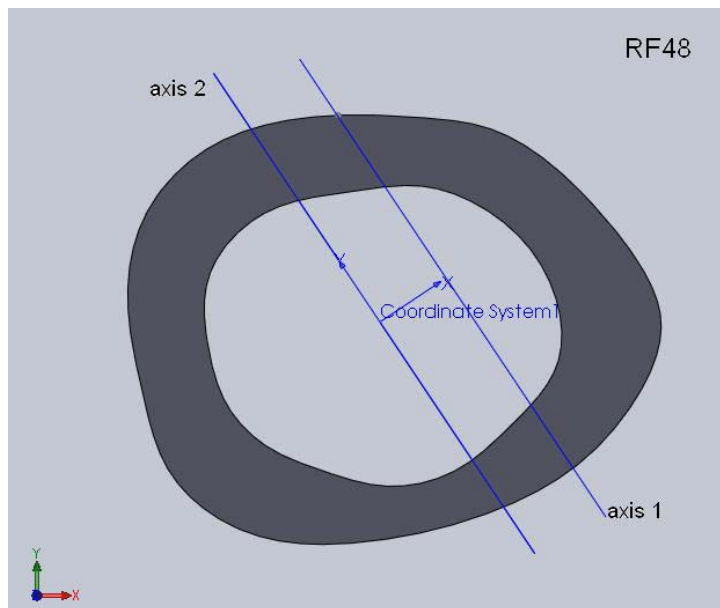
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,73mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 10,7mJ

Παρατηρήσεις: Το πειραματόζωο απεβίωσε 84 μέρες πριν την προβλεπόμενη ημερομηνία ευθανασίας.



Εικόνα 261: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF48.



Εικόνα 262: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF48 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF49

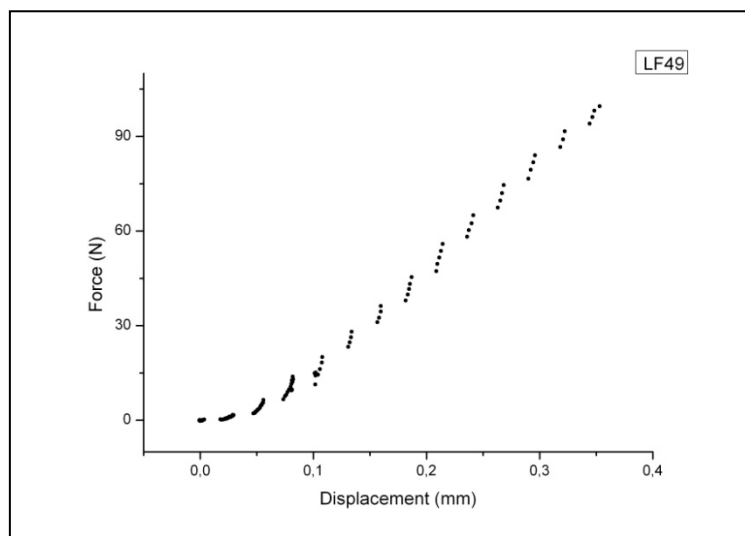
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 2/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 9/1/2012



Εικόνα 263: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF49 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 93: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF49

Μέγιστο φορτίο: 100,97N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,35mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 14,9mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF49

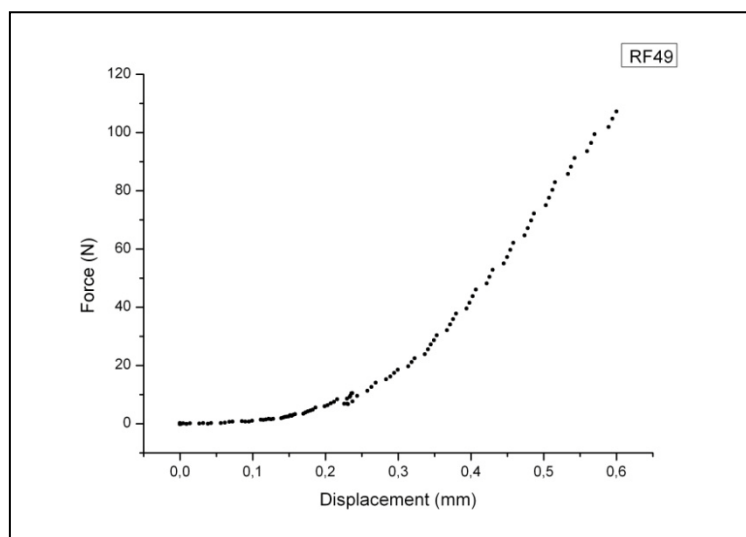
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 2/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 9/1/2012



Εικόνα 264: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF49 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 94: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF49

Μέγιστο φορτίο: 110,64N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,60mm

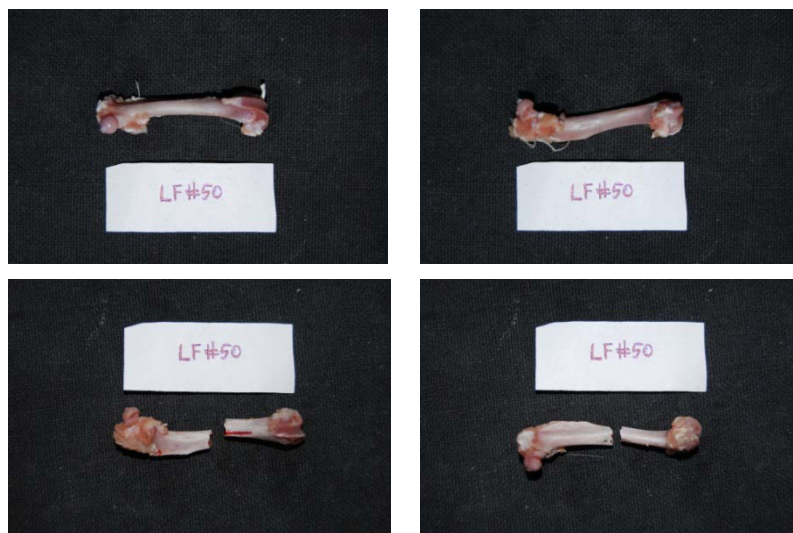
Δαπανηθείσα ενέργεια: 19,4mJ

Κωδικός δοκιμίου: LF50

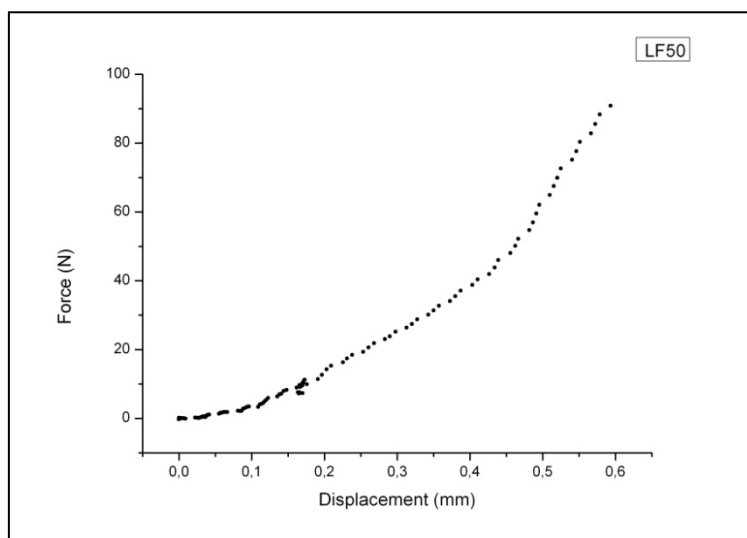
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 2/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 9/1/2012



Εικόνα 265: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF50 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 95: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF50

Μέγιστο φορτίο: 93,01N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,59mm

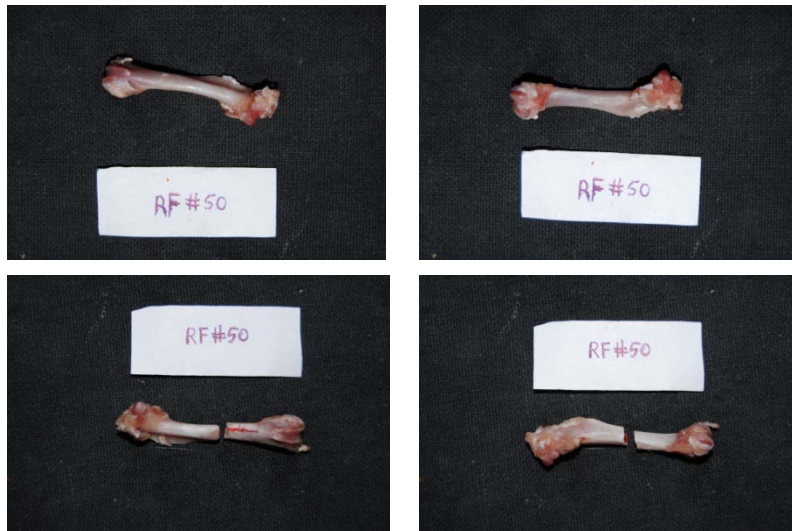
Δαπανηθείσα ενέργεια: 18,1mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF50

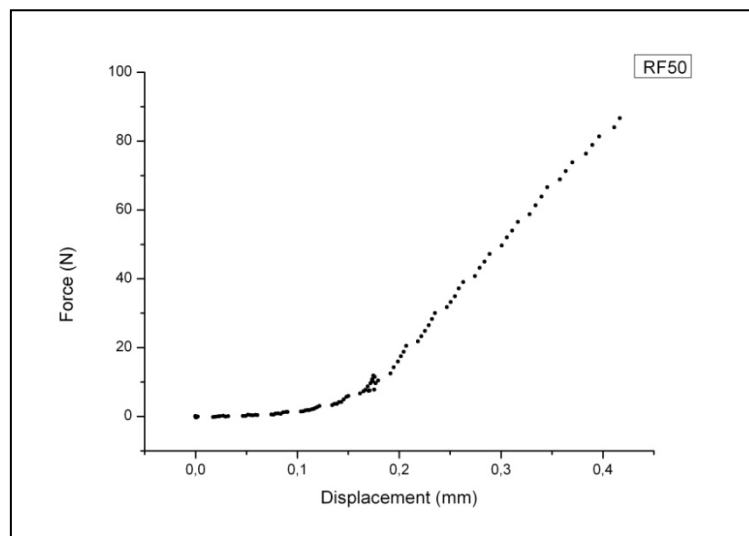
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 2/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 9/1/2012



Εικόνα 266: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF50 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 96: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF50

Μέγιστο φορτίο: 90,14N

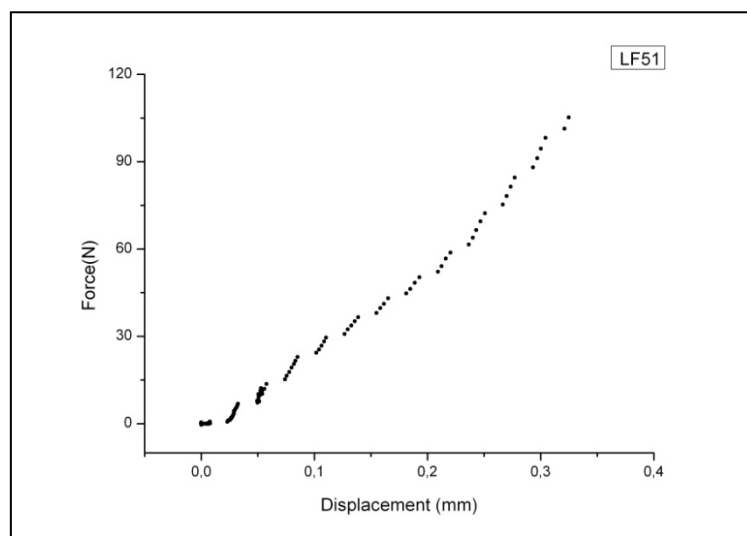
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,42mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 12,1mJ

Κωδικός δοκιμίου: LF51
Ομάδα: Control χωρίς OVX
Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 11/1/2012



Εικόνα 267: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF51 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

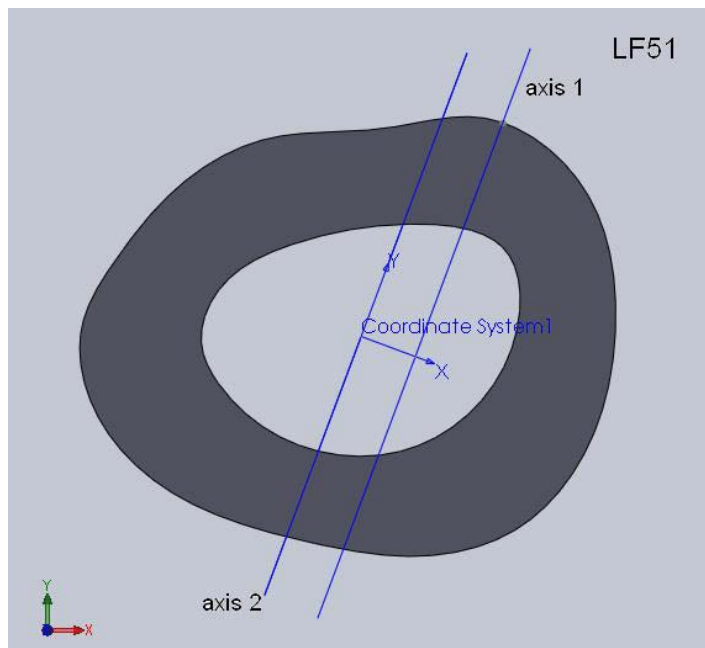


Γράφημα 97: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF51

Μέγιστο φορτίο: 108,51N
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,32mm
Δαπανηθείσα ενέργεια: 14,4mJ



Εικόνα 268: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF51. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.

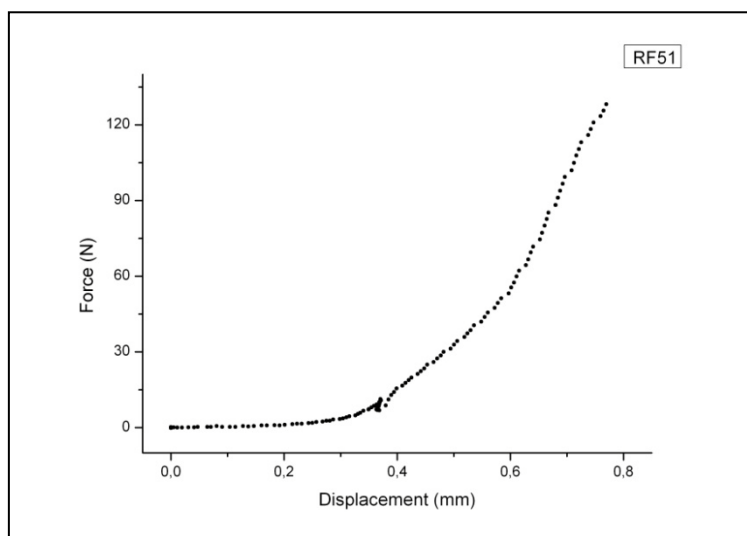


Εικόνα 269: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF51 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF51
Ομάδα: Control χωρίς OVX
Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 11/1/2012



Εικόνα 270: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF51 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

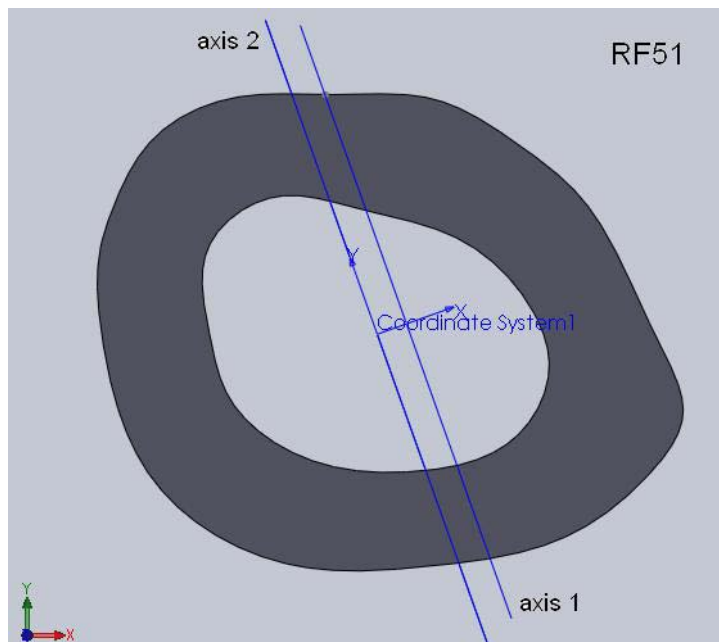


Γράφημα 98 : Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF51

Μέγιστο φορτίο: 130,58N
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,77mm
Δαπανηθείσα ενέργεια: 23,3mJ

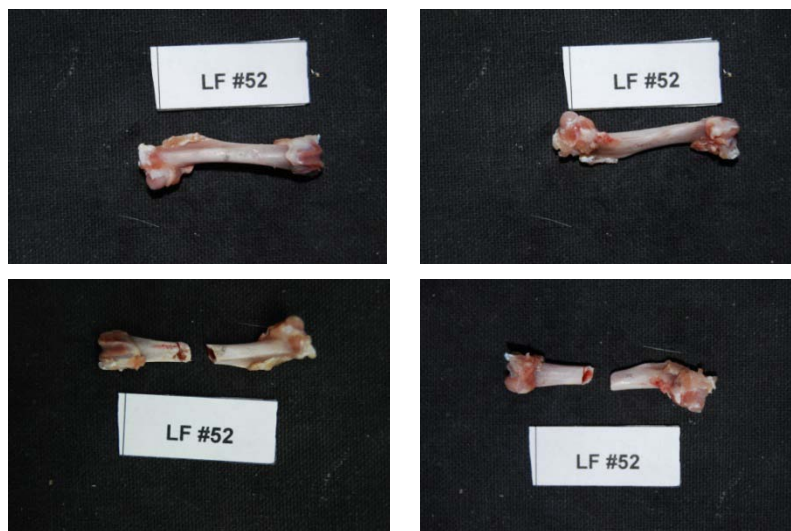


Εικόνα 271: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF51.

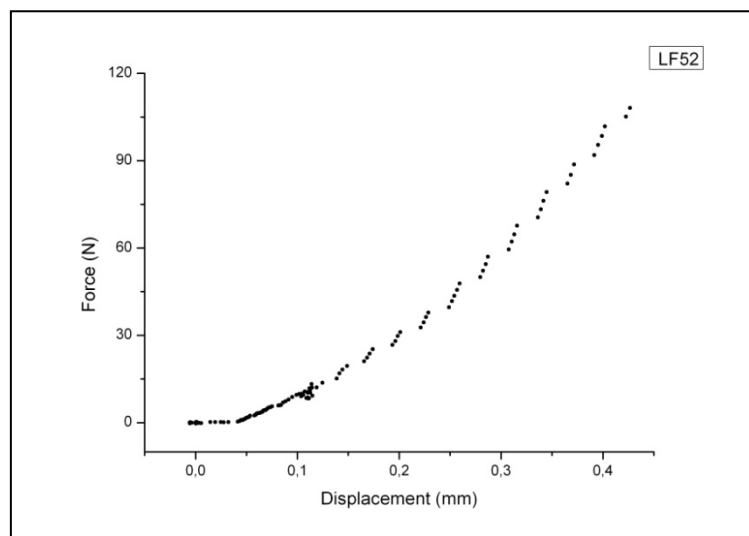


Εικόνα 272: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF51 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF52
Ομάδα: Control χωρίς OVX
Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 11/1/2012



Εικόνα 273: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF52 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

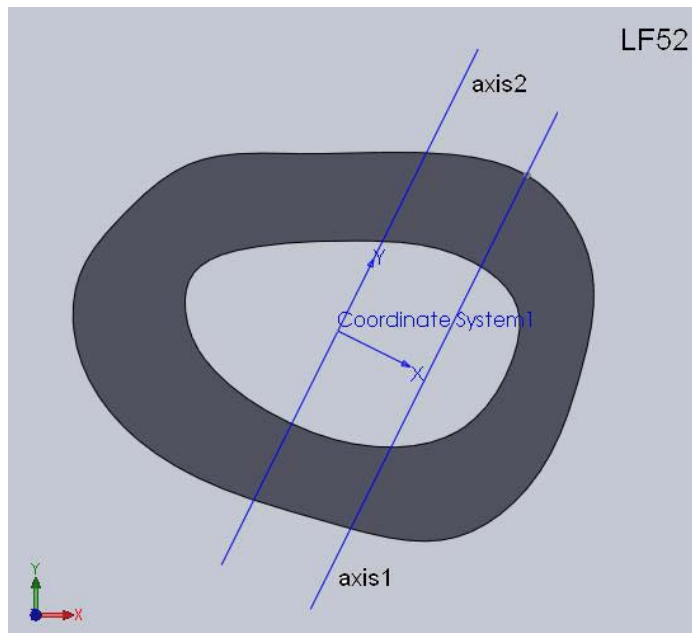


Γράφημα 99: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF52

Μέγιστο φορτίο: 112,77N
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,43mm
Δαπανηθείσα ενέργεια: 17,0mJ



Εικόνα 274: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF52.

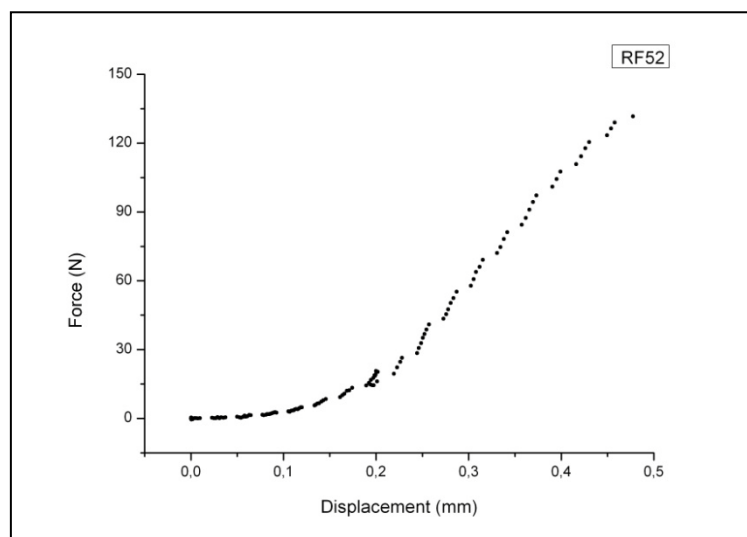


Εικόνα 275: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF52 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF52
Ομάδα: Control χωρίς OVX
Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 11/1/2012



Εικόνα 276: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF52 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

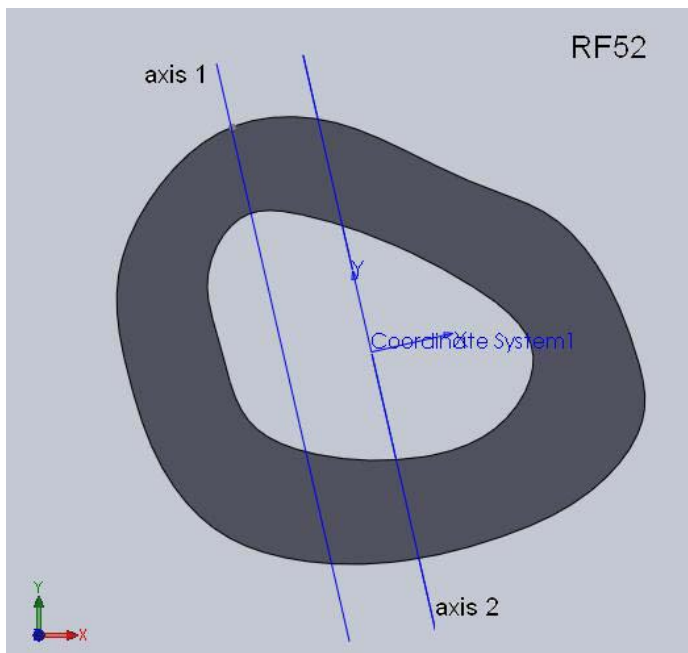


Γράφημα 100: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF52

Μέγιστο φορτίο: 133,97N
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,48mm
Δαπανηθείσα ενέργεια: 22,2mJ

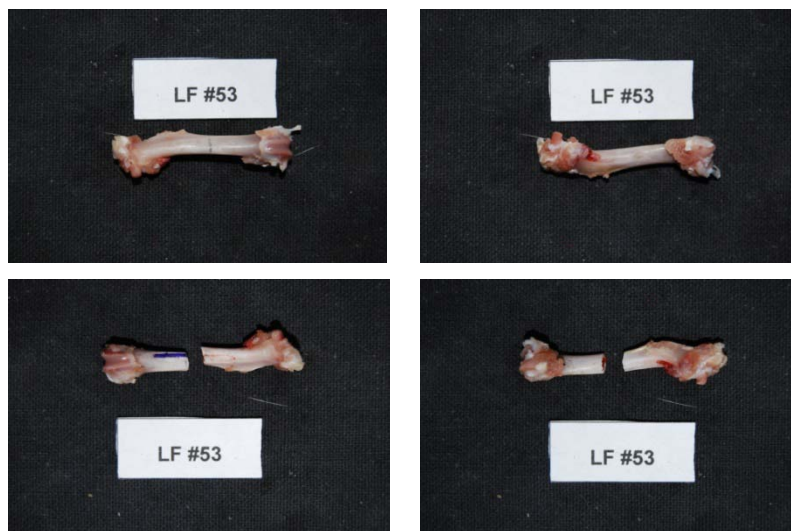


Εικόνα 277: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF52. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.

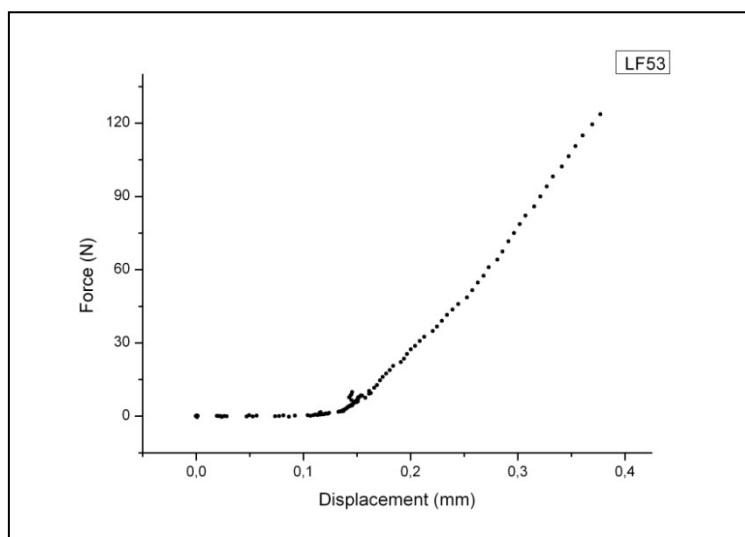


Εικόνα 278: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF52 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF53
Ομάδα: Control χωρίς OVX
Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 11/1/2012



Εικόνα 279: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF53 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

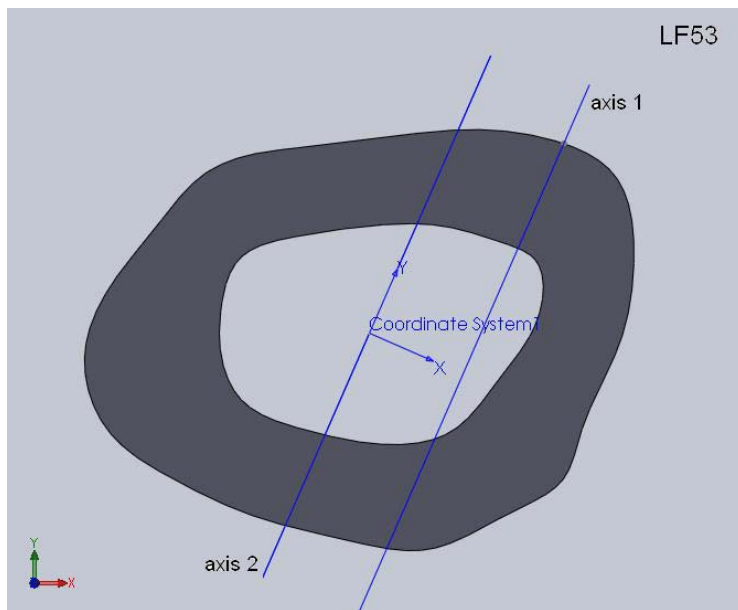


Γράφημα 101: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF53

Μέγιστο φορτίο: 128,82N
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,38mm
Δαπανηθείσα ενέργεια: 13,6mJ



Εικόνα 280: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF53. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.

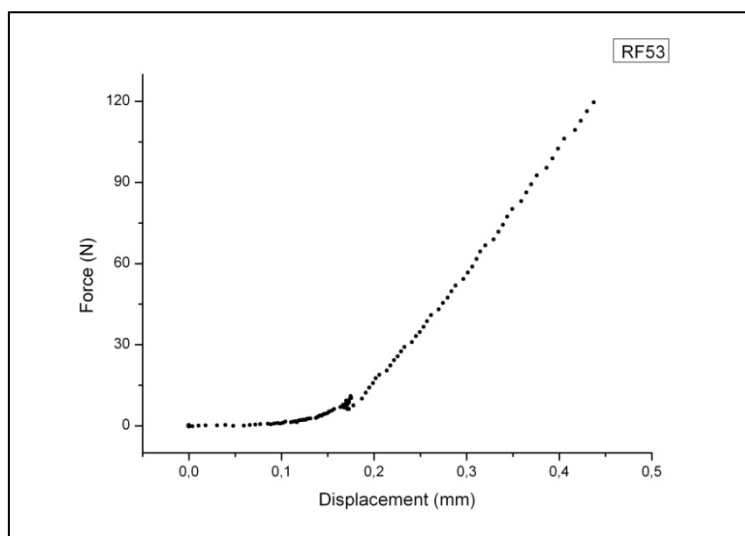


Εικόνα 281: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF53 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF53
Ομάδα: Control χωρίς OVX
Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 11/1/2012



Εικόνα 282: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF53 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

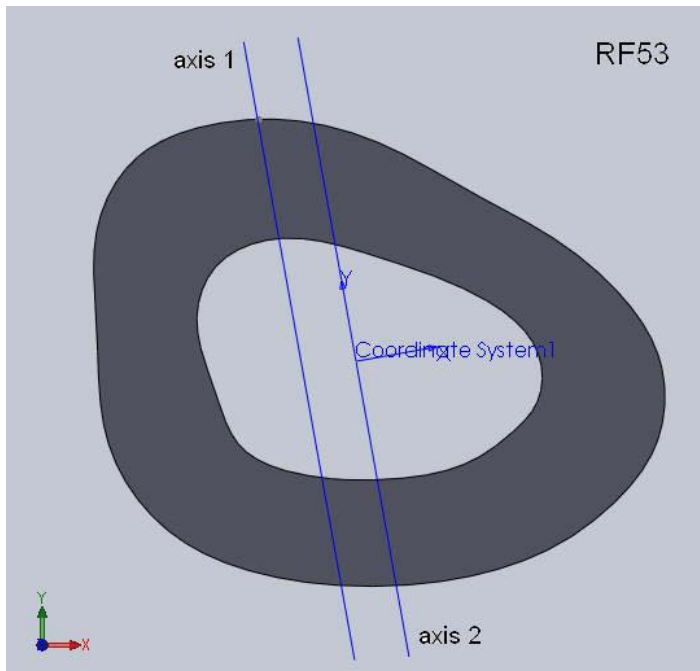


Γράφημα 102: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF53

Μέγιστο φορτίο: 122,92N
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,44mm
Δαπανηθείσα ενέργεια: 16,3mJ

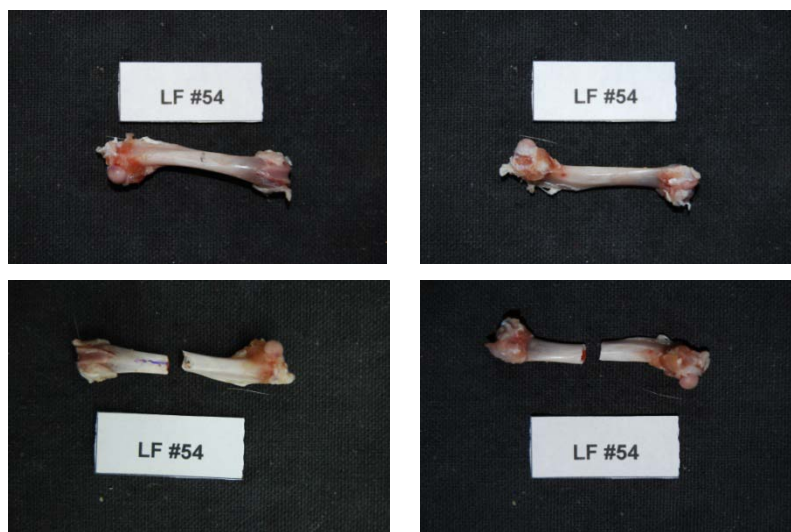


Εικόνα 283: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF53. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.

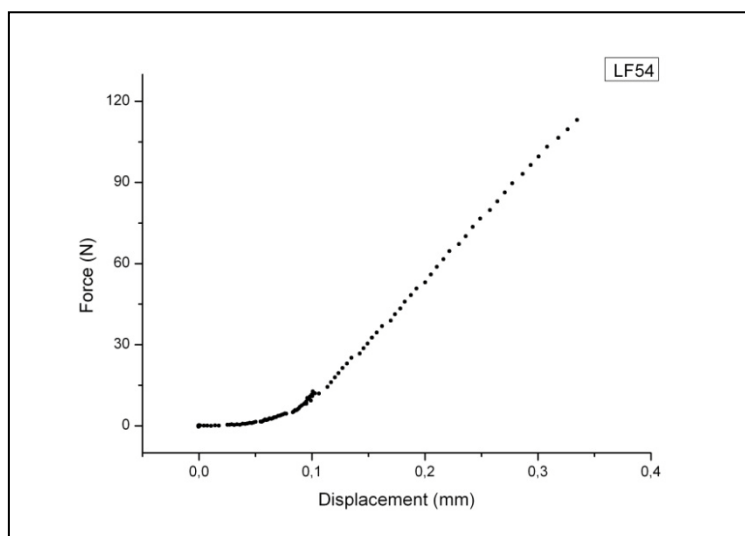


Εικόνα 284: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF53 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF54
Ομάδα: Control χωρίς OVX
Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 11/1/2012



Εικόνα 285: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF54 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

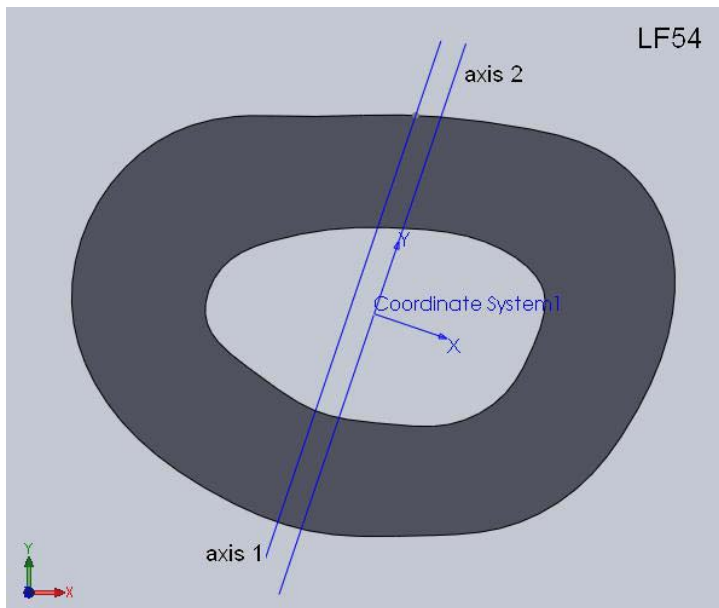


Γράφημα 103: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF54

Μέγιστο φορτίο: 127,83N
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,33mm
Δαπανηθείσα ενέργεια: 14,7mJ



Εικόνα 286: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF54. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.

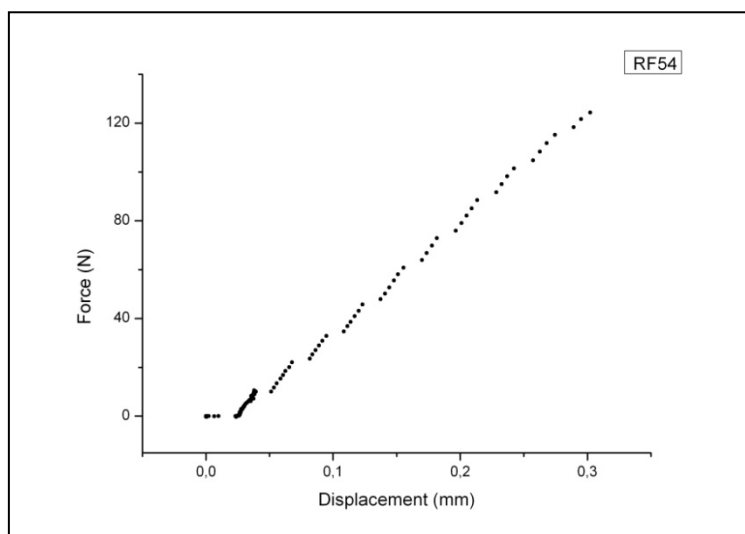


Εικόνα 287: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF54 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF54
Ομάδα: Control χωρίς OVX
Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 11/1/2012



Εικόνα 288: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF54 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

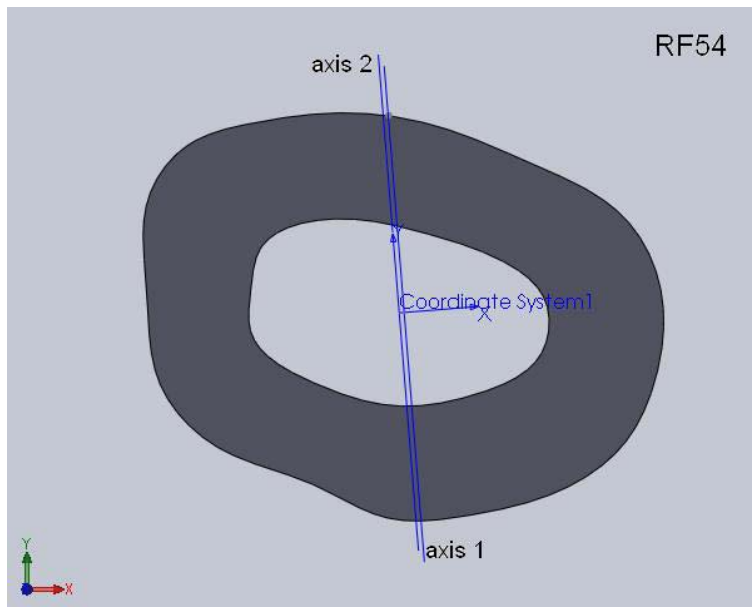


Γράφημα 104: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF54

Μέγιστο φορτίο: 116,88N
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,30mm
Δαπανηθείσα ενέργεια: 17,5mJ



Εικόνα 289: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF54. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.



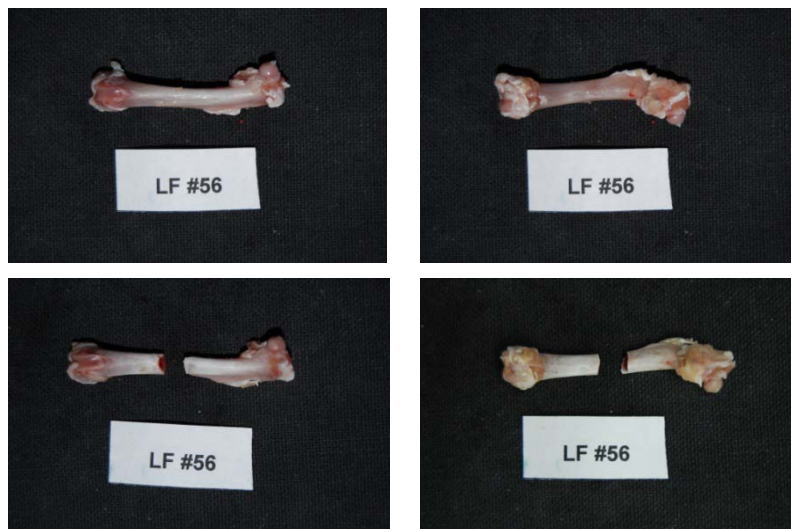
Εικόνα 290: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF54 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής. Η εκκεντρότητα είναι πολύ μικρή.

Κωδικός δοκιμίου: LF56

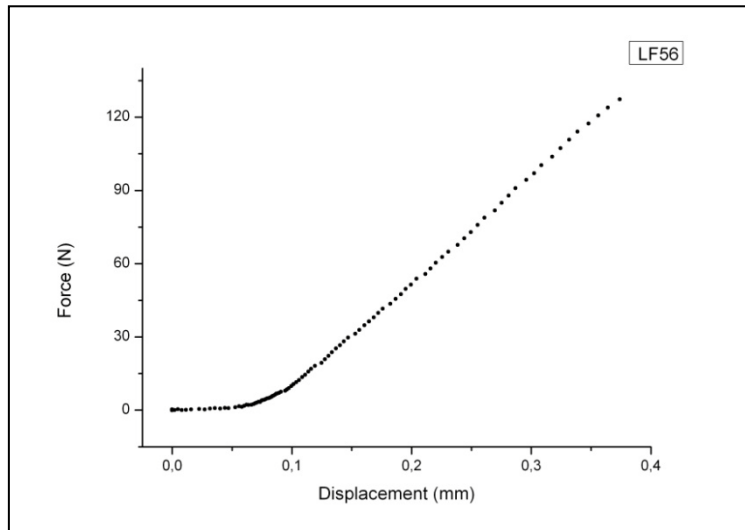
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 9/1/2012



Εικόνα 291: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF56 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 105: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF56

Μέγιστο φορτίο: 132,22N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,37mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 19,0mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF56

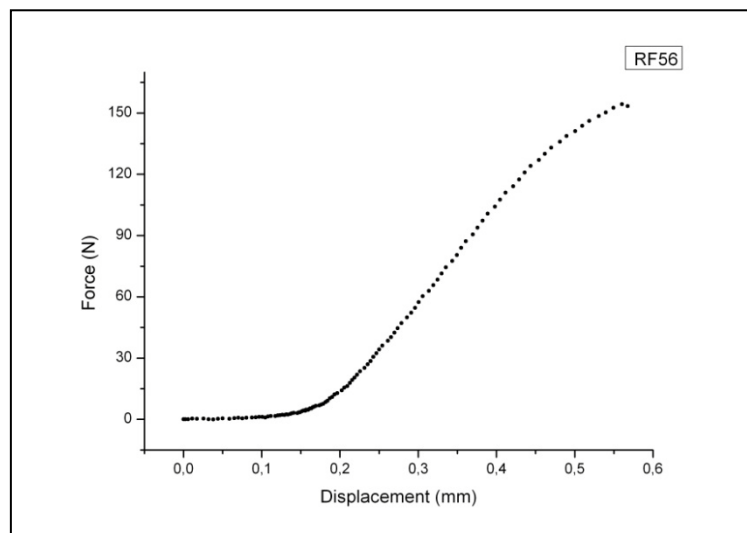
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 9/1/2012



Εικόνα 292: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF56 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 106: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF56

Μέγιστο φορτίο: 155,50N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,56mm

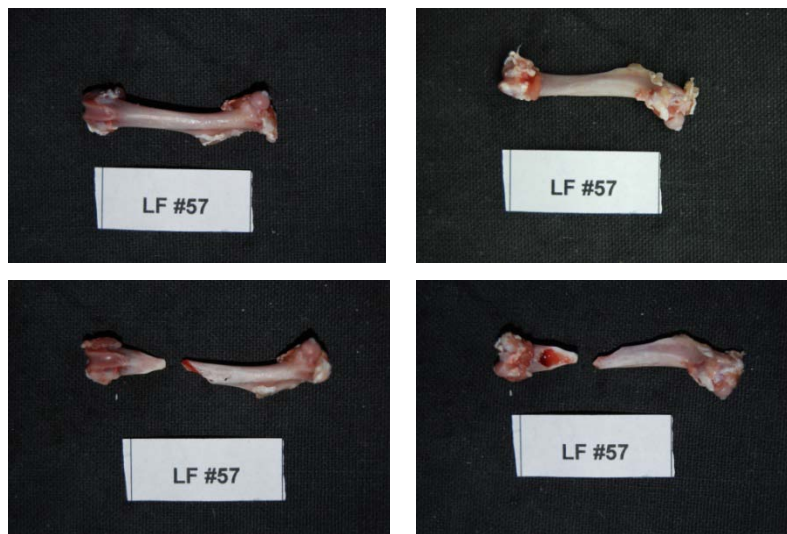
Δαπανηθείσα ενέργεια: 34,7mJ

Κωδικός δοκιμίου: LF57

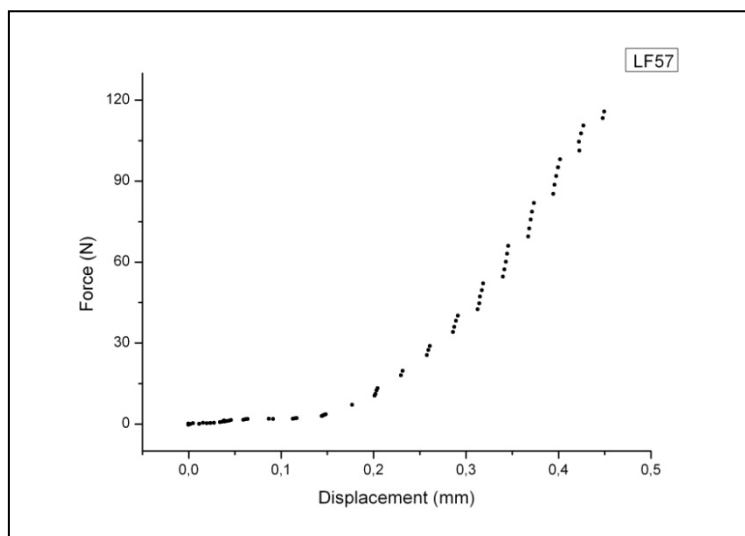
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 9/1/2012



Εικόνα 293: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF57 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 107: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF57

Μέγιστο φορτίο: 119,97N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,45mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 14,8mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.

Κωδικός δοκιμίου: RF57

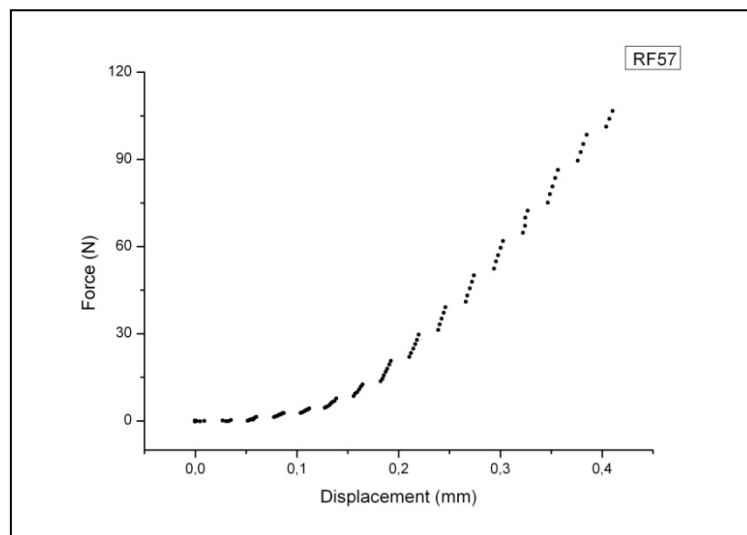
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 9/1/2012



Εικόνα 294: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF57 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 108: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF57

Μέγιστο φορτίο: 108,69N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,41mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 14,0mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.

Κωδικός δοκιμίου: LF58

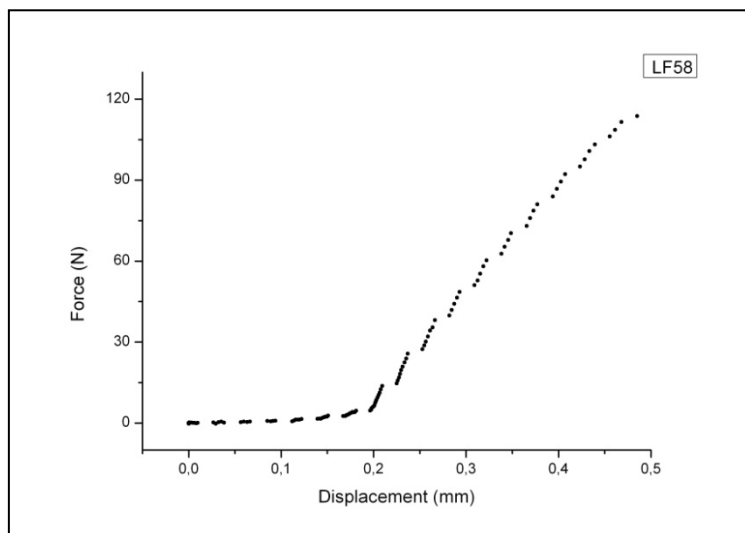
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 9/1/2012



Εικόνα 295: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF58 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 109: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF58

Μέγιστο φορτίο: 116,52N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,49mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 18,7mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF58

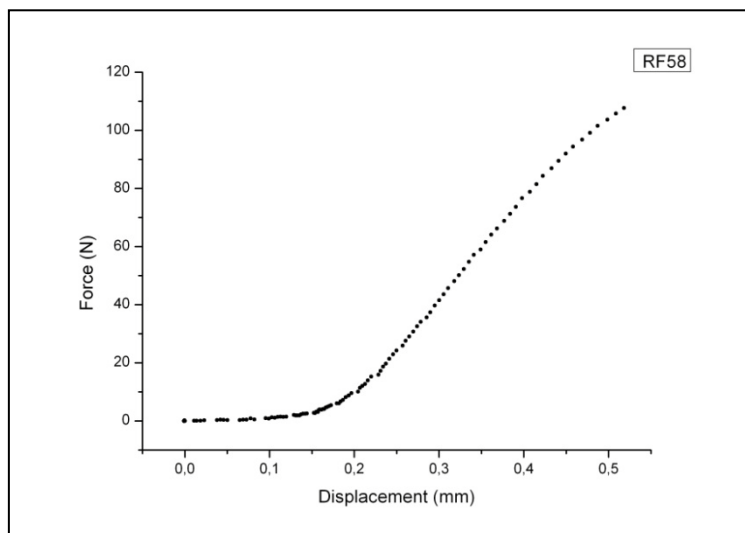
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 9/1/2012



Εικόνα 296: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF58 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 110: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF58

Μέγιστο φορτίο: 109,74N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,52mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 19,9mJ

Κωδικός δοκιμίου: LF59

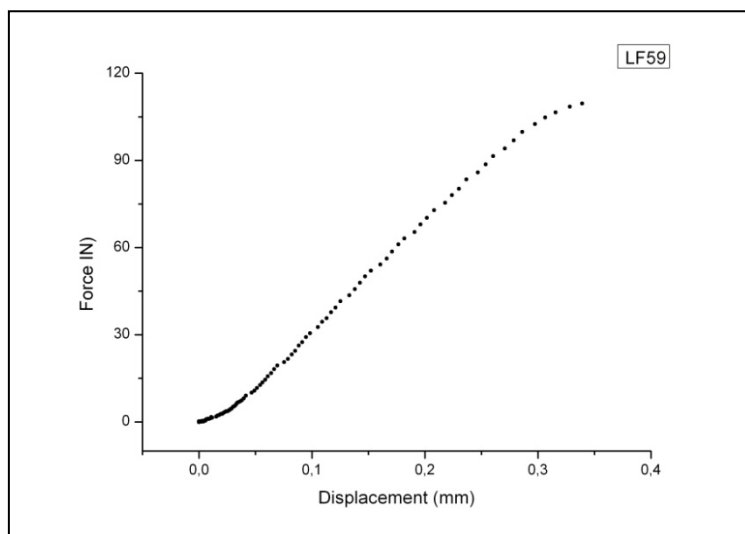
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 13/1/2012



Εικόνα 297: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF59 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 111: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF59

Μέγιστο φορτίο: 110,72N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,34mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 19,2mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε κοντά στο γόνατο κατά την χειρουργική διαδικασία. Κατά τη φόρτισή του έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή του γονάτου.

Κωδικός δοκιμίου: RF59

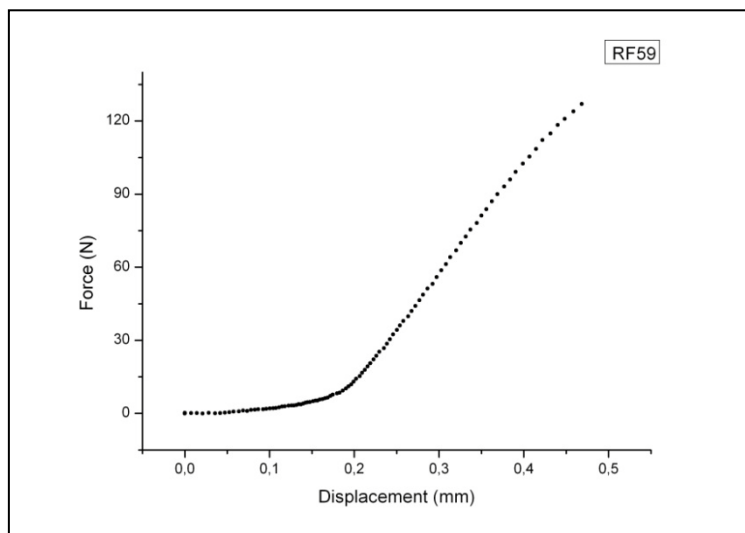
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 13/1/2012



Εικόνα 298: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF59 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 112: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF59

Μέγιστο φορτίο: 127,94N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,47mm

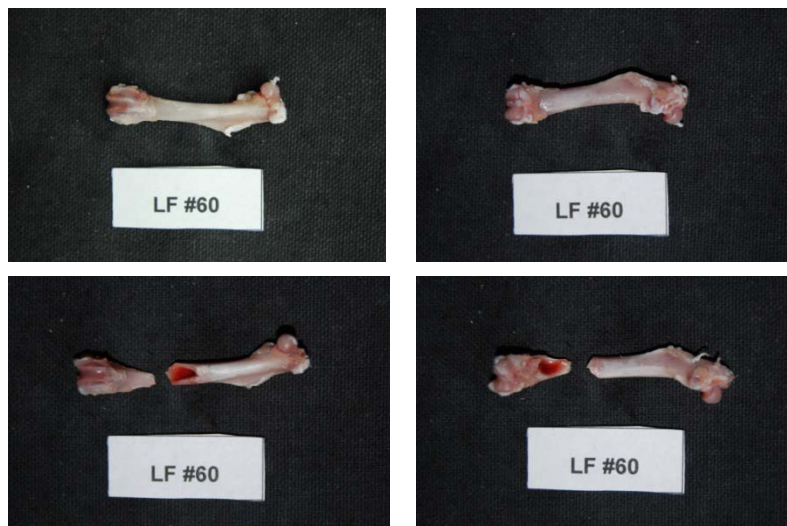
Δαπανηθείσα ενέργεια: 20,0mJ

Κωδικός δοκιμίου: LF60

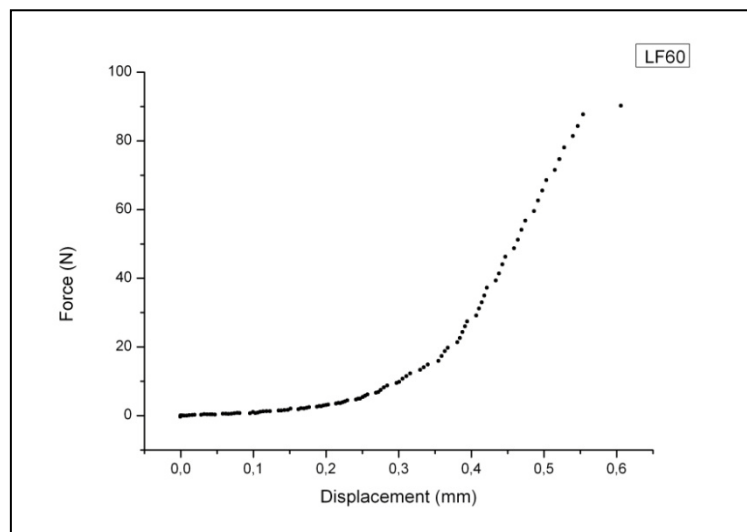
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 13/1/2012



Εικόνα 299: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF60 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 113: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF60

Μέγιστο φορτίο: 90,19N

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.

Κωδικός δοκιμίου: RF60

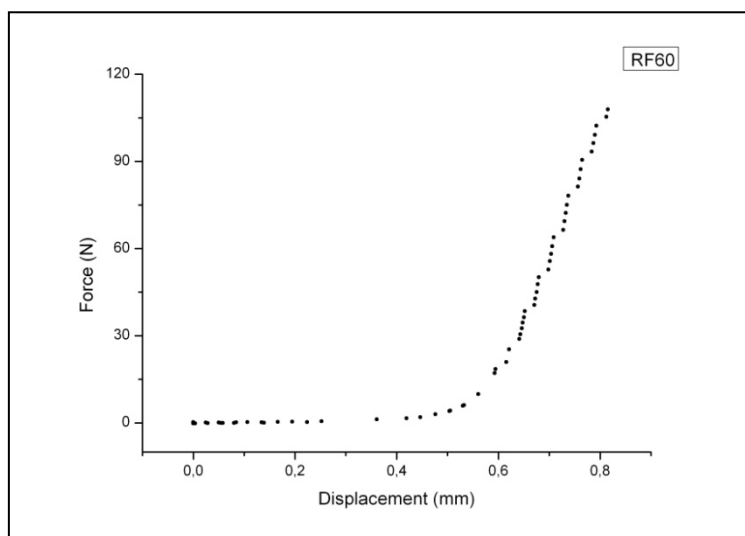
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 13/1/2012



Εικόνα 300: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF60 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 114: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF60

Μέγιστο φορτίο: 110,56N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,82mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 14,6mJ

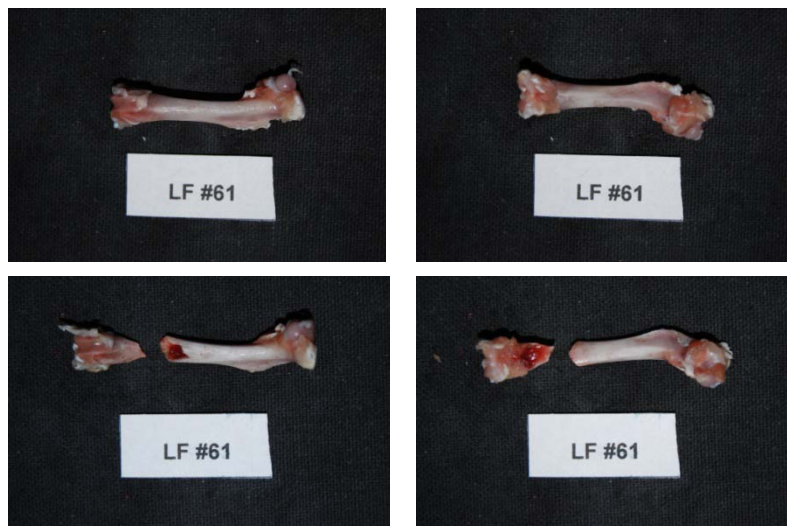
Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.

Κωδικός δοκιμίου: LF61

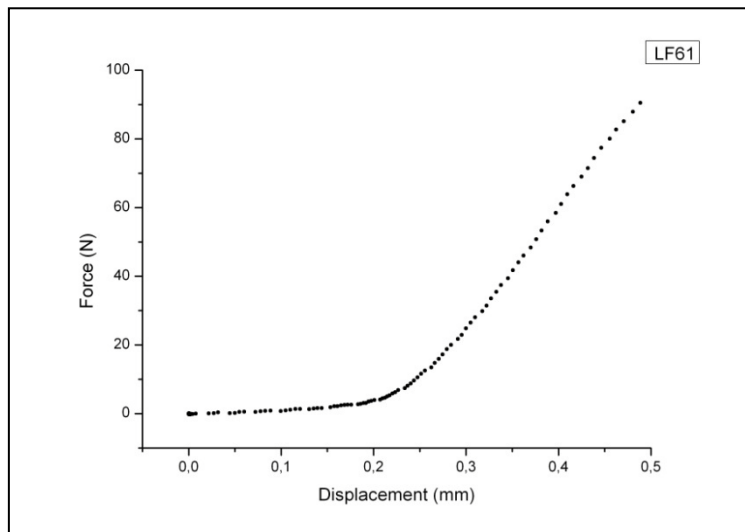
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 13/1/2012



Εικόνα 301: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF61 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 115: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF61

Μέγιστο φορτίο: 94,29N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,49mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 12,3mJ

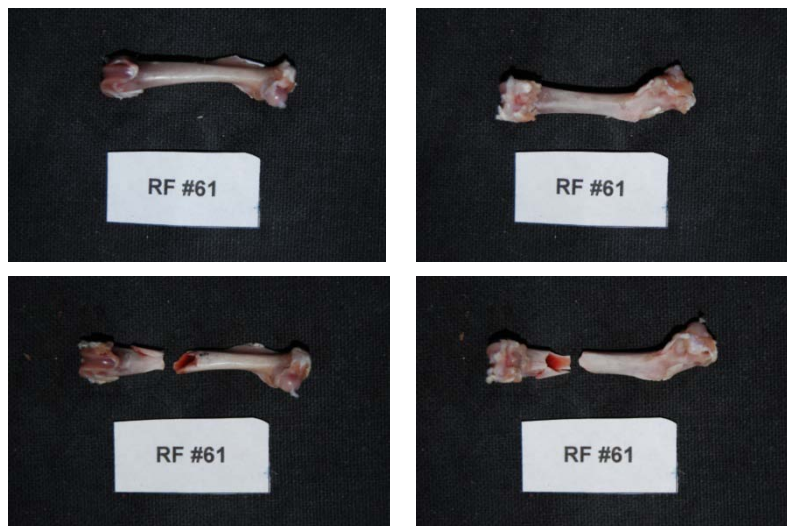
Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.

Κωδικός δοκιμίου: RF61

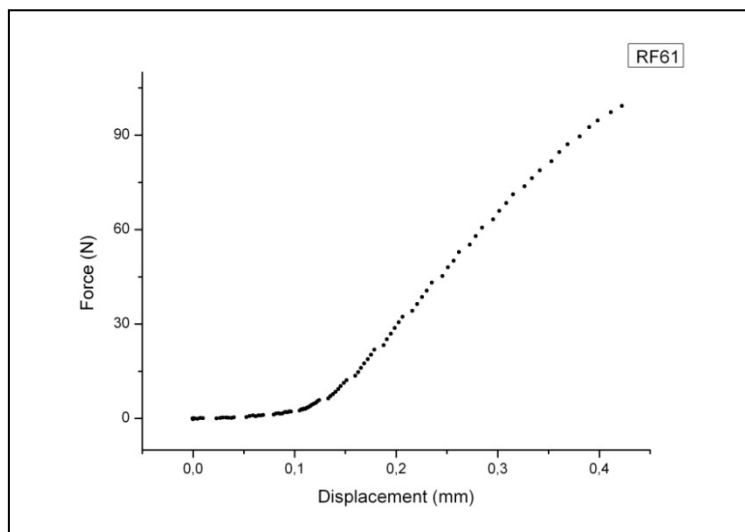
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 13/1/2012



Εικόνα 302: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF61 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 116: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF61

Μέγιστο φορτίο: 102,29N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,42mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 16,4mJ

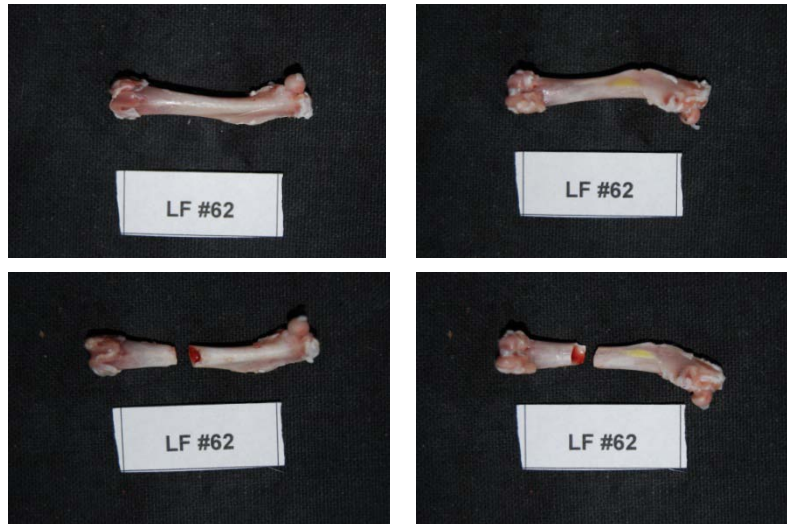
Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.

Κωδικός δοκιμίου: LF62

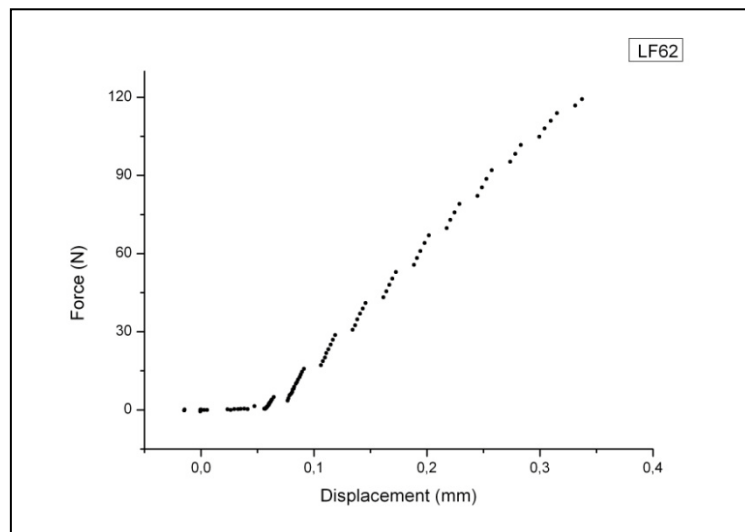
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 13/1/2012



Εικόνα 303: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF62 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 117: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF62

Μέγιστο φορτίο: 123,16N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,34mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 17,3mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF62

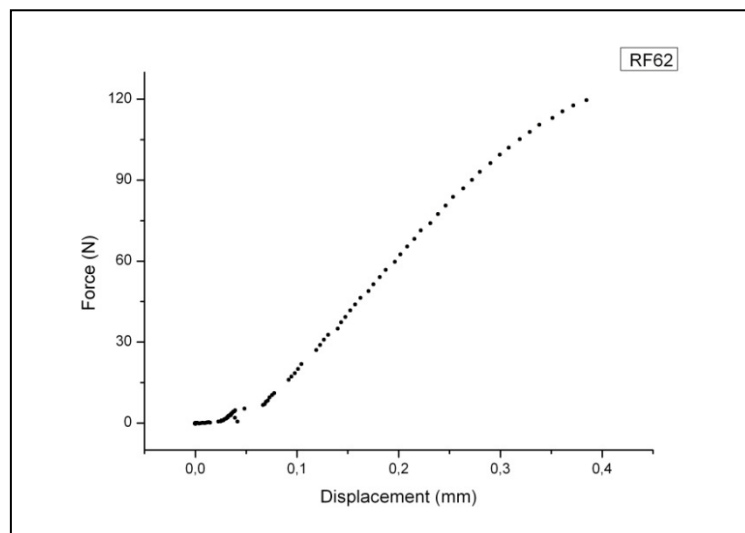
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 13/1/2012



Εικόνα 304: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF62 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 118: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF62

Μέγιστο φορτίο: 123,16N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,38mm

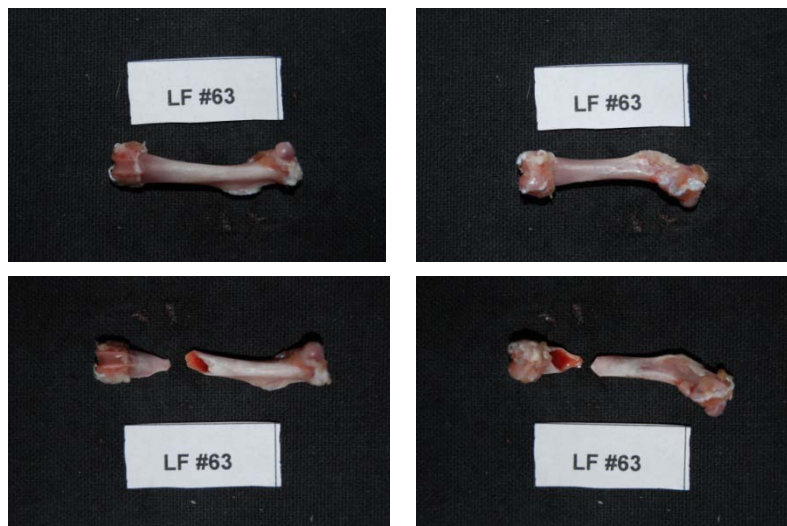
Δαπανηθείσα ενέργεια: 22,2mJ

Κωδικός δοκιμίου: LF63

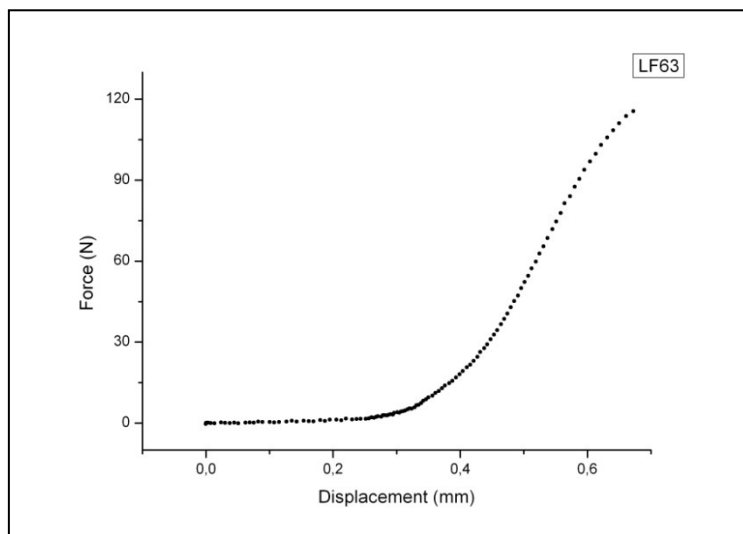
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 11/1/2012



Εικόνα 305: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF63 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 119: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF63

Μέγιστο φορτίο: 117,09N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,67mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 19,7mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.

Κωδικός δοκιμίου: RF63

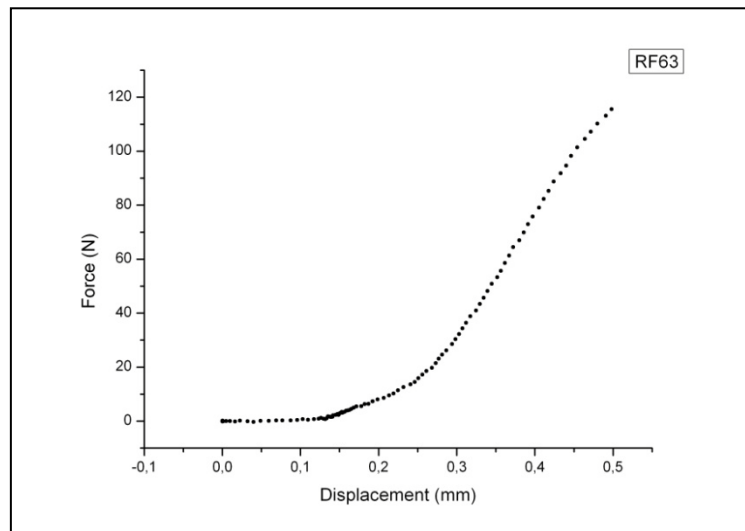
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 11/1/2012



Εικόνα 306: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF63 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 120: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF63

Μέγιστο φορτίο: 119,57N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,50mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 17,0mJ

Κωδικός δοκιμίου: LF65

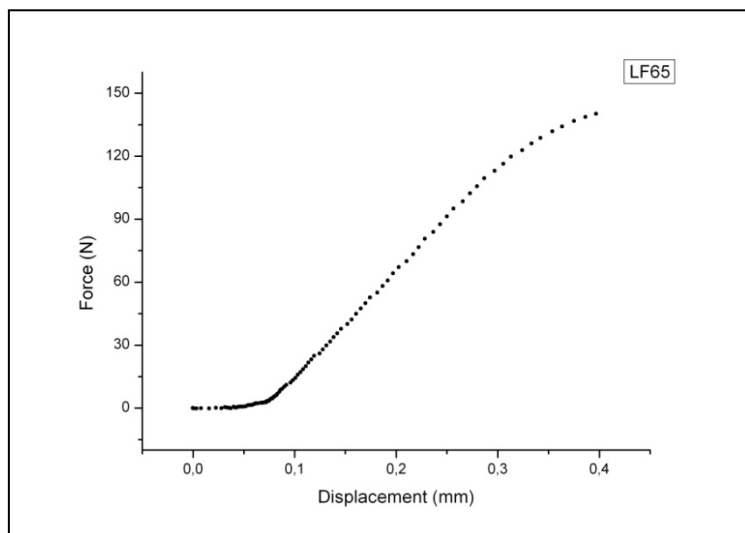
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 11/1/2012



Εικόνα 307: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF65 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 121: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF65

Μέγιστο φορτίο: 140,74N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,40mm

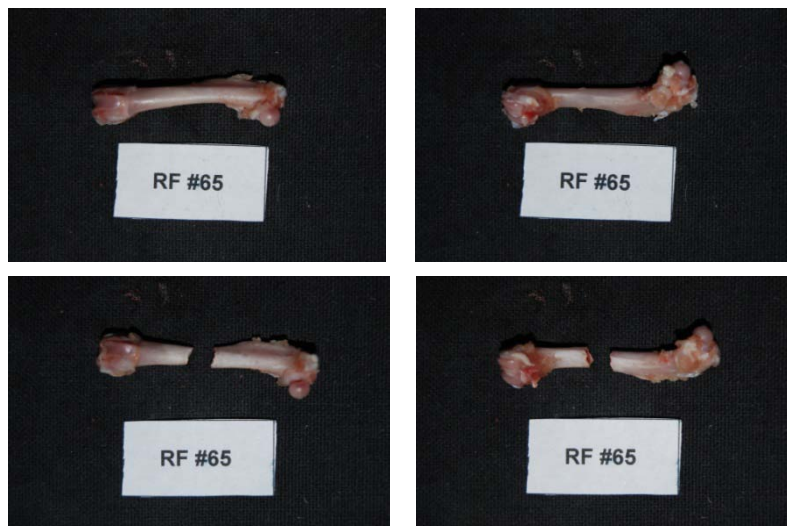
Δαπανηθείσα ενέργεια: 25,8mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF65

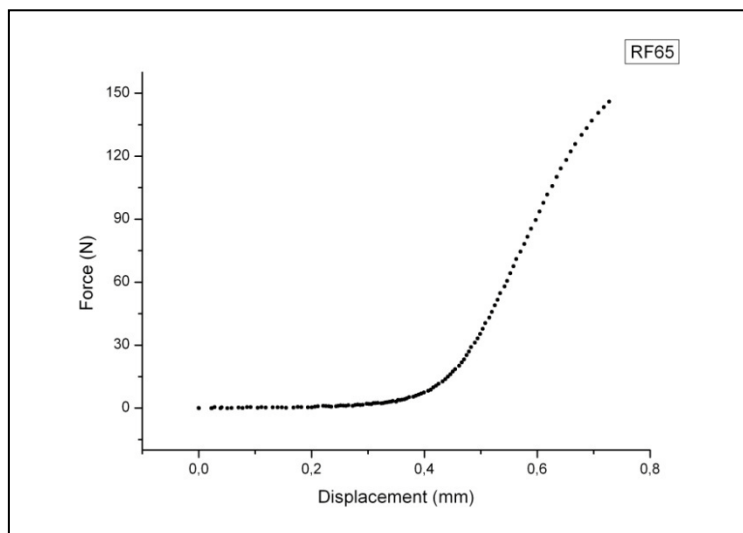
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 11/1/2012



Εικόνα 308: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF65 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 122: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF65

Μέγιστο φορτίο: 148,28N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,73mm

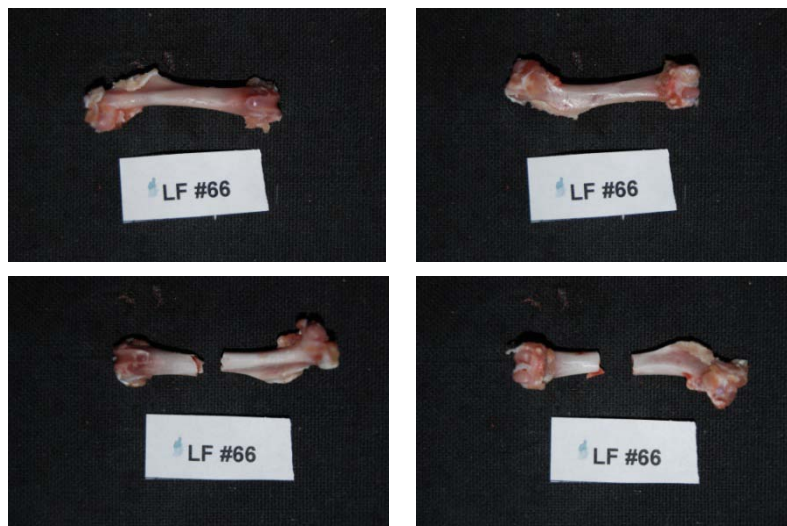
Δαπανηθείσα ενέργεια: 24,3mJ

Κωδικός δοκιμίου: LF66

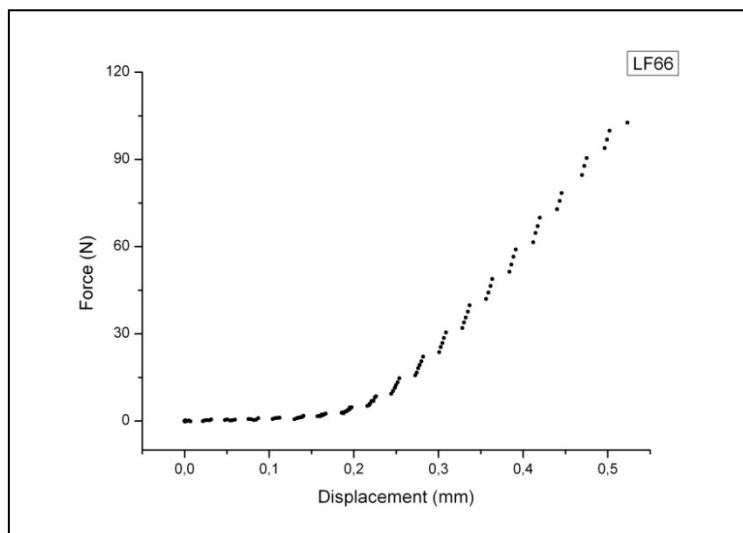
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 11/1/2012



Εικόνα 309: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF66 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 123: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF66

Μέγιστο φορτίο: 105,19N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,52mm

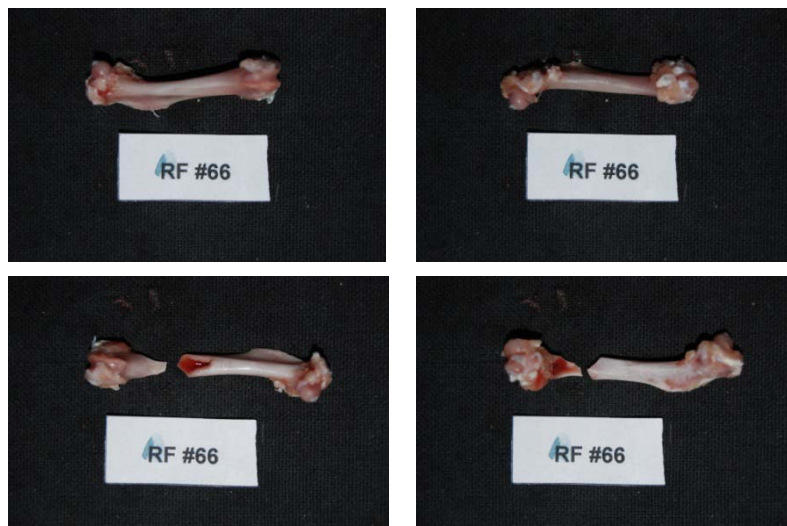
Δαπανηθείσα ενέργεια: 16,0mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF66

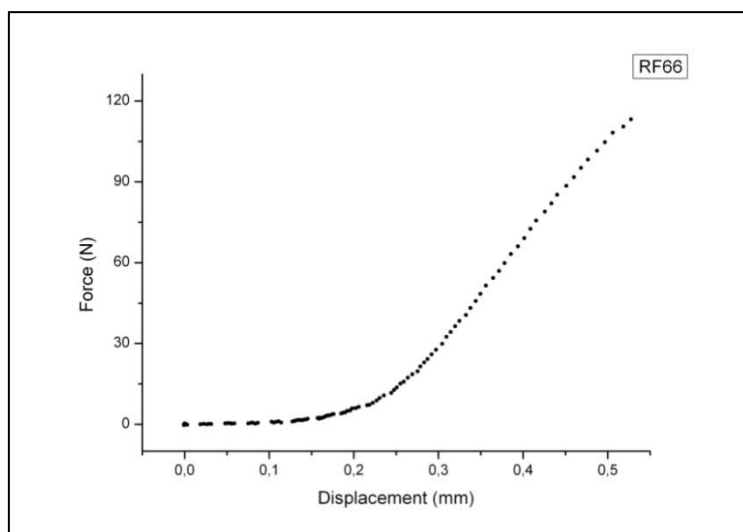
Ομάδα: A low

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 11/1/2012



Εικόνα 310: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF66 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 124: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF66

Μέγιστο φορτίο: 114,99N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,53mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 18,4mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.

Κωδικός δοκιμίου: LF67

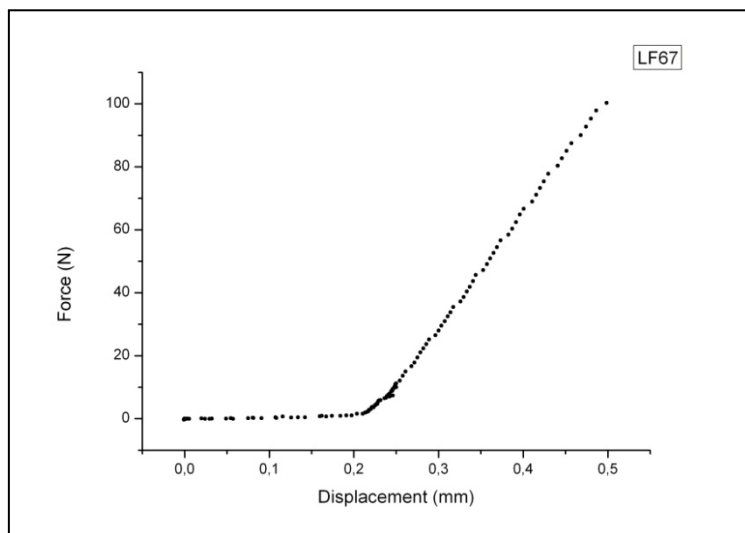
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 16/1/2012



Εικόνα 311: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF67 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 125: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF67

Μέγιστο φορτίο: 103,71N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,5mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 14,2mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF67

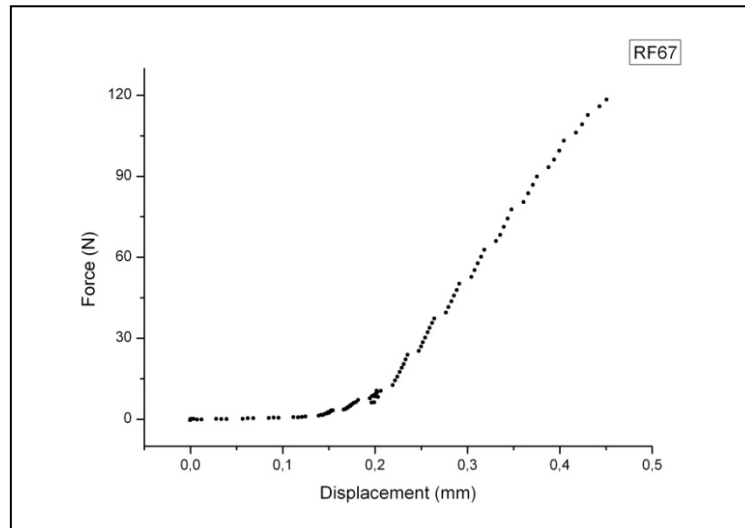
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 16/1/2012



Εικόνα 312: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF67 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 126: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF67

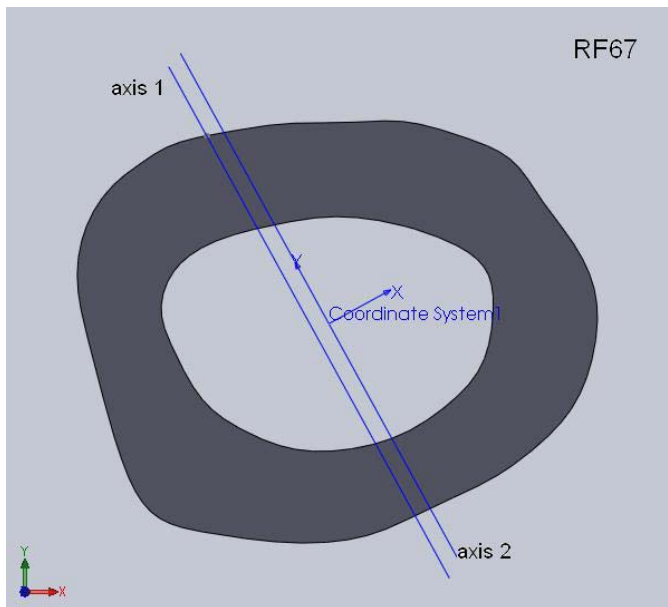
Μέγιστο φορτίο: 122,8N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,45mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 16,4mJ



Εικόνα 313: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF67. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



Εικόνα 314: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF67 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF68

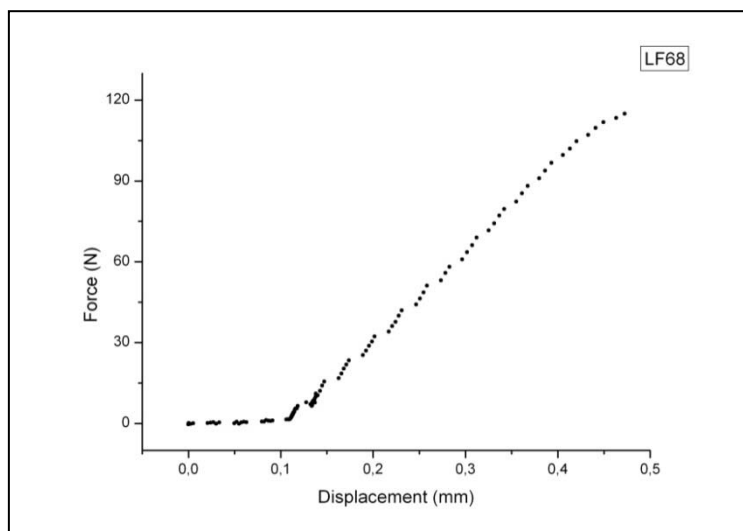
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 16/1/2012



Εικόνα 315: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF68 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 127: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF68

Μέγιστο φορτίο: 117,15N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,47mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 22,1mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.

Κωδικός δοκιμίου: RF68

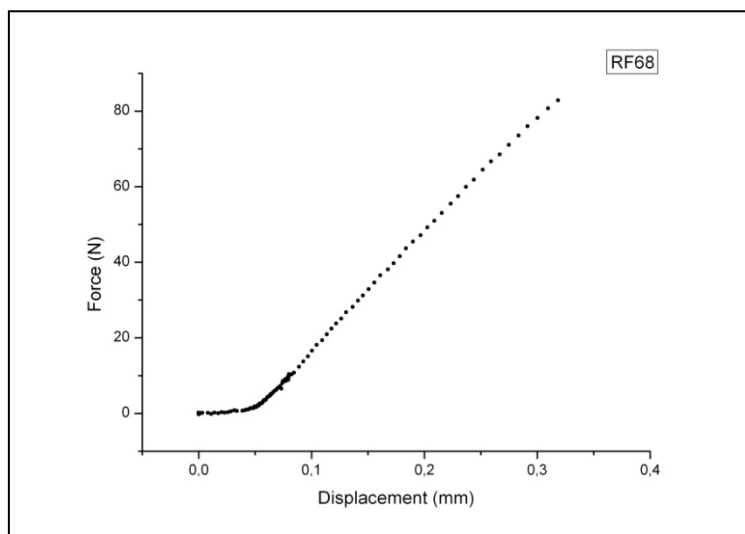
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 16/1/2012



Εικόνα 316: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF68 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 128: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF68

Μέγιστο φορτίο: 85,09N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,32mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 11,5mJ

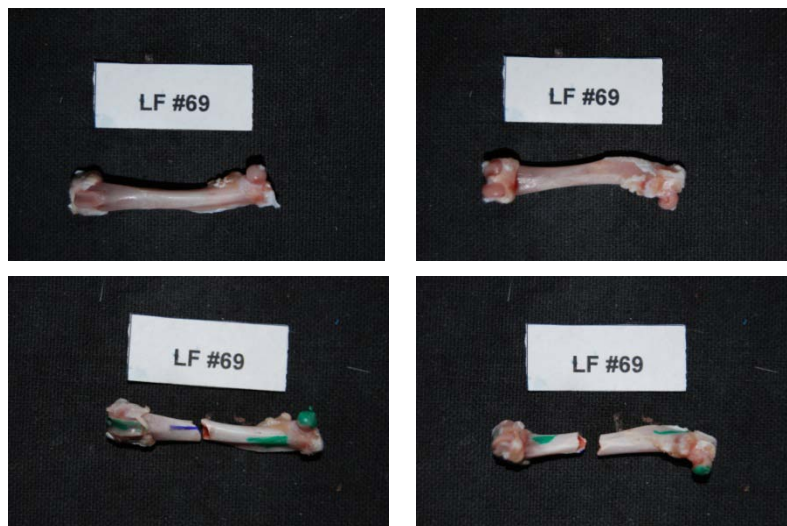
Παρατηρήσεις: Αποκολλήθηκε η κεφαλή του ισχίου κατά την χειρουργική διαδικασία.

Κωδικός δοκιμίου: LF69

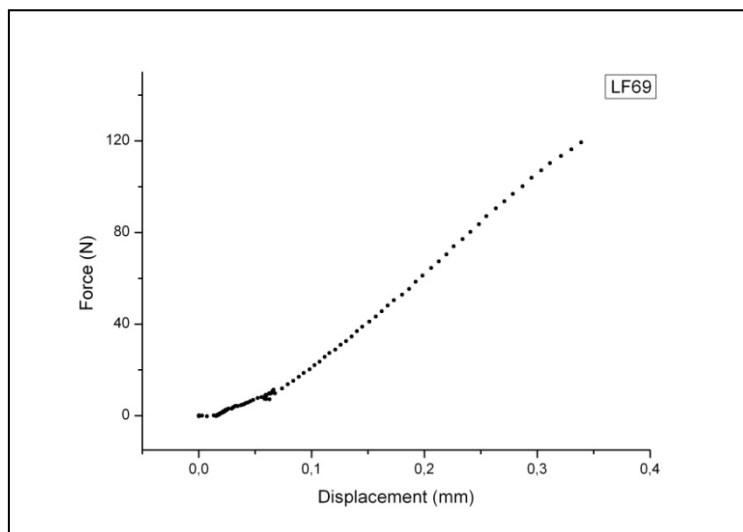
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 16/1/2012



Εικόνα 317: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF69 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 129: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF69

Μέγιστο φορτίο: 121,75N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,34mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 17,7mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF69

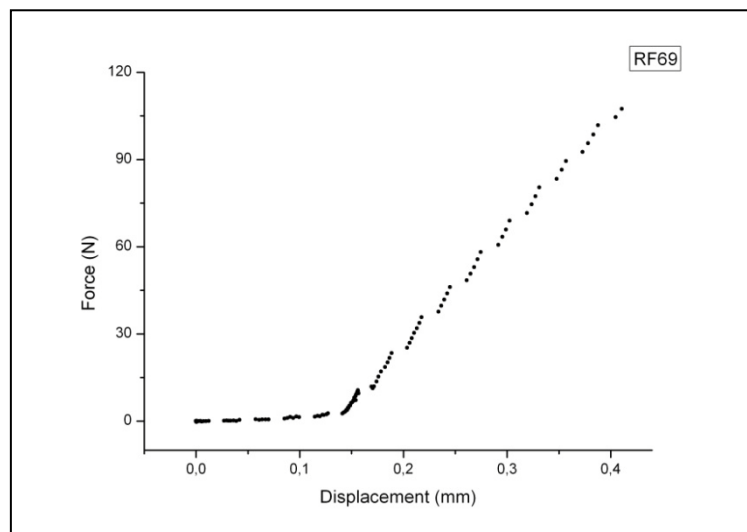
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 16/1/2012



Εικόνα 318: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF69 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 130: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF69

Μέγιστο φορτίο: 110,23N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,41mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 15,2mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF70

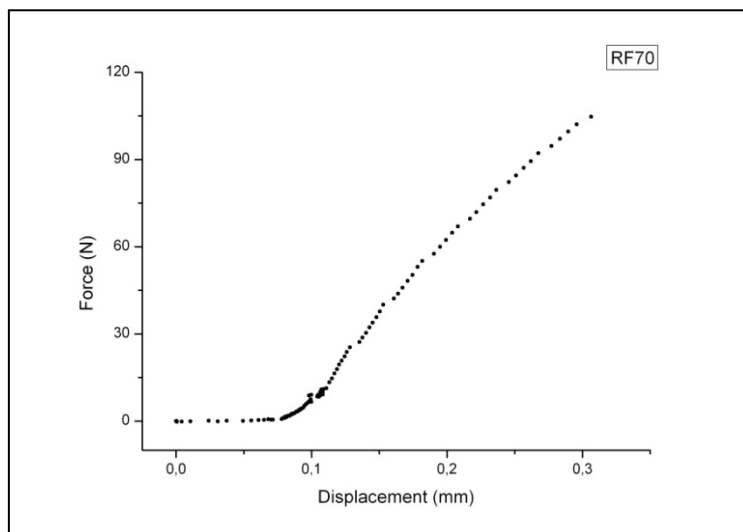
Ομάδα: A high

Ημερομηνία γέννησης: 17/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 16/1/2012



Εικόνα 319: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF70 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 131: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF70

Μέγιστο φορτίο: 106,9N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,31mm

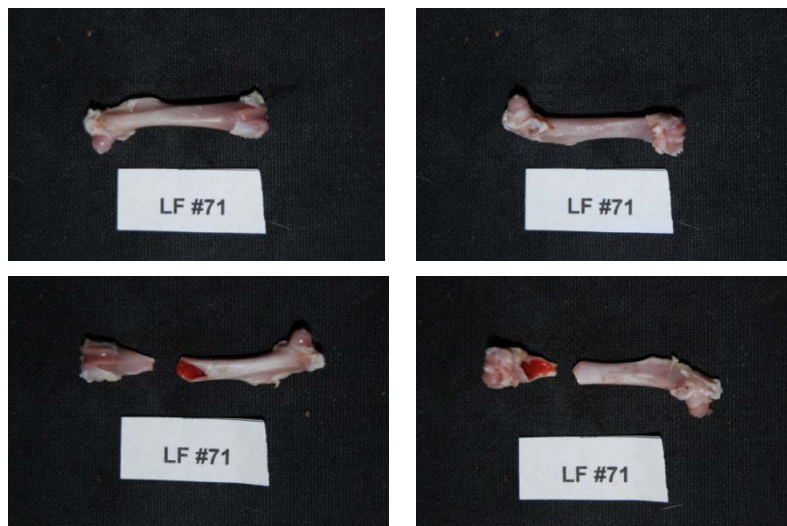
Δαπανηθείσα ενέργεια: 12,7mJ

Κωδικός δοκιμίου: LF71

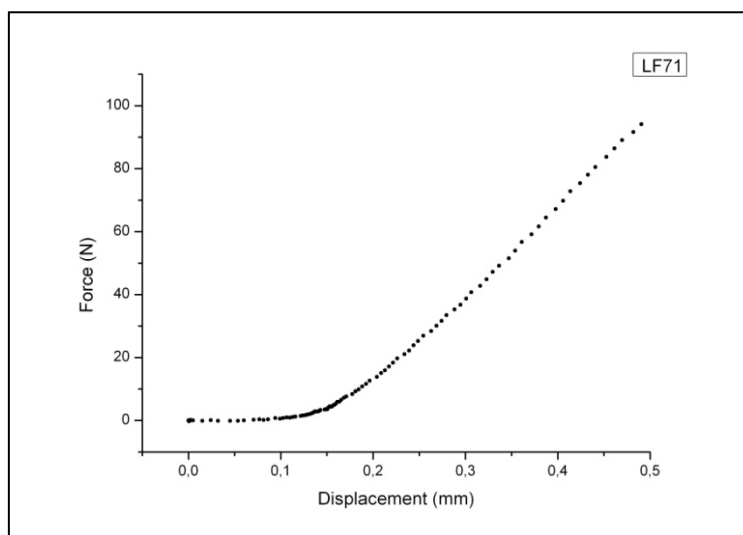
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 21-23/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 13/1/2012



Εικόνα 320: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF71 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 132: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF71

Μέγιστο φορτίο: 98,09N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,49mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 15,8mJ

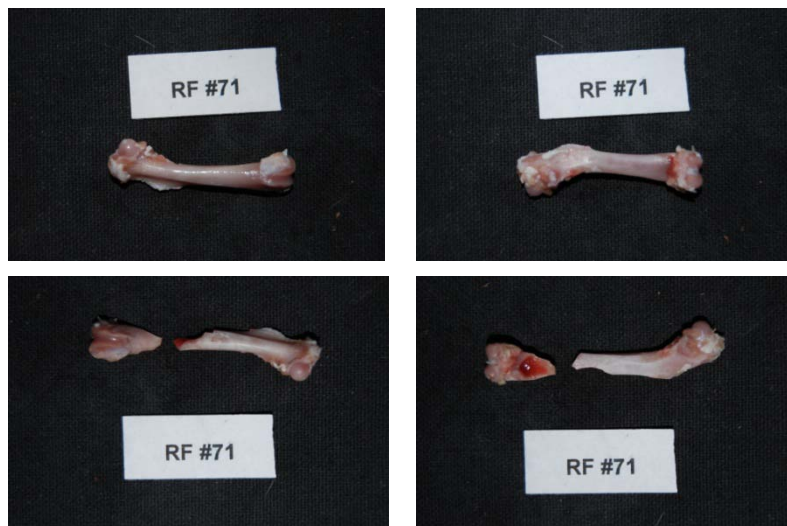
Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.

Κωδικός δοκιμίου: RF71

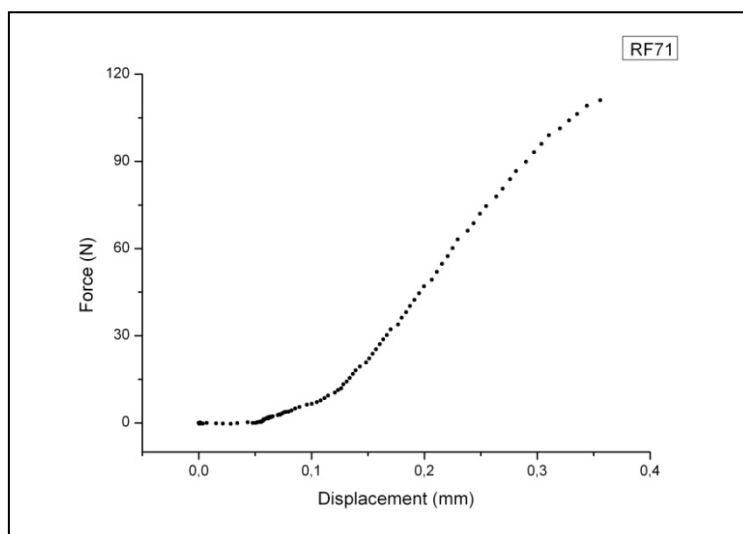
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 21-23/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 13/1/2012



Εικόνα 321: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF71 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 133: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF71

Μέγιστο φορτίο: 113,36N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,36mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 15,5mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.

Κωδικός δοκιμίου: LF72

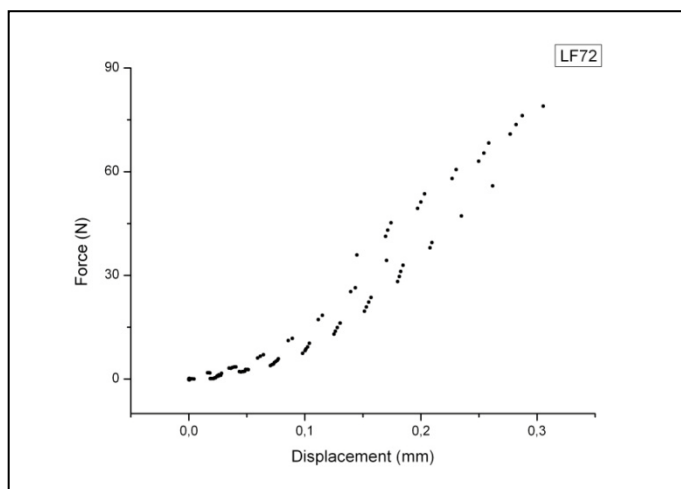
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 21-23/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 13/1/2012



Εικόνα 322: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF72 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 134: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF72

Μέγιστο φορτίο: 81,88N

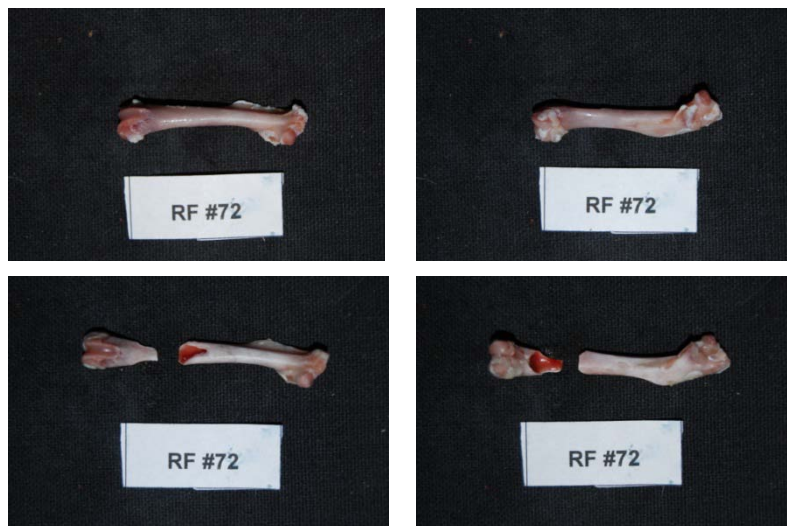
Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου. Κατά τη φόρτιση του δοκιμίου 'έπαιξε' η μετρητική γραμμή.

Κωδικός δοκιμίου: RF72

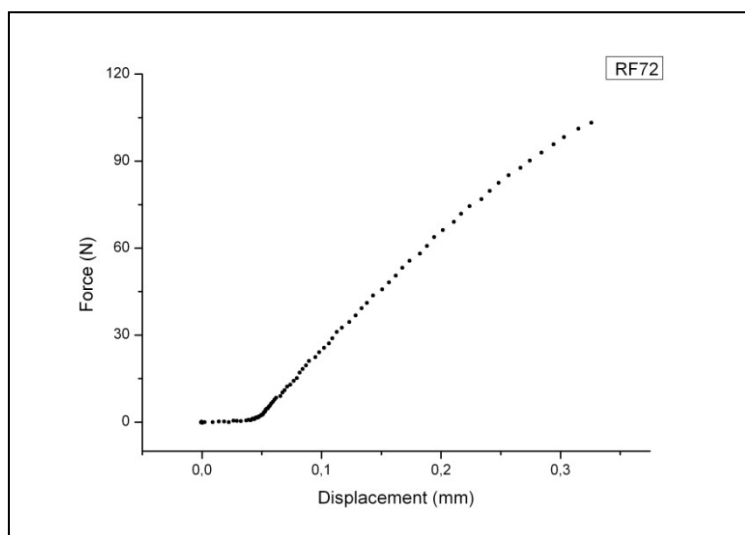
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 21-23/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 13/1/2012



Εικόνα 323: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF72 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 135: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF72

Μέγιστο φορτίο: 105,75N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,33mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 16,1mJ

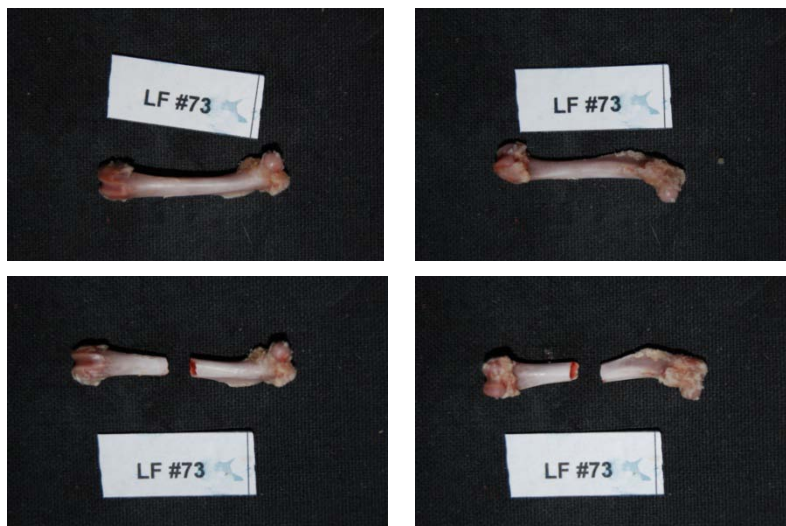
Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.

Κωδικός δοκιμίου: LF73

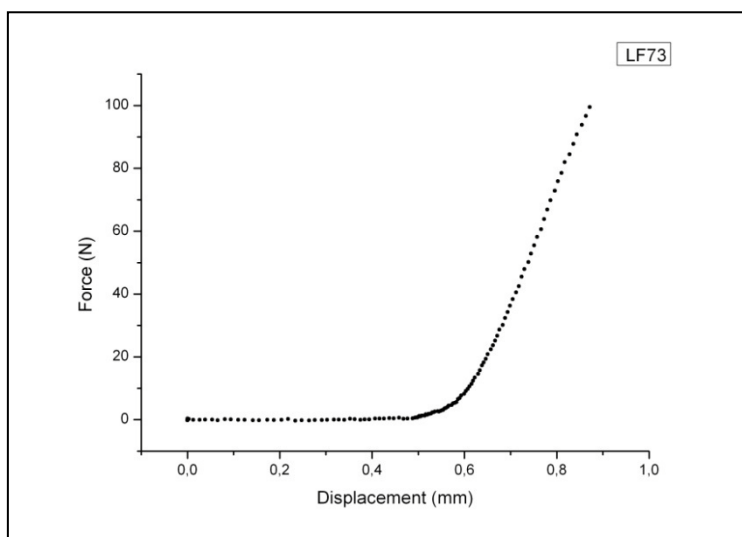
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 21-23/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 13/1/2012



Εικόνα 324: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF73 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 136: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF73

Μέγιστο φορτίο: 102,64N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,87mm

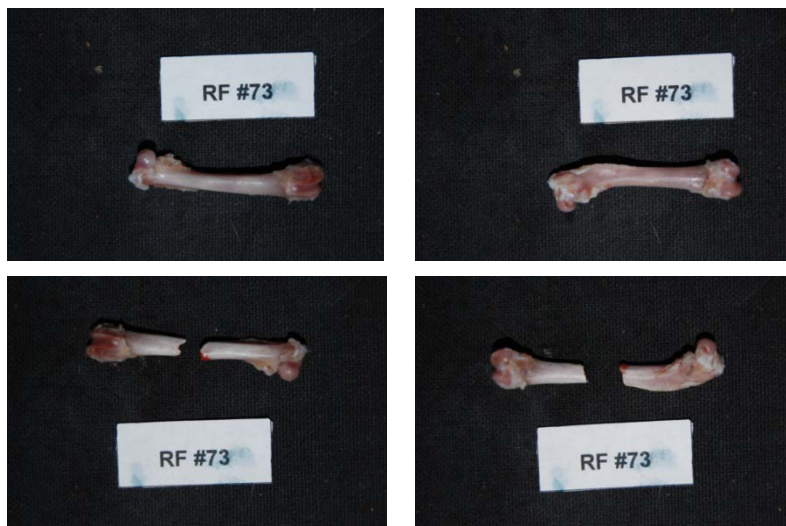
Δαπανηθείσα ενέργεια: 14,3mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF73

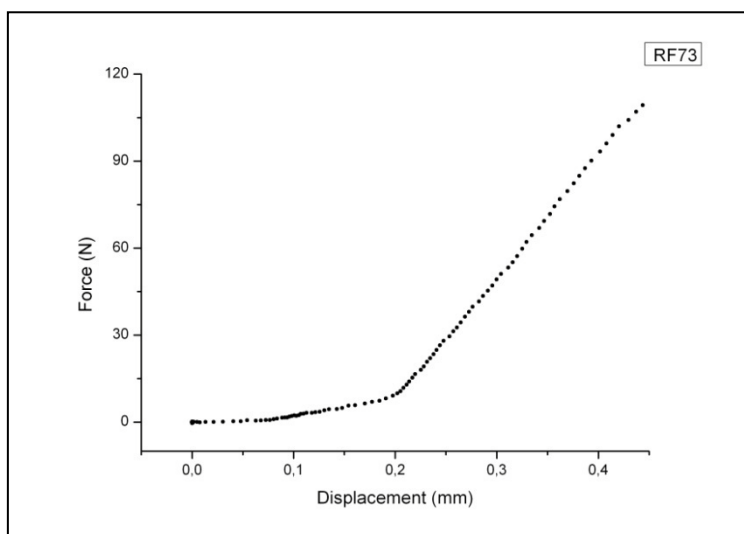
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 21-23/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 13/1/2012



Εικόνα 325: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF73 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 137: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF73

Μέγιστο φορτίο: 110,67N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,44mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 15,0mJ

Κωδικός δοκιμίου: LF74

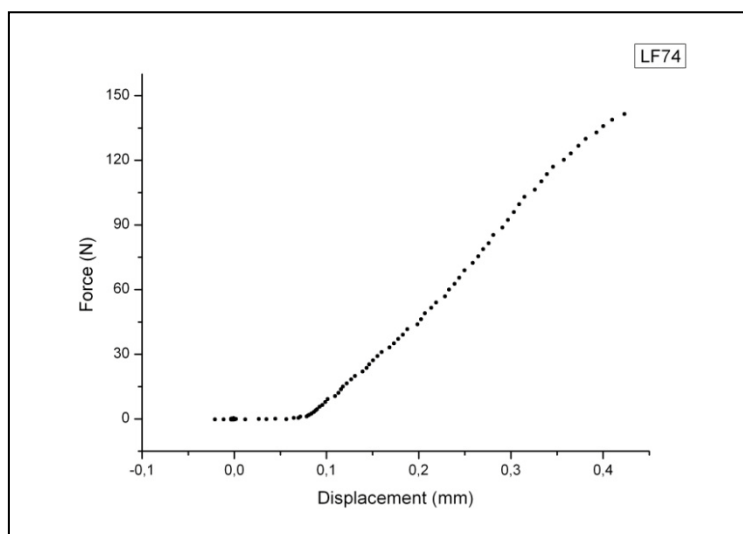
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 21-23/7/2010

Απεβίωση: 21/9/2011



Εικόνα 326: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF74 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



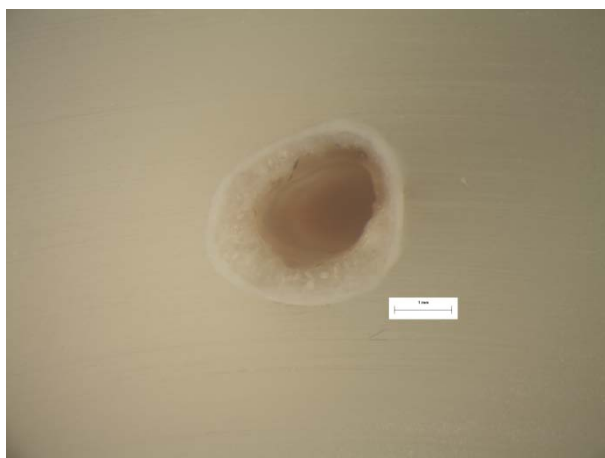
Γράφημα 138: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF74

Μέγιστο φορτίο: 143,82N

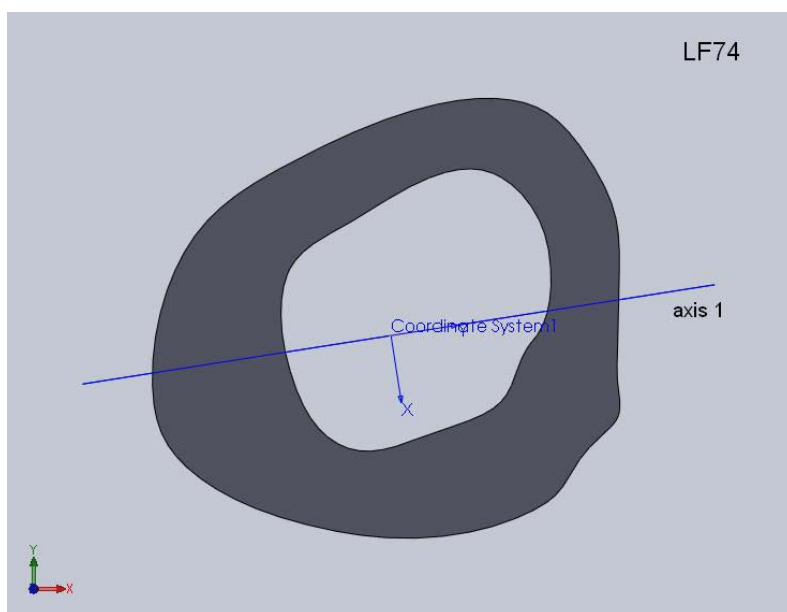
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,42mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 24,6mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο απεβίωσε 114 μέρες πριν την προβλεπόμενη ημερομηνία ευθανασίας. Βρέθηκε πύον στους πνεύμονες.



Εικόνα 327: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF74.



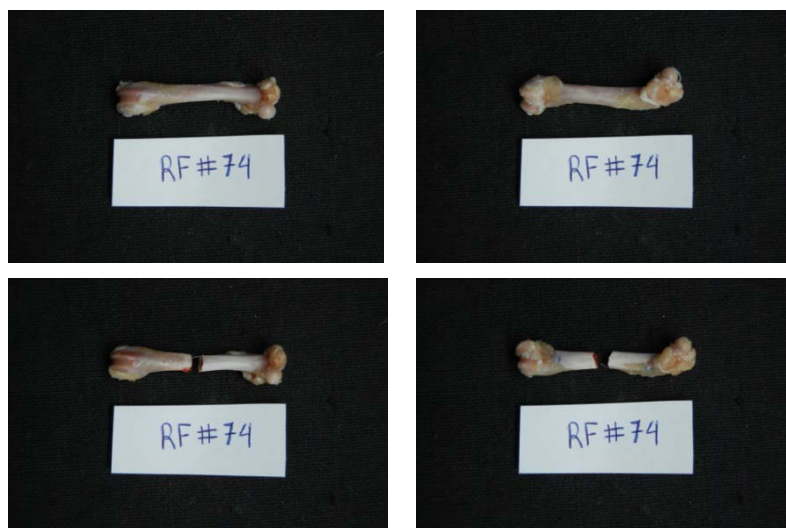
Εικόνα 328: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF74 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης του δοκιμίου.

Κωδικός δοκιμίου: RF74

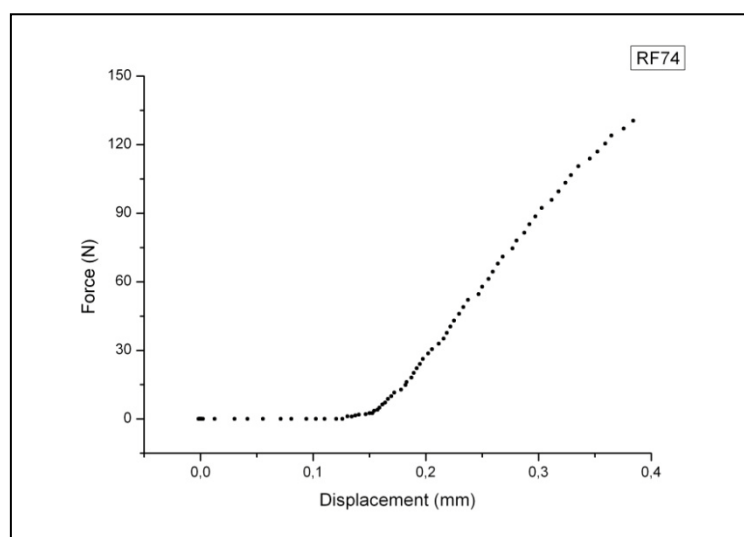
Ομάδα: B low

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 21-23/7/2010

Απεβίωση: 21/9/2011



Εικόνα 329: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF74 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 139: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF74

Μέγιστο φορτίο: 134,71N

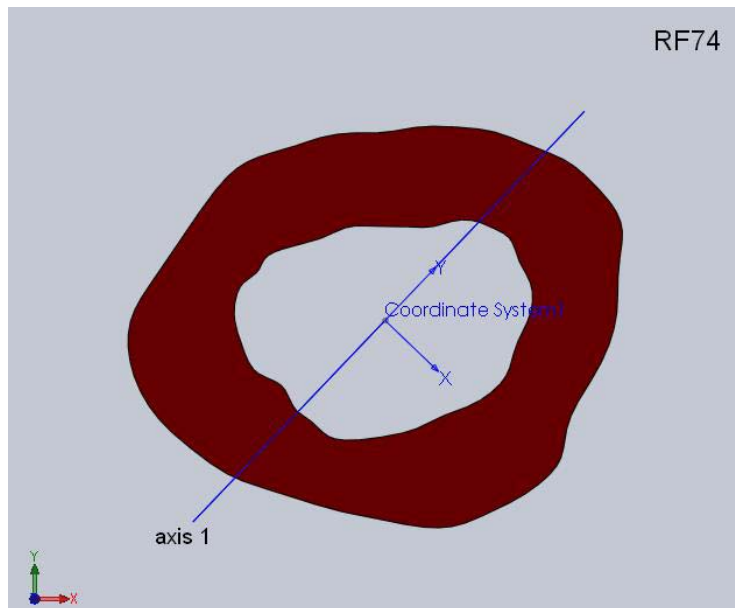
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,38mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 15,9mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο απεβίωσε 114 μέρες πριν την προβλεπόμενη ημερομηνία ευθανασίας. Βρέθηκε πύον στους πνεύμονες.



Εικόνα 330: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF74.



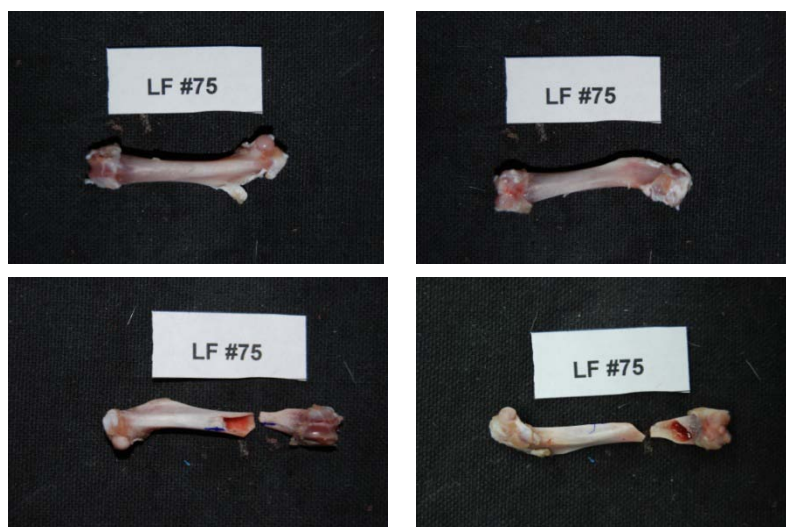
Εικόνα 331: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF74 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης του δοκιμίου.

Κωδικός δοκιμίου: LF75

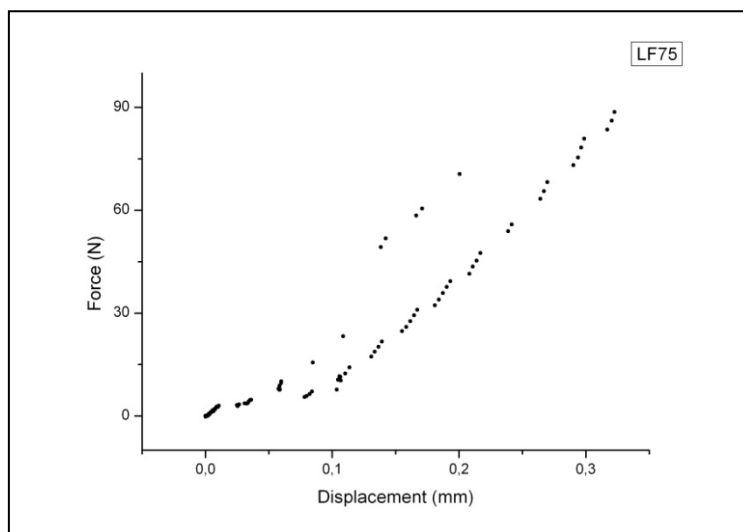
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 21-23/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 16/1/2012



Εικόνα 332: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF75 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 140: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF75

Μέγιστο φορτίο: 91,35N

Παρατηρήσεις: Κατά τη φόρτιση του δοκιμίου έπαιξε η γραμμή αναφοράς και αυτό φαίνεται στο γράφημα. Έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.

Κωδικός δοκιμίου: RF75

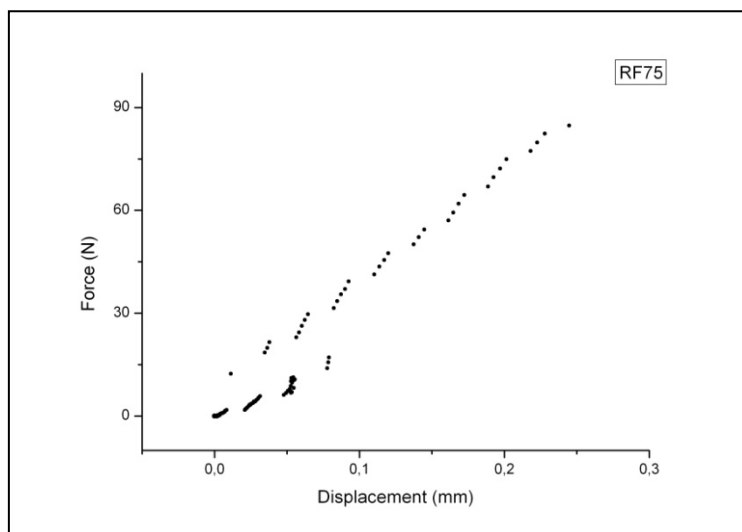
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 21-23/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 16/1/2012



Εικόνα 333: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF75 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 141: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF75

Μέγιστο φορτίο: 88,96N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,24mm

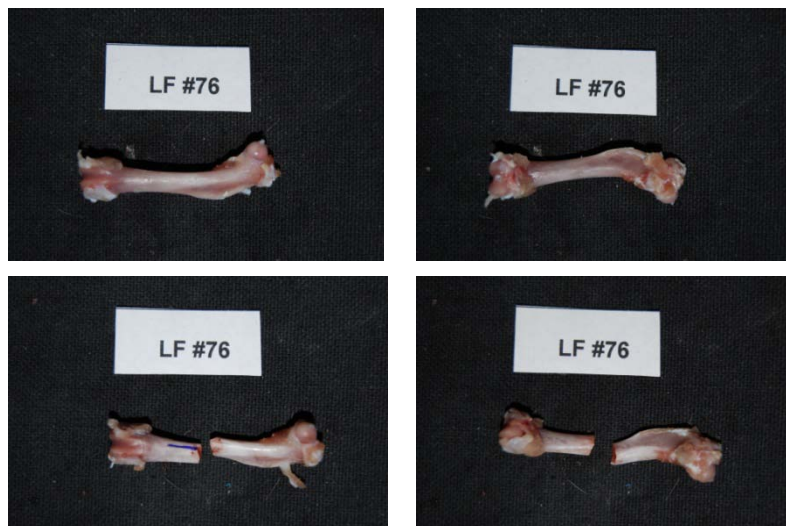
Παρατηρήσεις: Κατά τη φόρτιση του δοκιμίου έπαιξε η γραμμή αναφοράς και αυτό φαίνεται στο γράφημα. Έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.

Κωδικός δοκιμίου: LF76

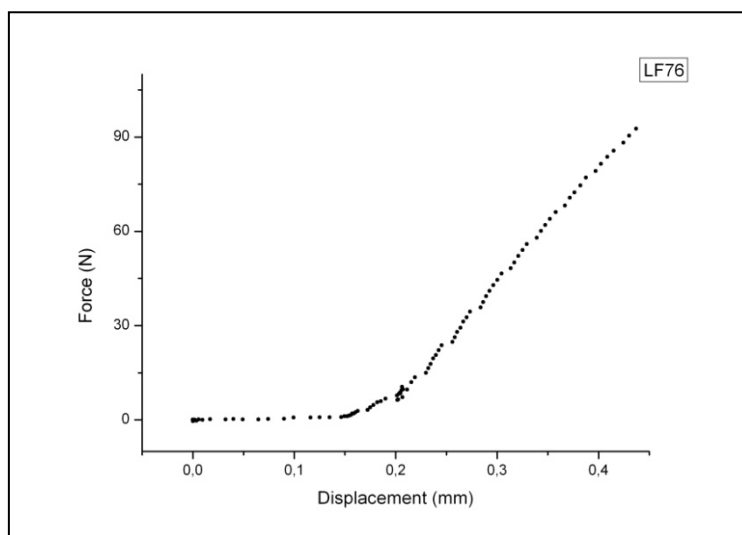
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 21-23/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 16/1/2012



Εικόνα 334: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF76 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

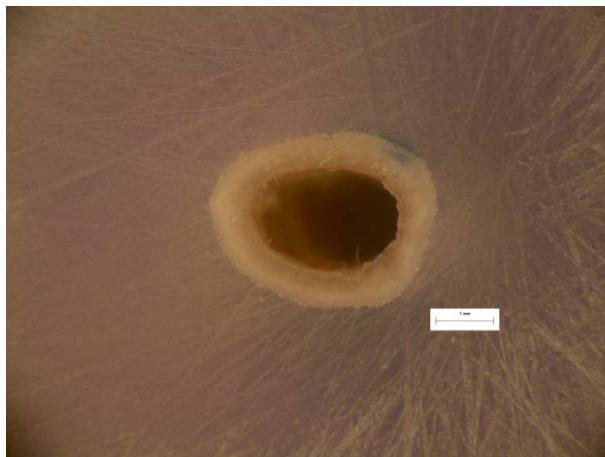


Γράφημα 142: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF76

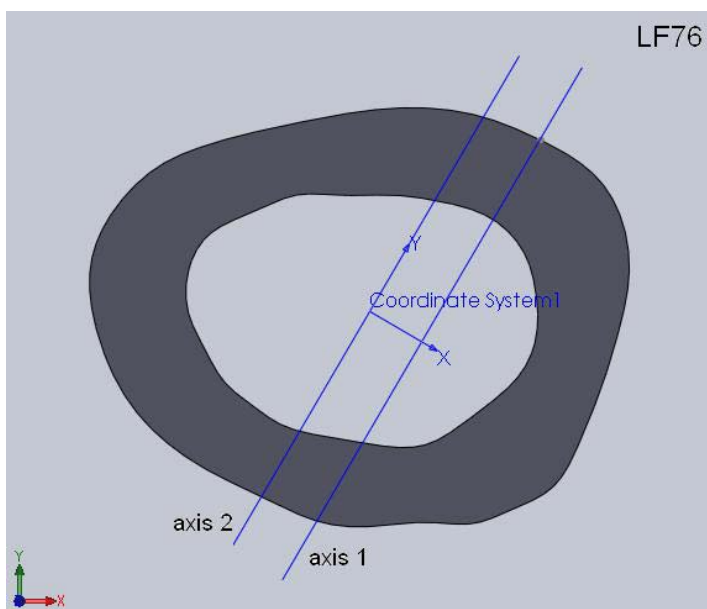
Μέγιστο φορτίο: 96,38N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,44mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 12,2mJ



Εικόνα 335: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF76. Είναι εμφανές το σημείο φόρτισης στα 10N.



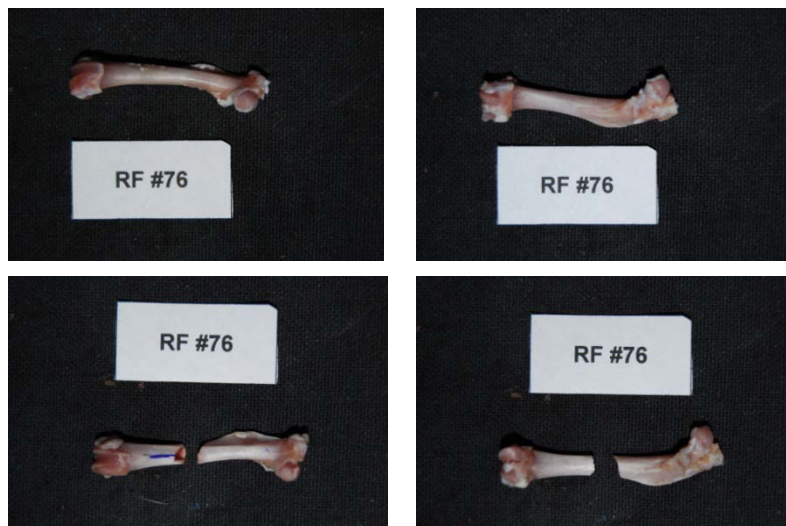
Εικόνα 336: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF76 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF76

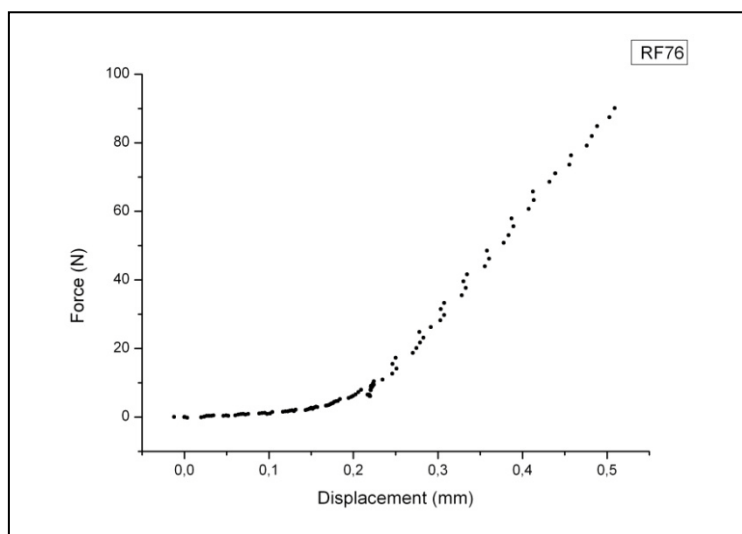
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 21-23/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 16/1/2012



Εικόνα 337: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF76 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

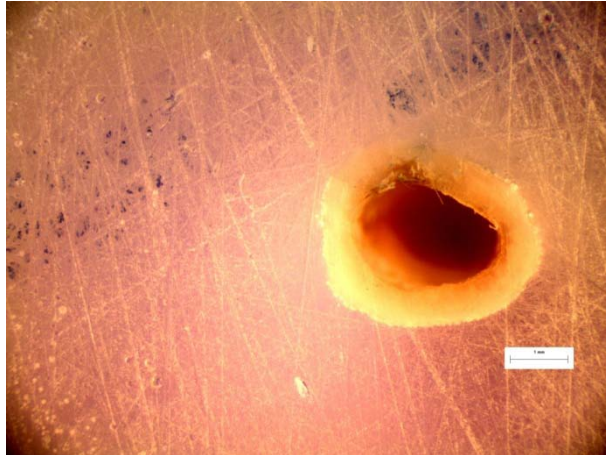


Γράφημα 143: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF76

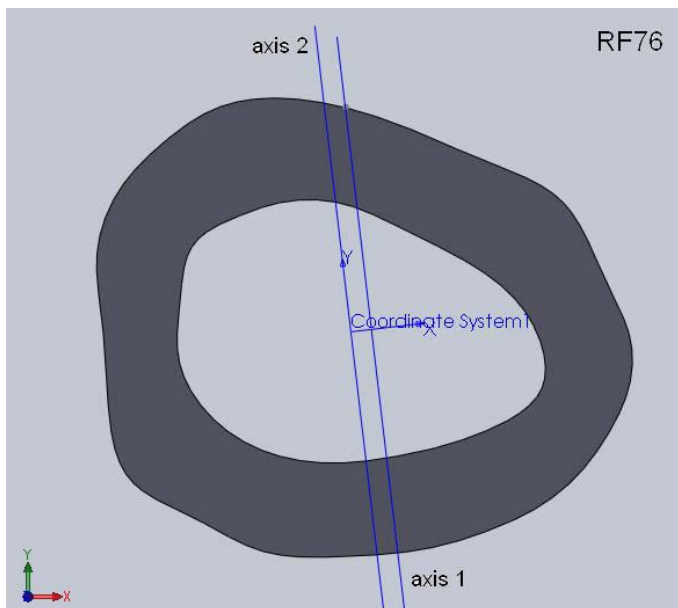
Μέγιστο φορτίο: 93,10N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,51mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 14,5mJ



Εικόνα 338: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF76.



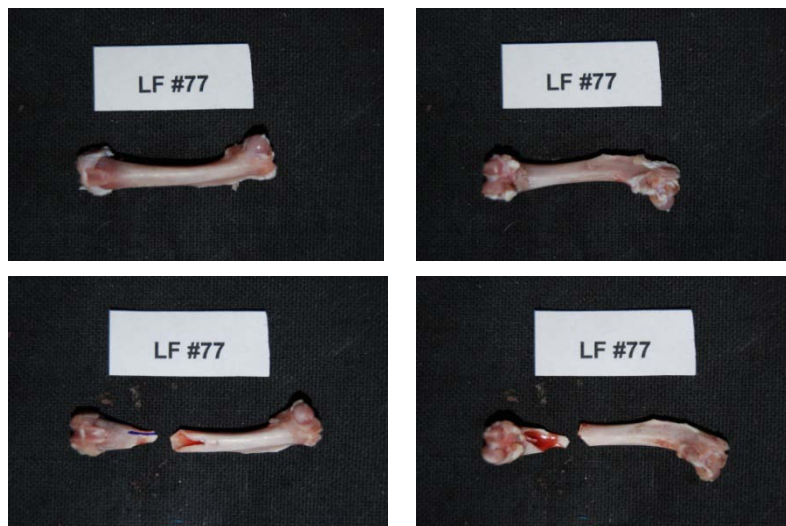
Εικόνα 339: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF76 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF77

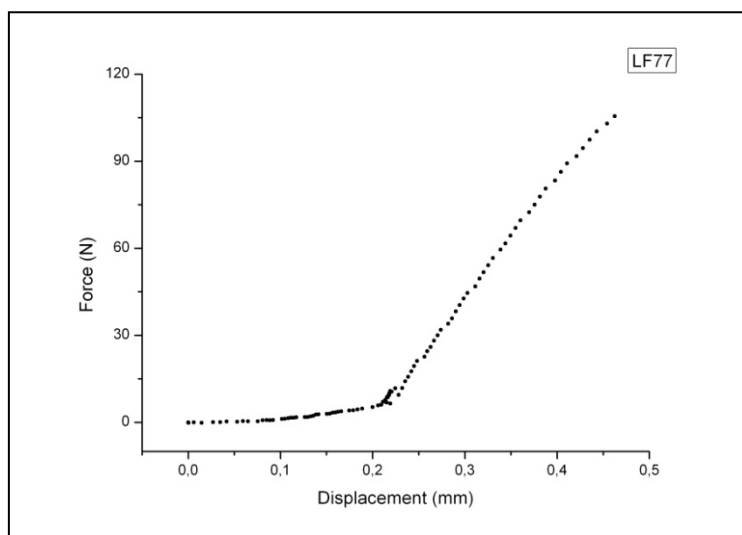
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 21-23/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 16/1/2012



Εικόνα 340: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF77 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 144: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF77

Μέγιστο φορτίο: 109,68N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,46mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 14,9mJ

Παρατηρήσεις: Το δοκίμιο έσπασε πλάγια κοντά στην περιοχή των κονδύλων του γονάτου.

Κωδικός δοκιμίου: RF77

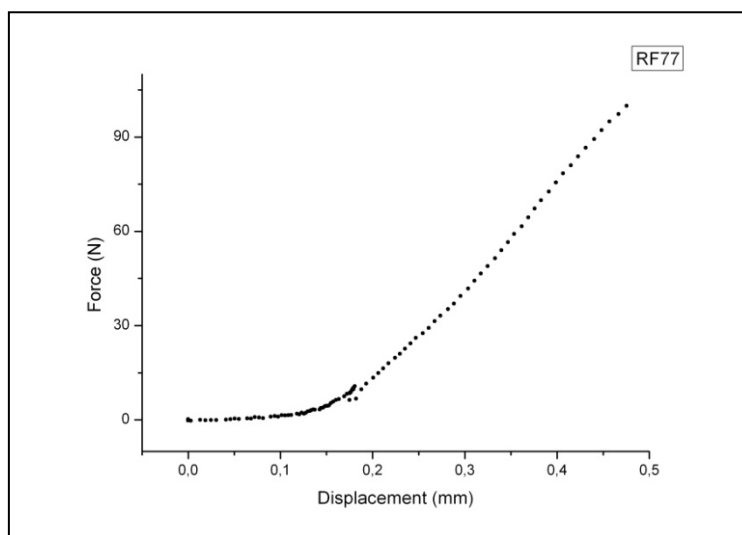
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 21-23/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 16/1/2012



Εικόνα 341: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF77 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 145: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF77

Μέγιστο φορτίο: 103,20N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,48mm

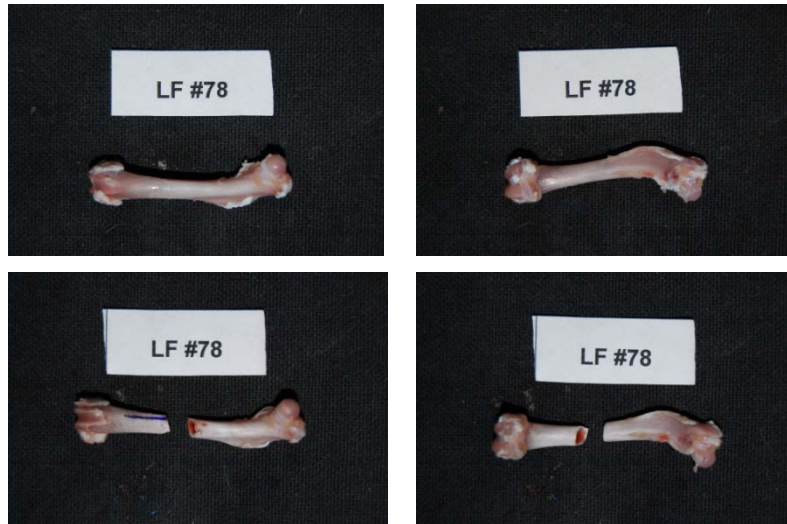
Δαπανηθείσα ενέργεια: 15,7mJ

Κωδικός δοκιμίου: LF78

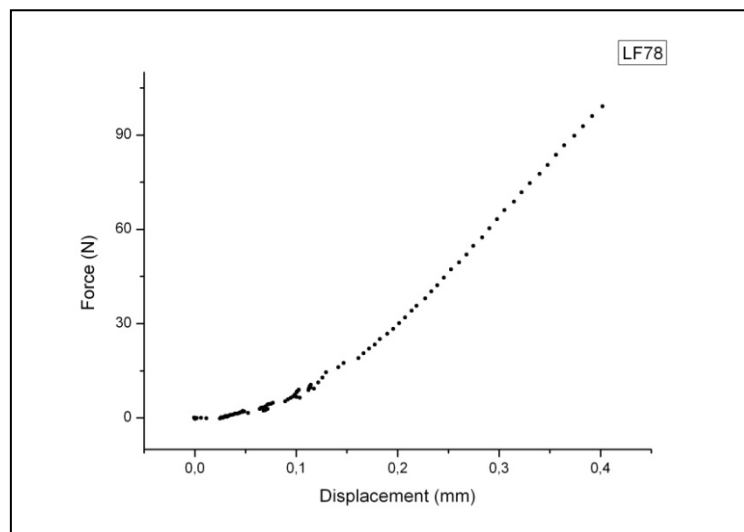
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 21-23/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 16/1/2012



Εικόνα 342: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF78 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 146: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF78

Μέγιστο φορτίο: 104,31N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,40mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 14,9mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF78

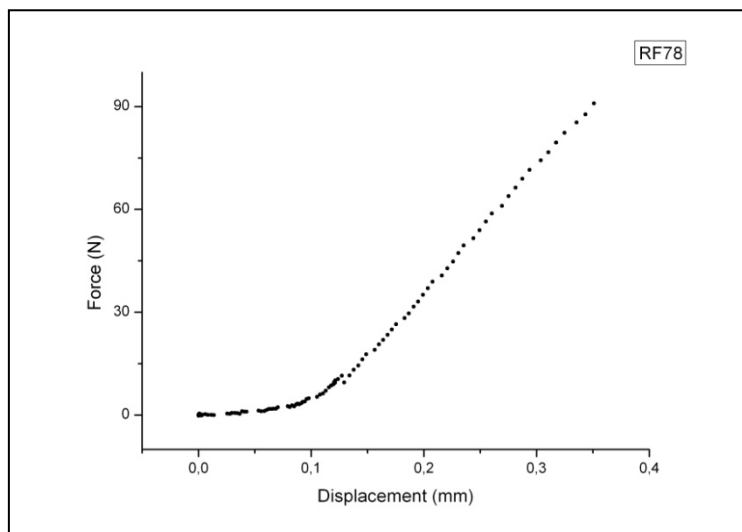
Ομάδα: B high

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 21-23/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 16/1/2012



Εικόνα 343: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF78 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 145: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF78

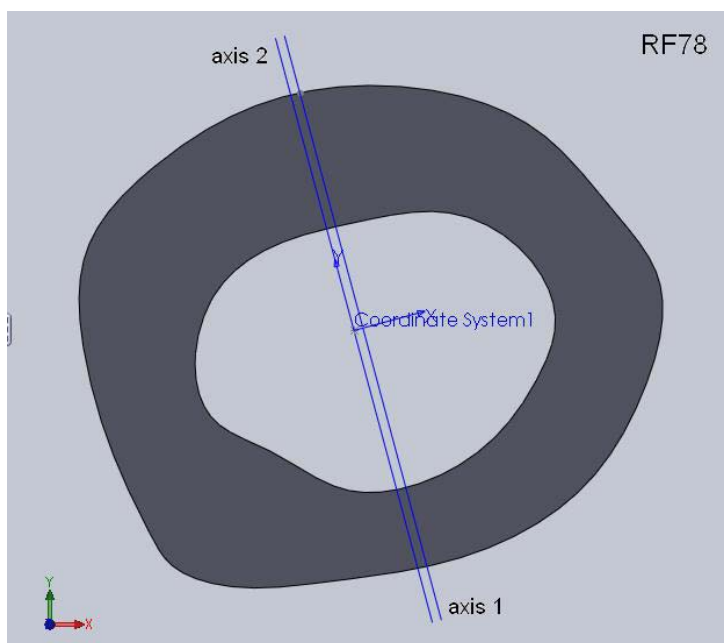
Μέγιστο φορτίο: 93,73N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,35mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 11,6mJ



Εικόνα 344: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF78.



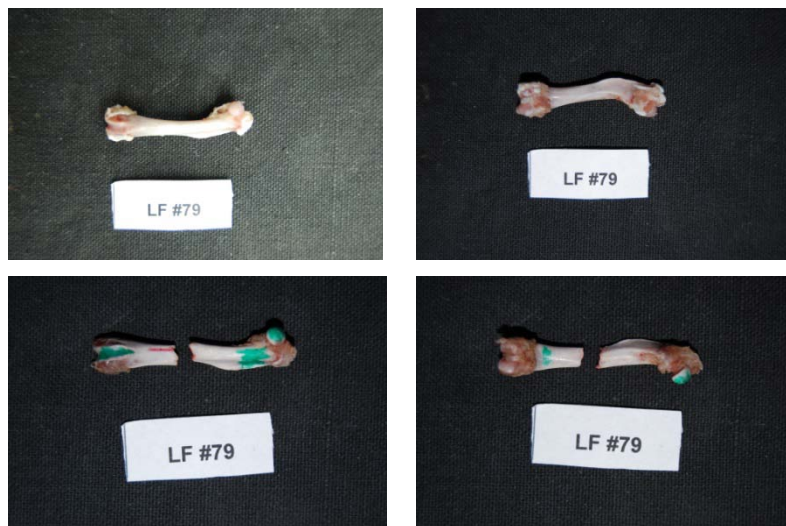
Εικόνα 345: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF78 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF79

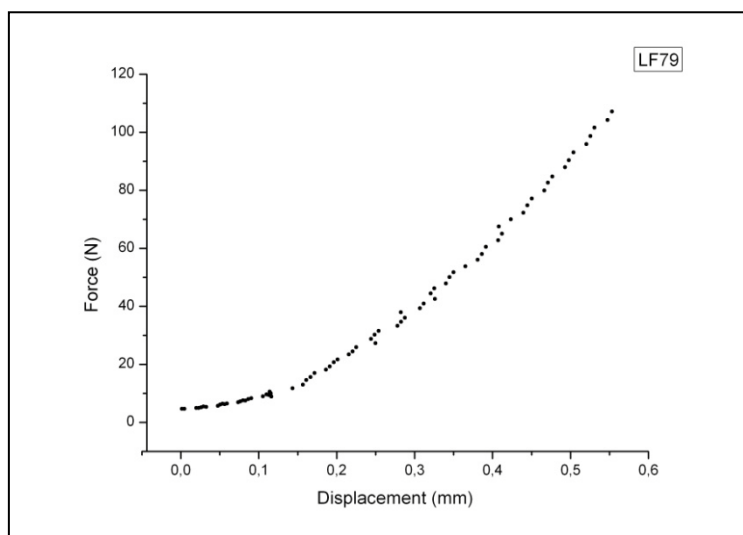
Ομάδα: Control με OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 18/1/2012



Εικόνα 346: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF79 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

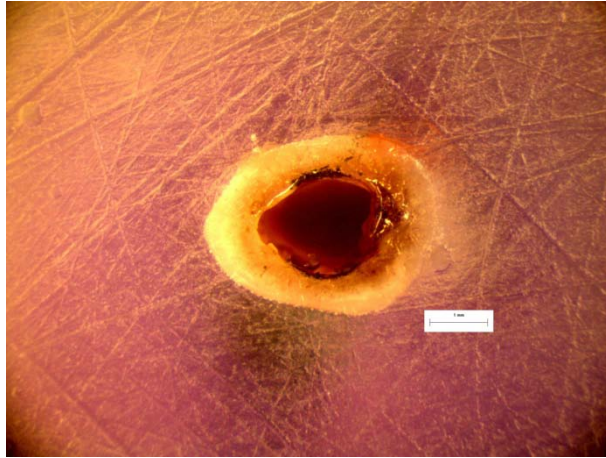


Γράφημα 146: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF79

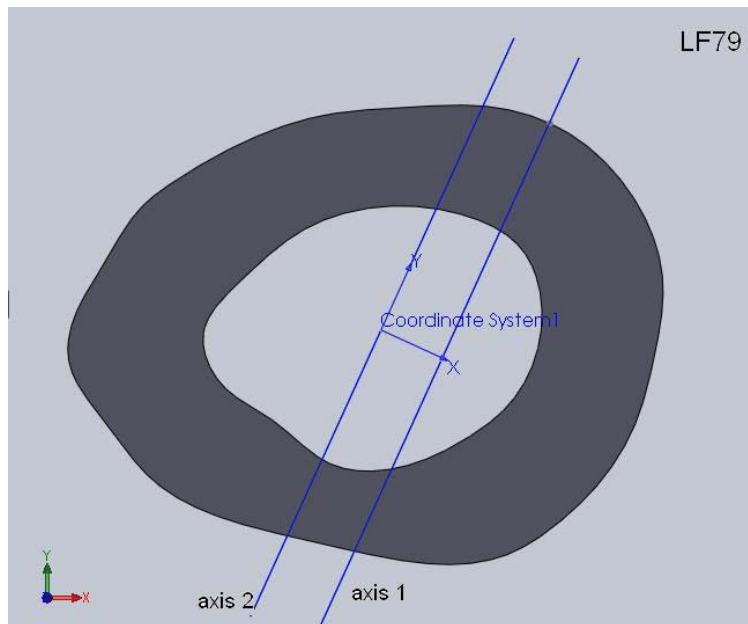
Μέγιστο φορτίο: 109,74N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,55mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 22,9mJ



Εικόνα 347: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF79.



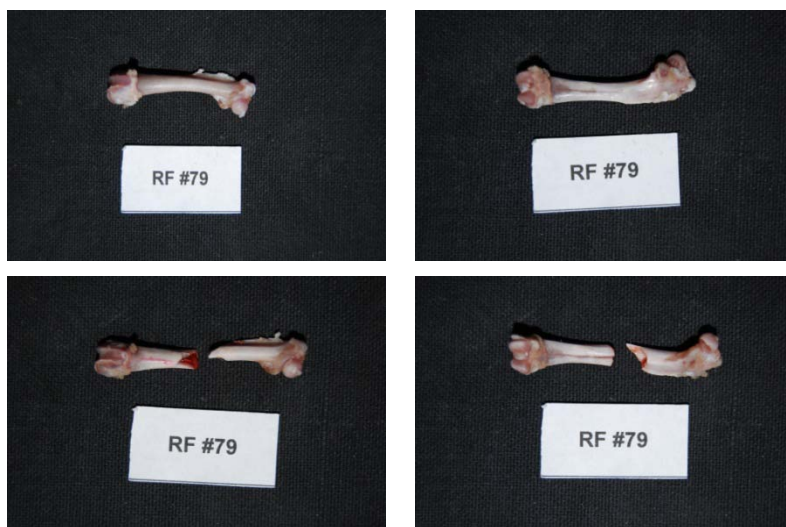
Εικόνα 348: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF79 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF79

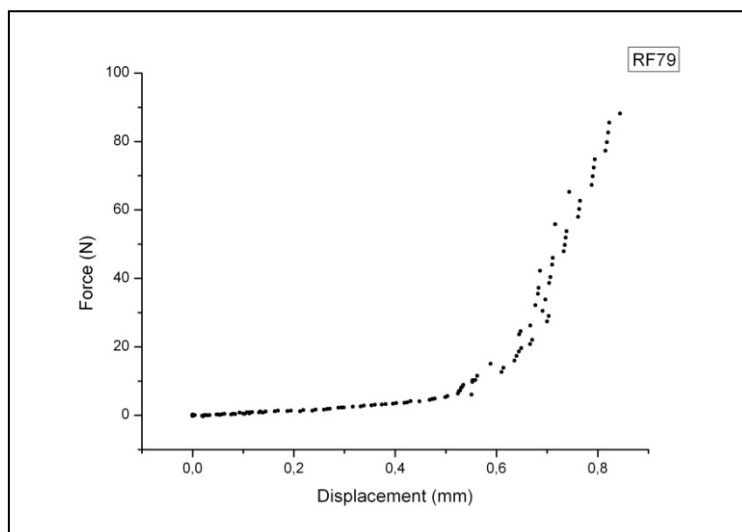
Ομάδα: Control με OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 18/1/2012



Εικόνα 349: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF79 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 147: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF79

Μέγιστο φορτίο: 91,50N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,84mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 13,6mJ

Παρατηρήσεις: Κατά τη φόρτιση του δοκιμίου «έπαιξε» η μετρητική γραμμή. Έσπασε πλάγια.

Κωδικός δοκιμίου: LF80

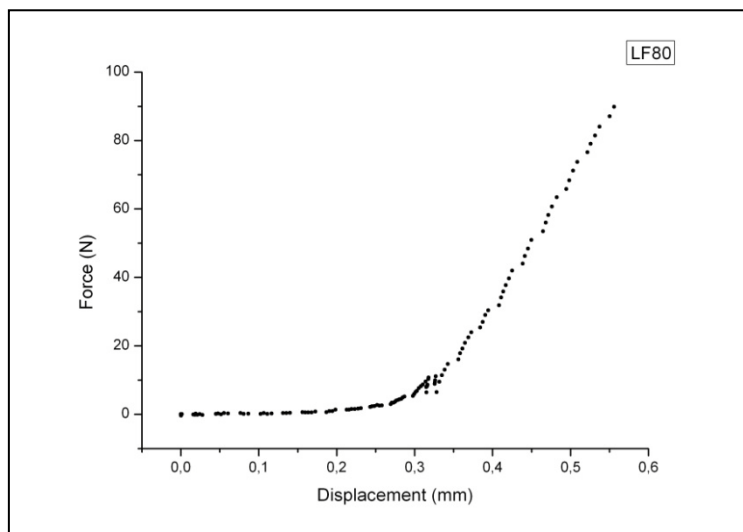
Ομάδα: Control με OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 18/1/2012



Εικόνα 350: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF80 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 148: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF80

Μέγιστο φορτίο: 94,21N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,56mm

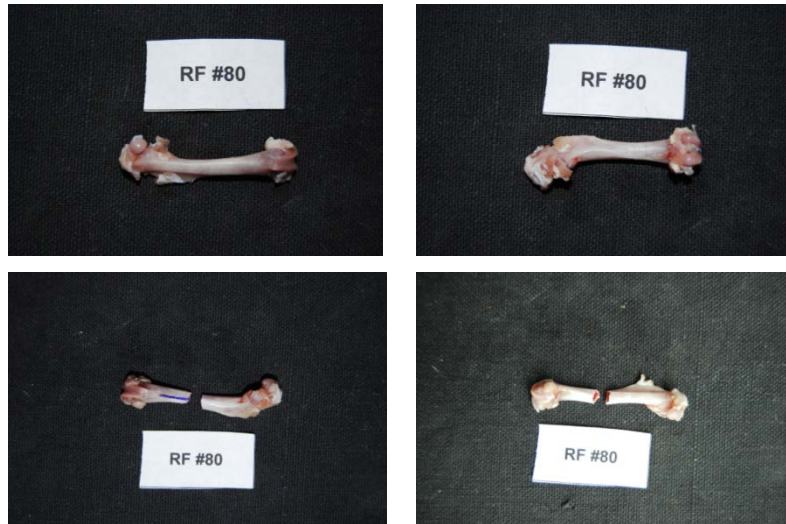
Δαπανηθείσα ενέργεια: 11,5mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF80

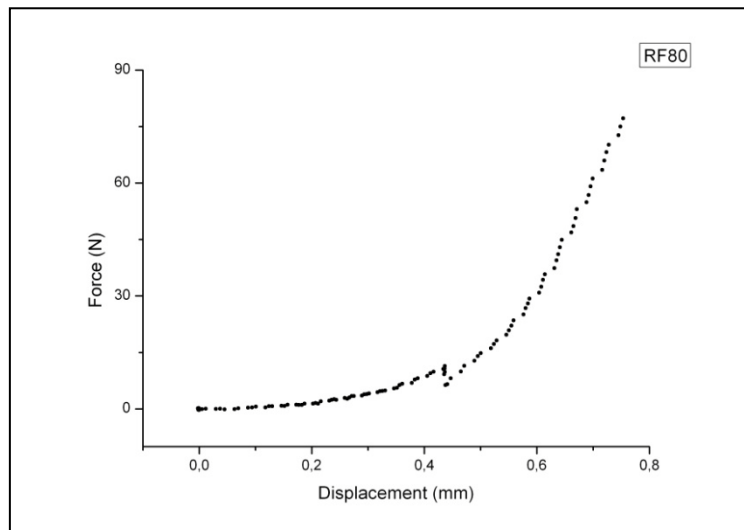
Ομάδα: Control με OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 18/1/2012



Εικόνα 351: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF80 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

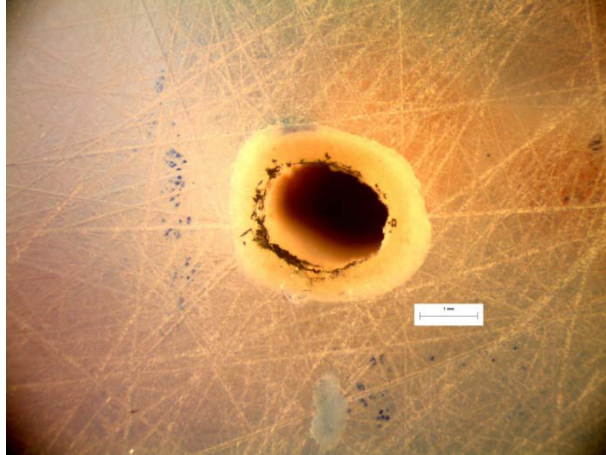


Γράφημα 149: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF80

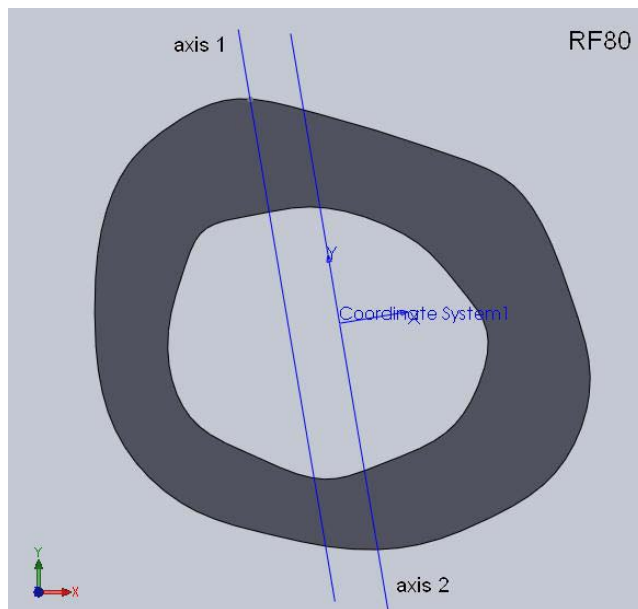
Μέγιστο φορτίο: 86,71N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,75mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 12,3mJ



Εικόνα 352: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF80. Στο επάνω μέρος της διατομής διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



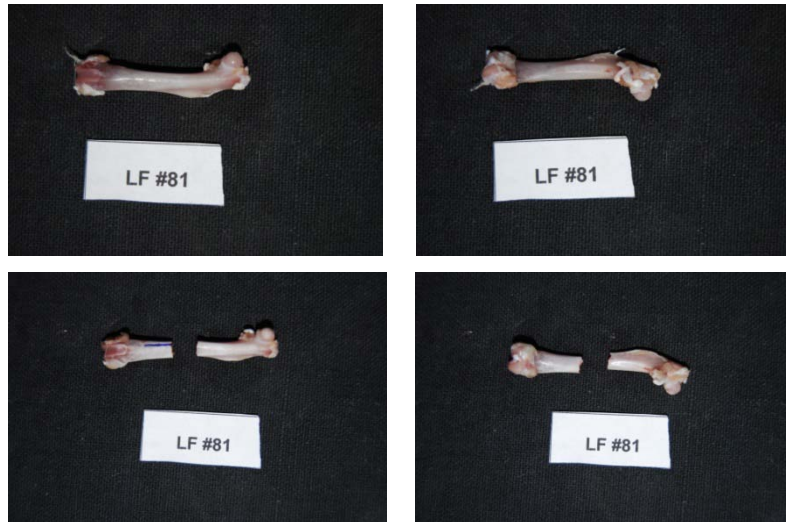
Εικόνα 353: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF80 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF81

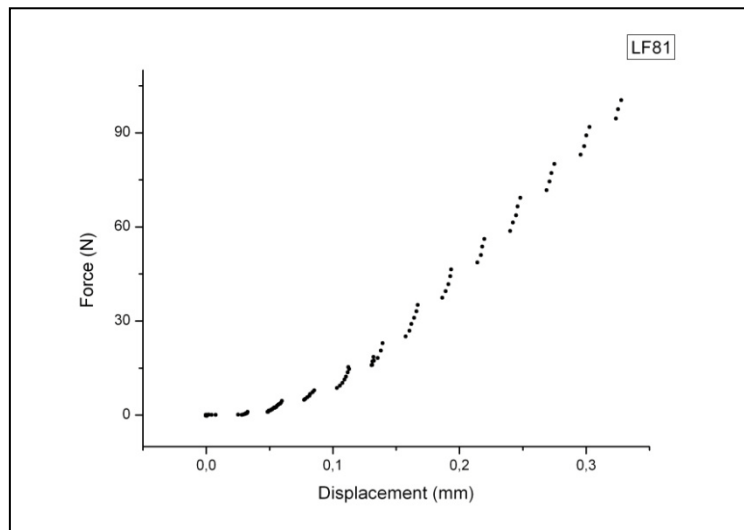
Ομάδα: Control με OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 18/1/2012



Εικόνα 354: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF81 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

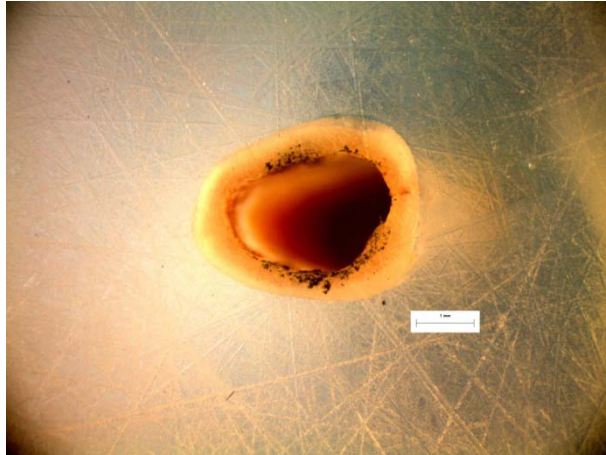


Γράφημα 150: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF81

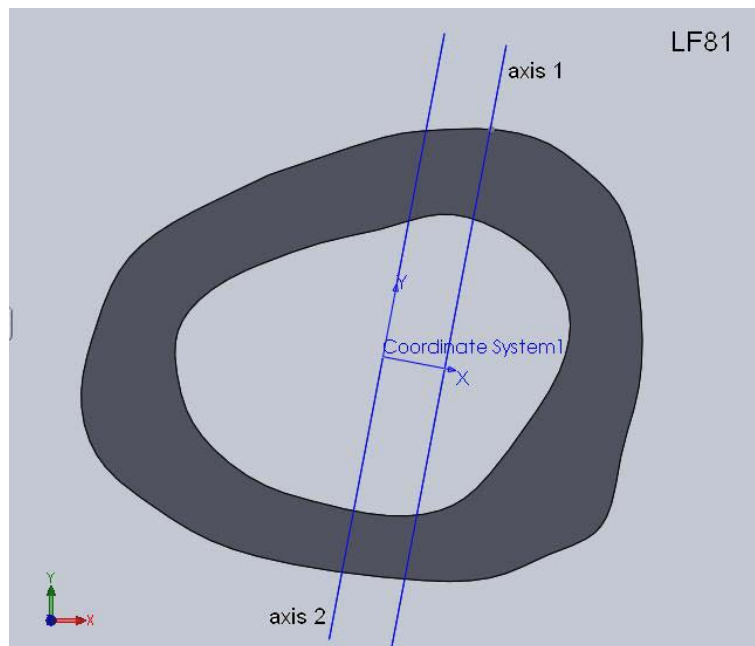
Μέγιστο φορτίο: 103,52N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,33mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 12,1mJ



Εικόνα 355: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF81.



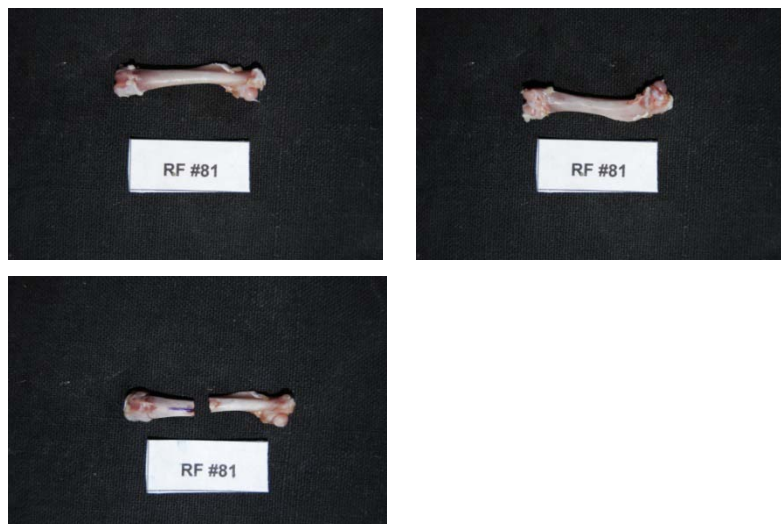
Εικόνα 356: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF81 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF81

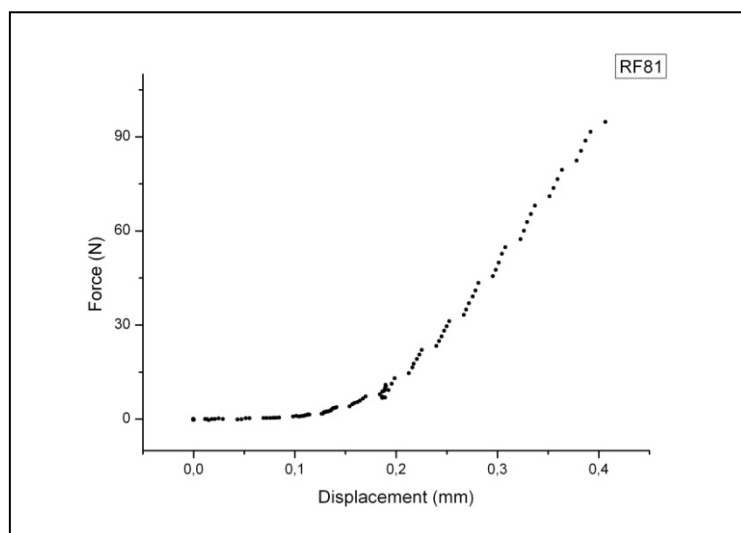
Ομάδα: Control με OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 18/1/2012



Εικόνα 357: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF81 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

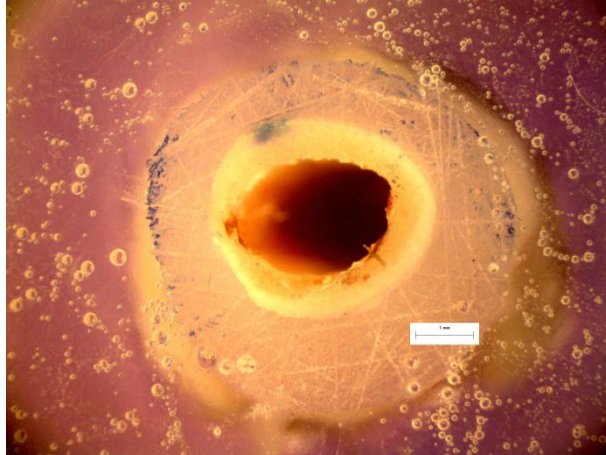


Γράφημα 151: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF81

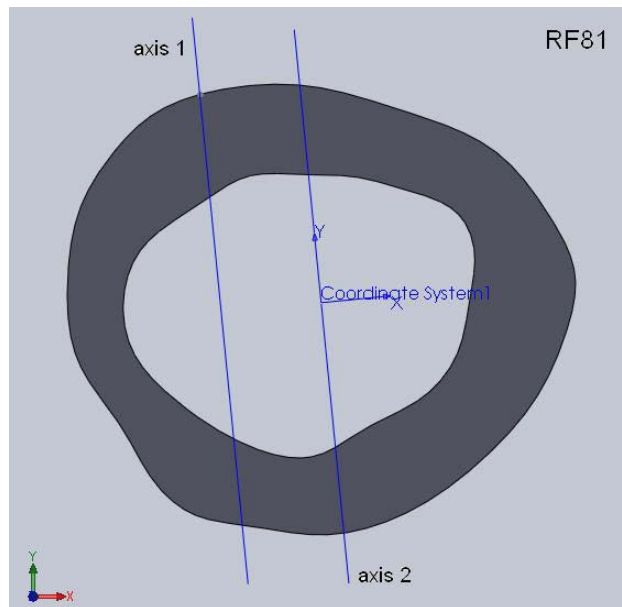
Μέγιστο φορτίο: 99,96N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,41mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 11,2mJ



Εικόνα 358: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF81. Στο επάνω μέρος την διατομή διακρίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



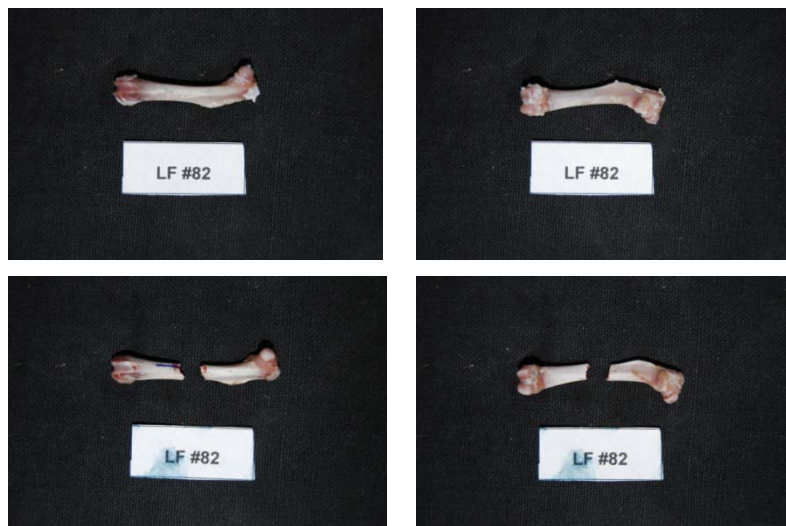
Εικόνα 359: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF81 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF82

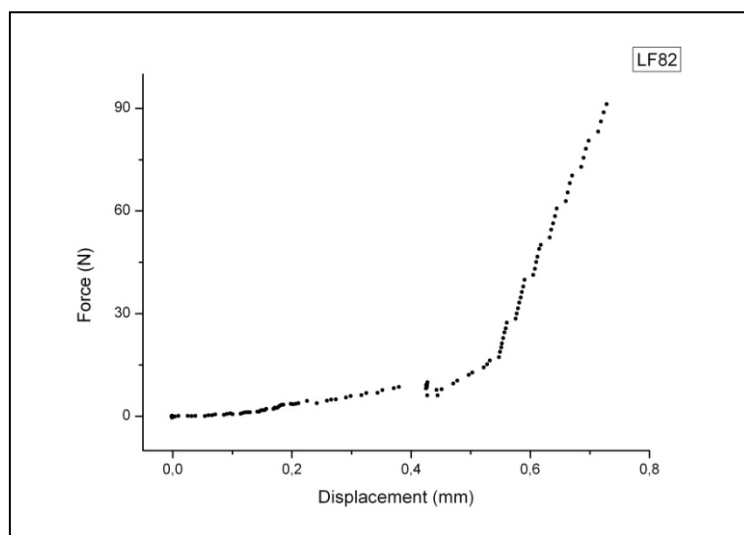
Ομάδα: Control με OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 18/1/2012



Εικόνα 360: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF82 πριν και μετά το πείραμα κάμψης

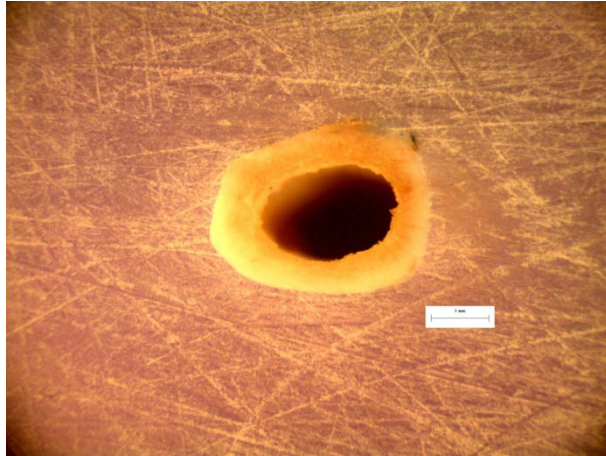


Γράφημα 152: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF82

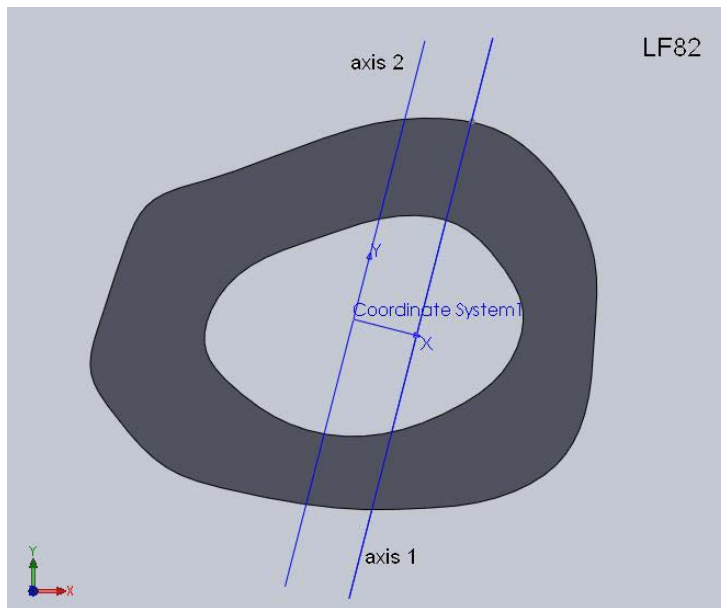
Μέγιστο φορτίο: 95,89N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,73mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 13,1mJ



Εικόνα 361: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου LF82.



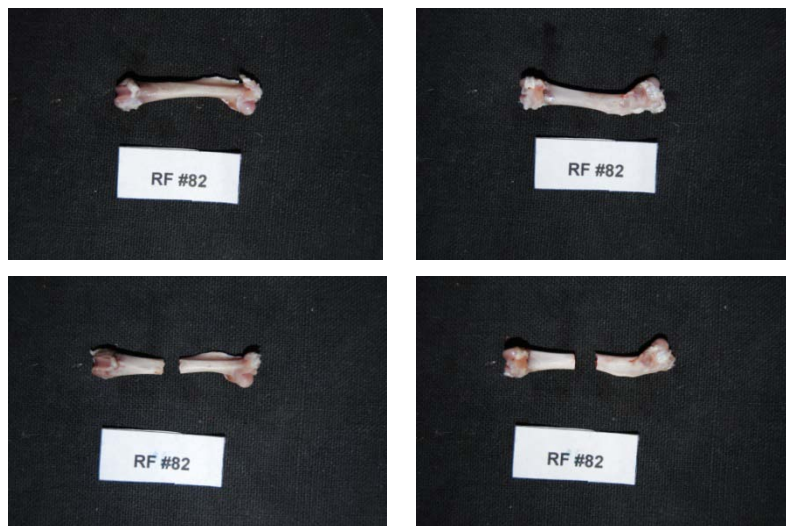
Εικόνα 362: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου LF82 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: RF82

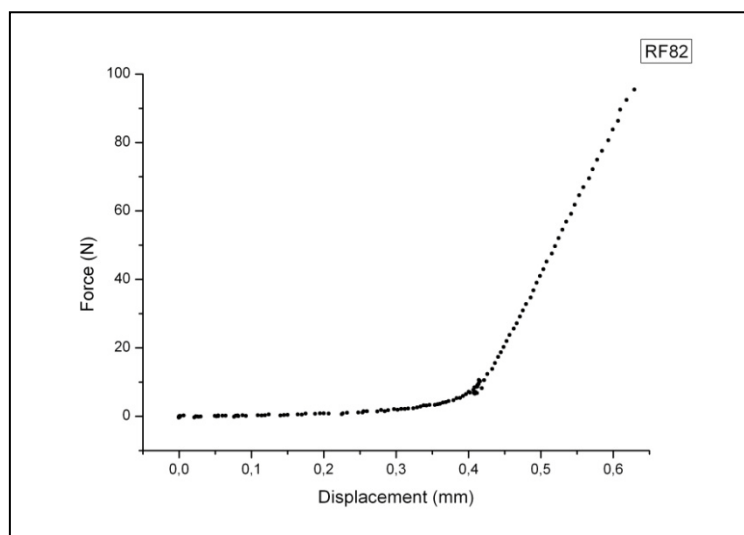
Ομάδα: Control με OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 18/1/2012



Εικόνα 363: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF82 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 153: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF82

Μέγιστο φορτίο: 99,05N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,63mm

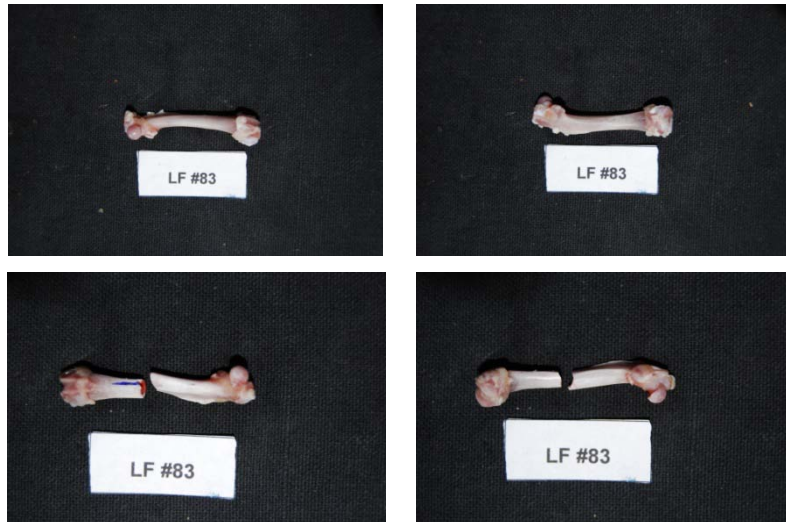
Δαπανηθείσα ενέργεια: 11,6mJ

Κωδικός δοκιμίου: LF83

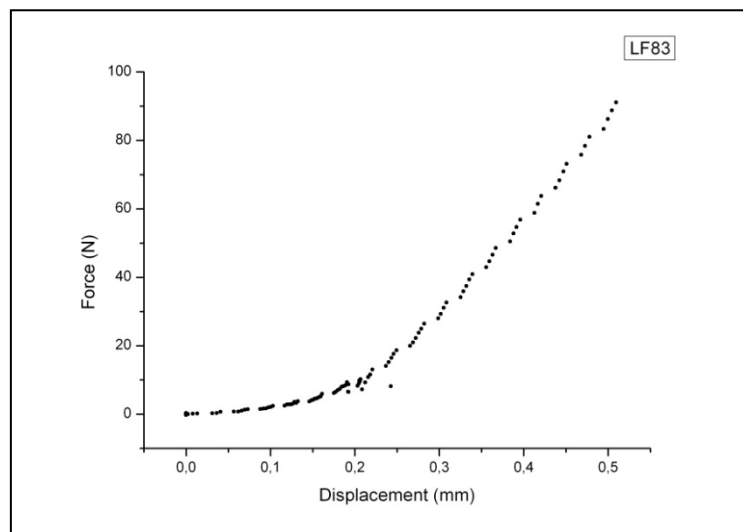
Ομάδα: Control με OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 20/1/2012



Εικόνα 364: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF83 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 154: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF83

Μέγιστο φορτίο: 93,85N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,51mm

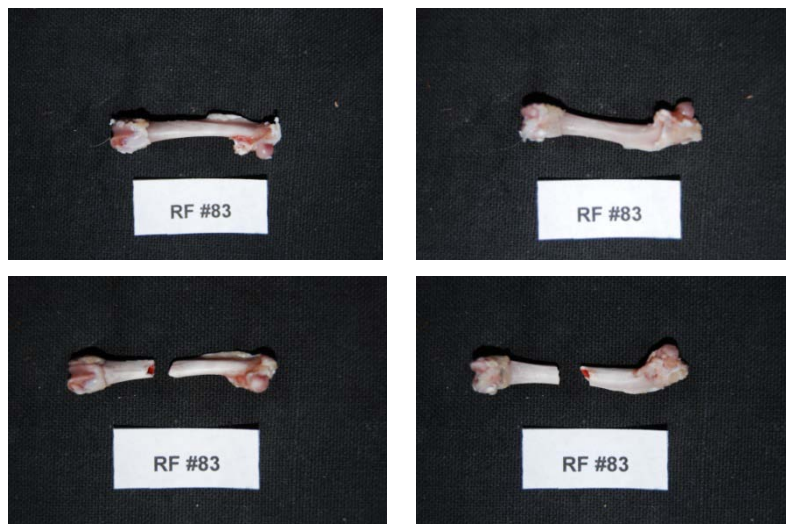
Δαπανηθείσα ενέργεια: 14,7mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF83

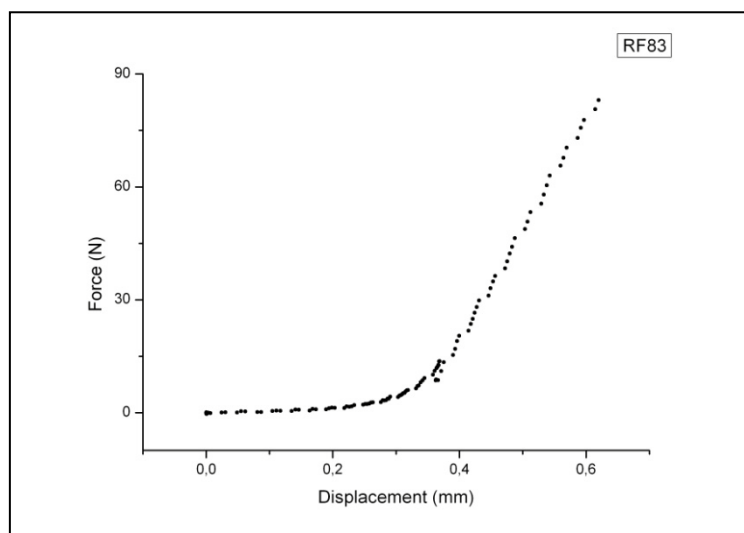
Ομάδα: Control με OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 20/1/2012



Εικόνα 365: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF83 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 155: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF83

Μέγιστο φορτίο: 85,80N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,62mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 12,62mJ

Κωδικός δοκιμίου: LF84

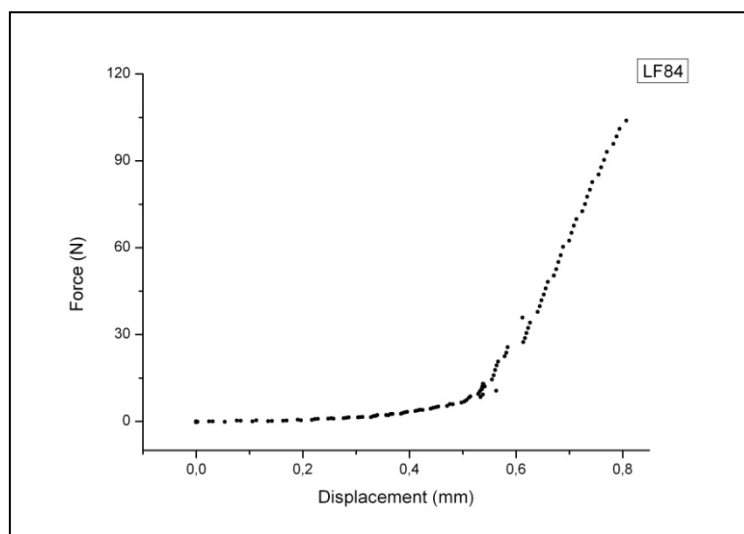
Ομάδα: Control με OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 20/1/2012



Εικόνα 366: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF84 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 156: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF84

Μέγιστο φορτίο: 106,96N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,81mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 15,9mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF84

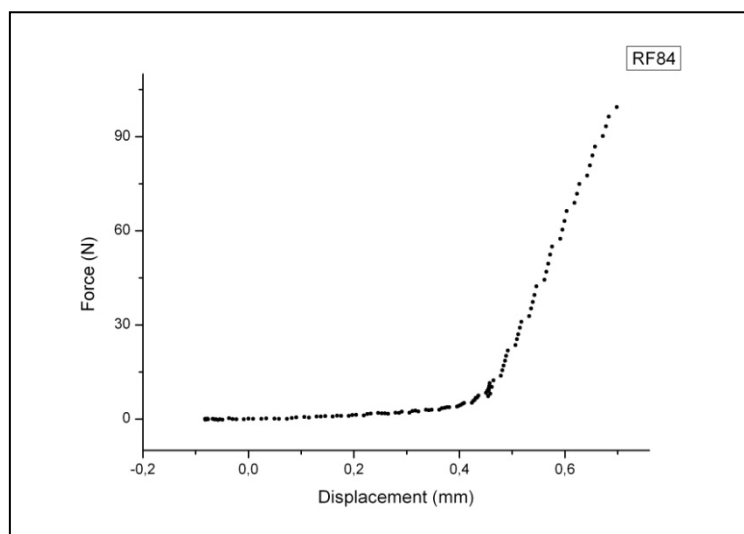
Ομάδα: Control με OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 20/1/2012



Εικόνα 367: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF84 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 157: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF84

Μέγιστο φορτίο: 104,43N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,70mm

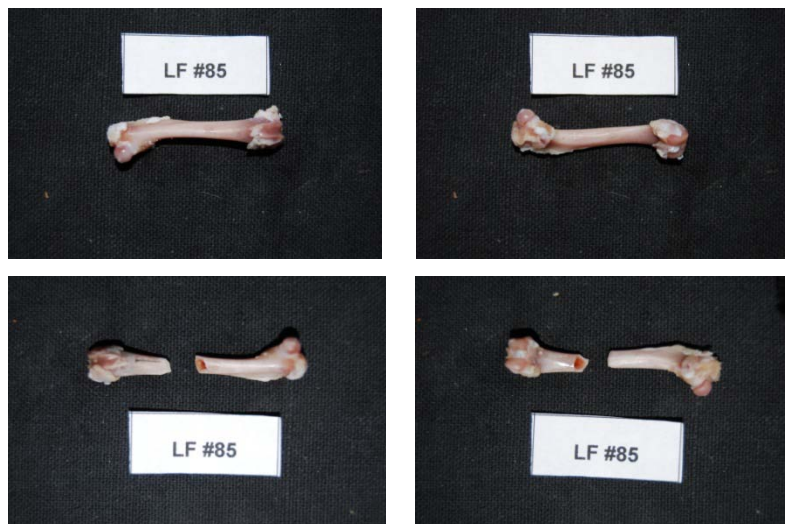
Δαπανηθείσα ενέργεια: 13,9mJ

Κωδικός δοκιμίου: LF85

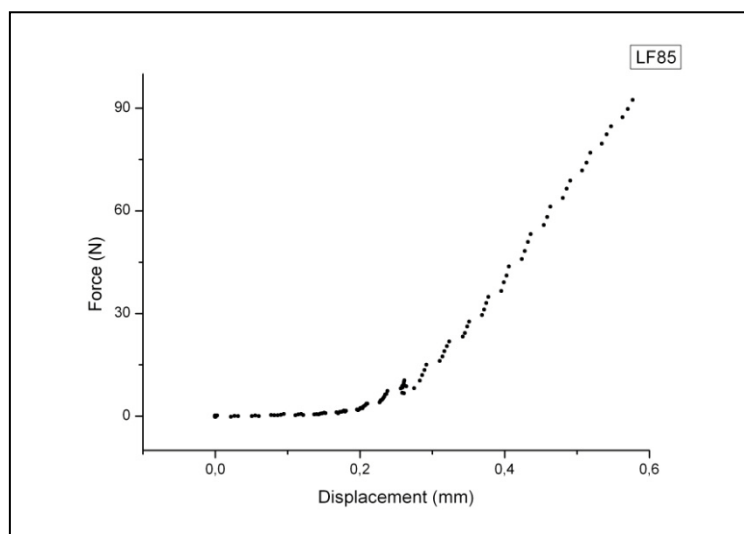
Ομάδα: Control με OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 20/1/2012



Εικόνα 368: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF85 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 158: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF85

Μέγιστο φορτίο: 95,49N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,58mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 15,4mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF85

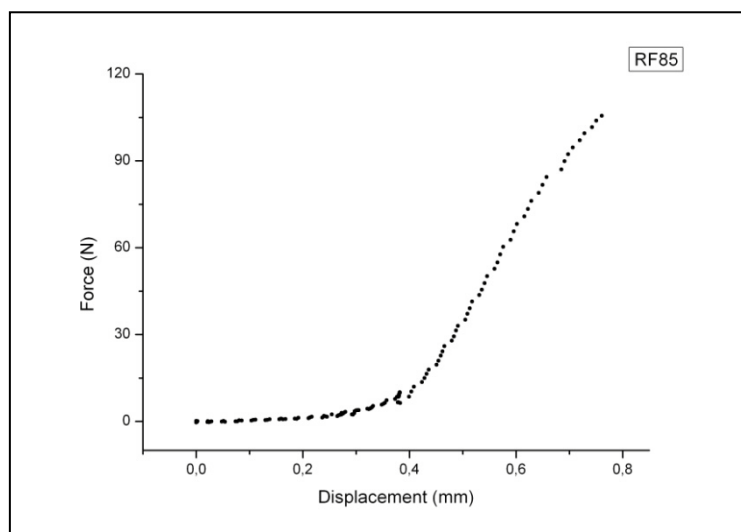
Ομάδα: Control με OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 20/1/2012



Εικόνα 369: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF85 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 159: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF85

Μέγιστο φορτίο: 107,06N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,76mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 22,2mJ

Κωδικός δοκιμίου: LF86

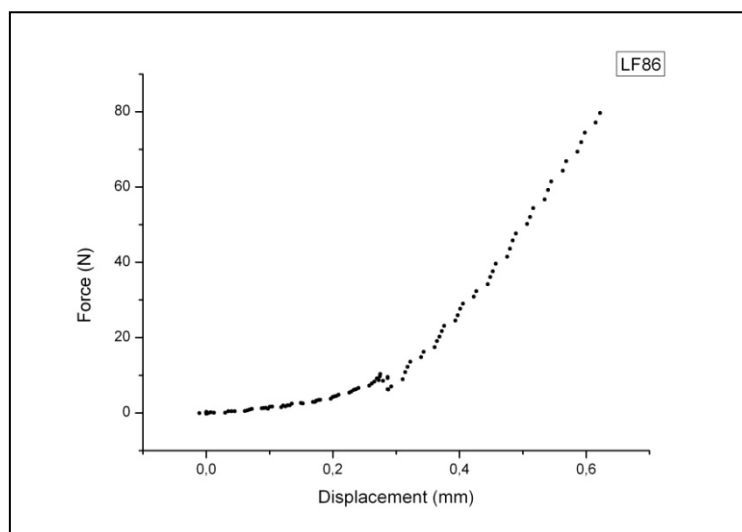
Ομάδα: Control με OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 20/1/2012



Εικόνα 370: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF86 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 160: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF86

Μέγιστο φορτίο: 83,05N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,62mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 14,3mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF86

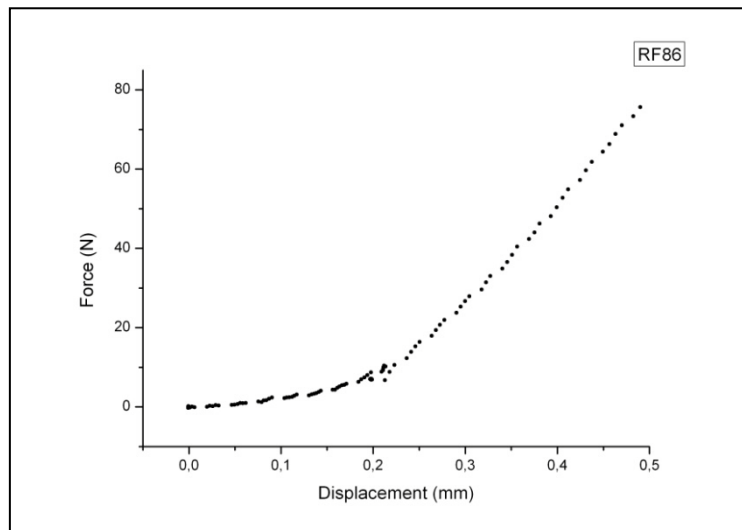
Ομάδα: Control με OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 20/1/2012



Εικόνα 371: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF86 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 161: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF86

Μέγιστο φορτίο: 79,67N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,49mm

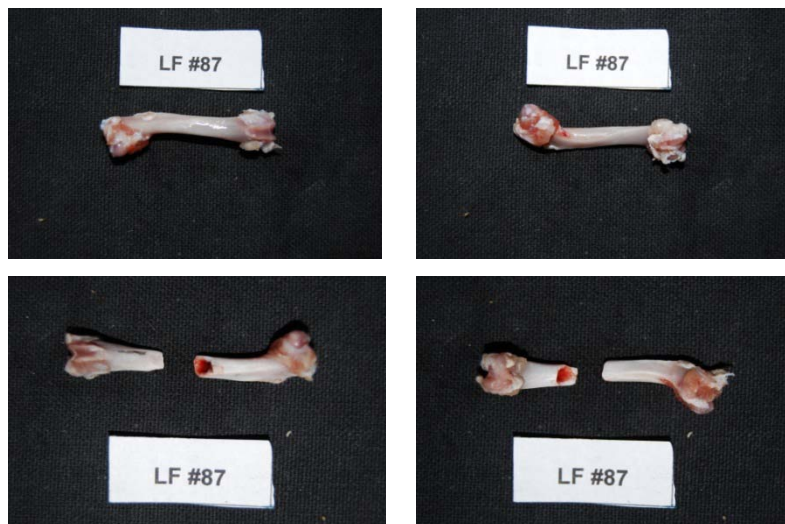
Δαπανηθείσα ενέργεια: 11,6mJ

Κωδικός δοκιμίου: LF87

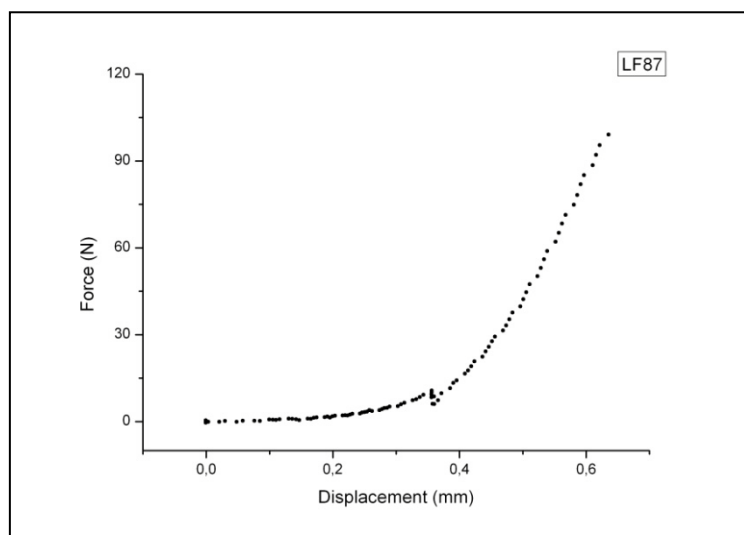
Ομάδα: Control χωρίς OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 20/1/2012



Εικόνα 372: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF87 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 162: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF87

Μέγιστο φορτίο: 105,56N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,64mm

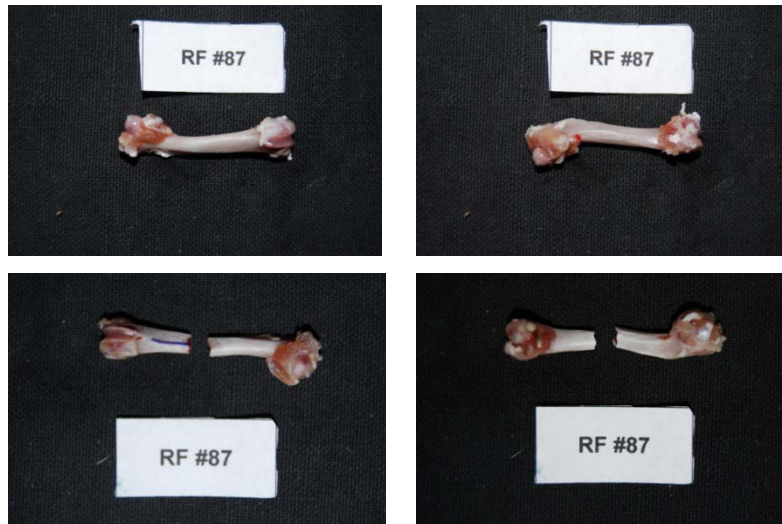
Δαπανηθείσα ενέργεια: 13,7mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF87

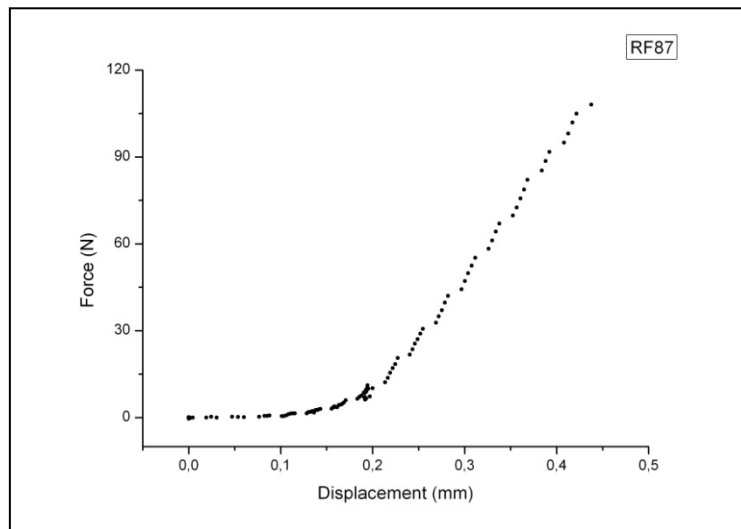
Ομάδα: Control χωρίς OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 20/1/2012



Εικόνα 373: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF87 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 163: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF87

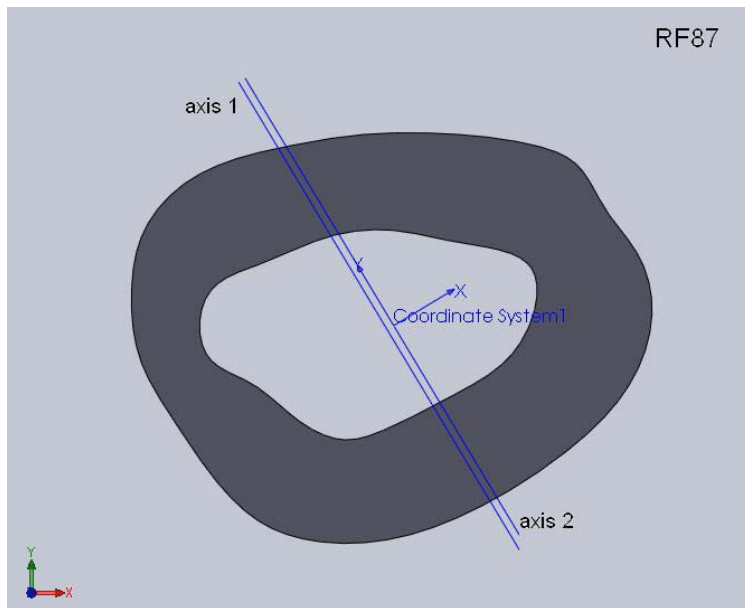
Μέγιστο φορτίο: 112,93N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,44mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 14,1mJ



Εικόνα 374: Φωτογραφία από στερεοσκόπιο της διατομής στο σημείο αστοχίας δοκιμίου RF87. Στο επάνω μέρος φαίνεται το σημείο φόρτισης στα 10N.



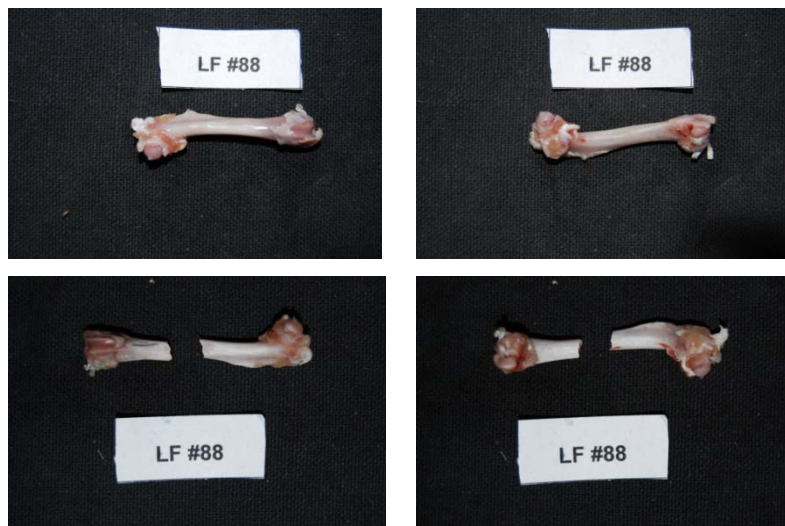
Εικόνα 375: Μοντέλο διατομής (μετά από επεξεργασία με το πρόγραμμα Solidworks) στο σημείο αστοχίας του δοκιμίου RF87 με βάση τη φωτογραφία από το στερεοσκόπιο. Ο άξονας 1 είναι ο κατά προσέγγιση άξονας φόρτισης και ο άξονας 2 είναι η παράλληλη μετατόπιση του άξονα 1 ώστε να περνάει από το γεωμετρικό κέντρο της διατομής.

Κωδικός δοκιμίου: LF88

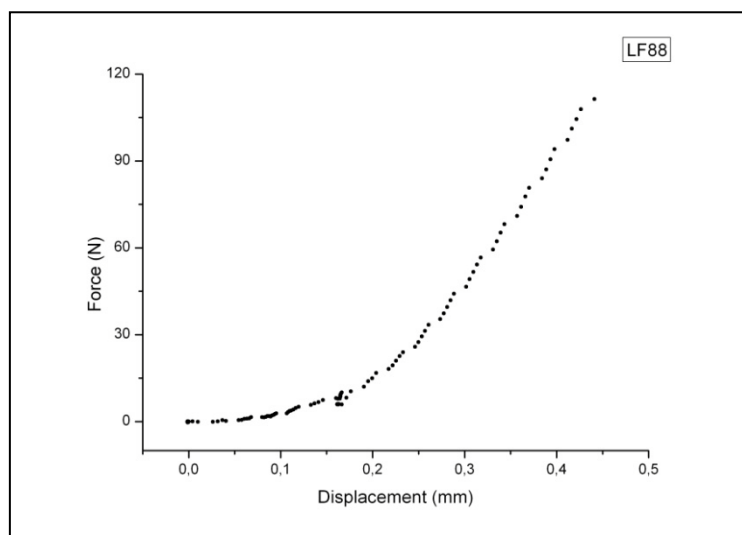
Ομάδα: Control χωρίς OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 20/1/2012



Εικόνα 376: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF88 πριν και μετά το πείραμα κάμψης



Γράφημα 164: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF88

Μέγιστο φορτίο: 115,71N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,44mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 15,0mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF88

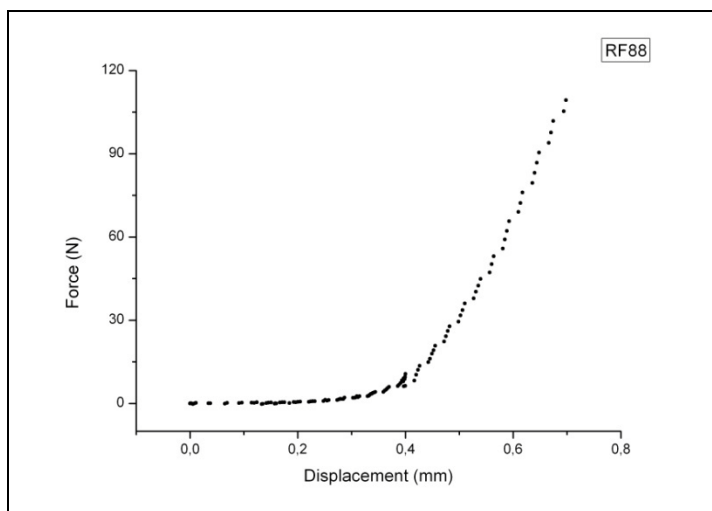
Ομάδα: Control χωρίς OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 20/1/2012



Εικόνα 377: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF88 πριν και μετά το πείραμα κάμψης.



Γράφημα 165: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF88

Μέγιστο φορτίο: 114,95N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,70mm

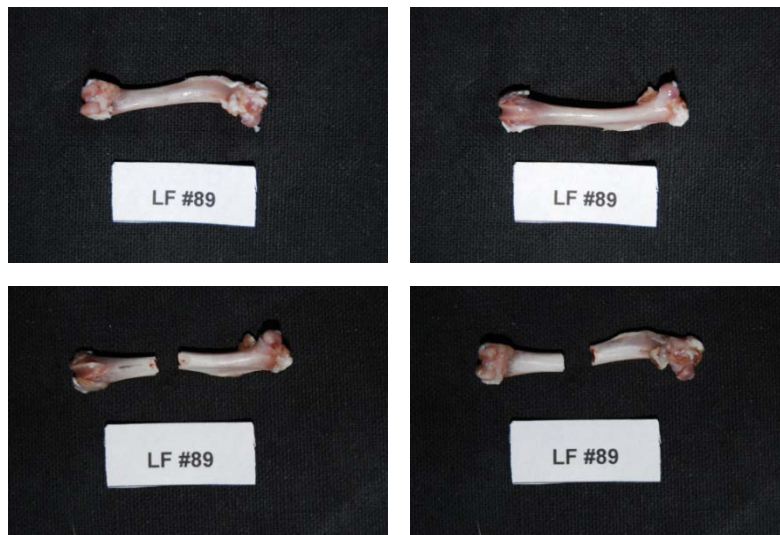
Δαπανηθείσα ενέργεια: 15,8mJ

Κωδικός δοκιμίου: LF89

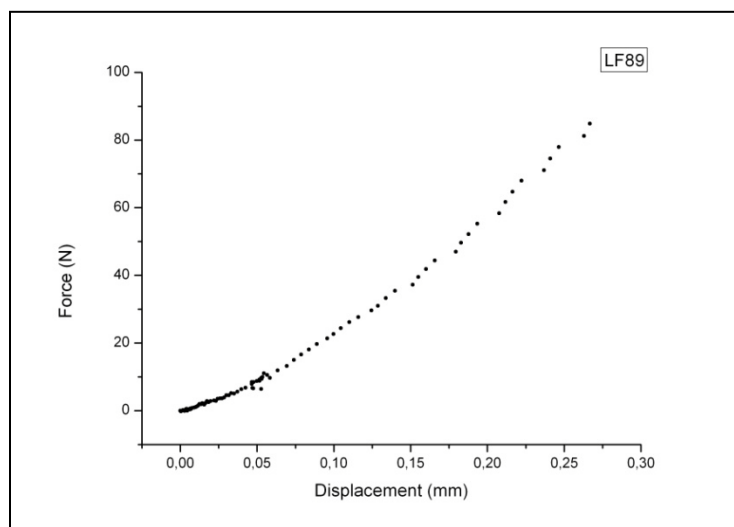
Ομάδα: Control χωρίς OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 20/1/2012



Εικόνα 378: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF89 πριν και μετά το πείραμα κάμψης.



Γράφημα 166: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF89

Μέγιστο φορτίο: 89,47N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,27mm

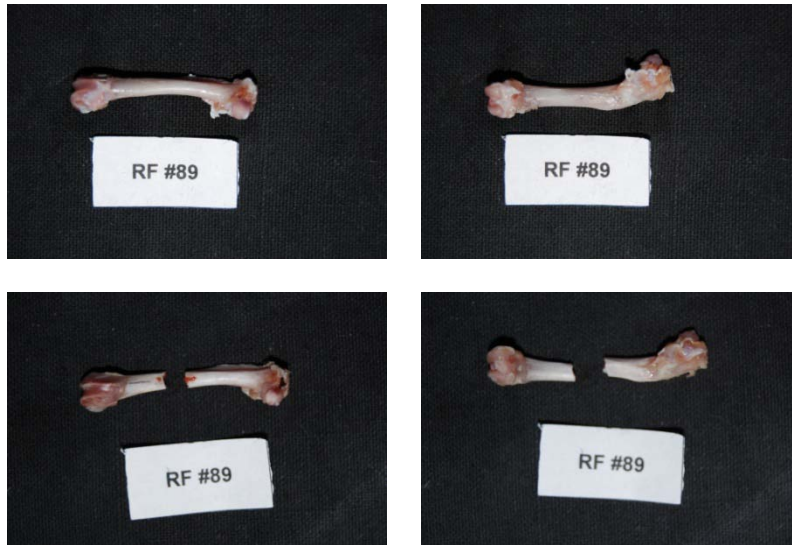
Δαπανηθείσα ενέργεια: 9,5mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF89

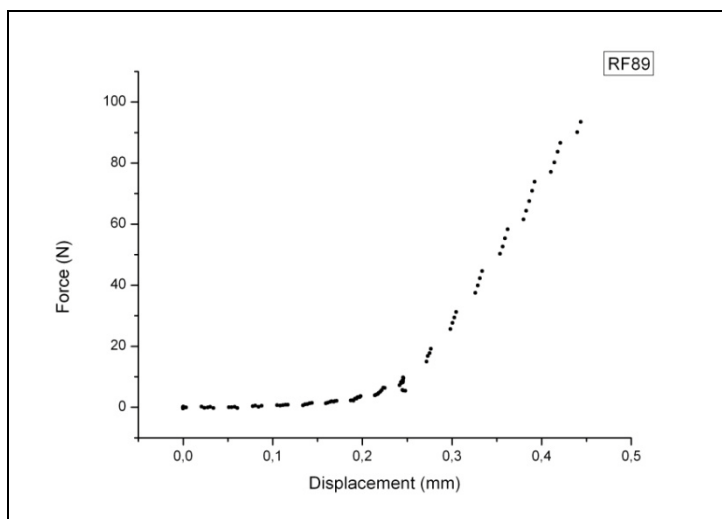
Ομάδα: Control χωρίς OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 20/1/2012



Εικόνα 379: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF89 πριν και μετά το πείραμα κάμψης.



Γράφημα 167: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF89

Μέγιστο φορτίο: 98,29N

Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,44mm

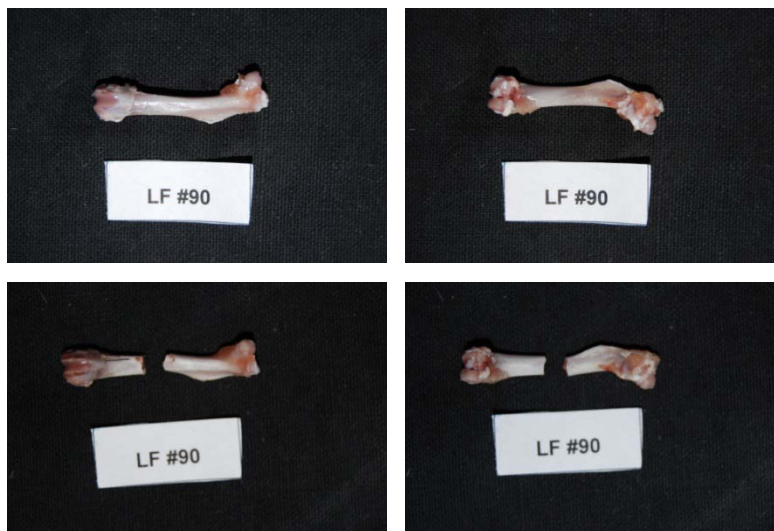
Δαπανηθείσα ενέργεια: 10,0mJ

Κωδικός δοκιμίου: LF90

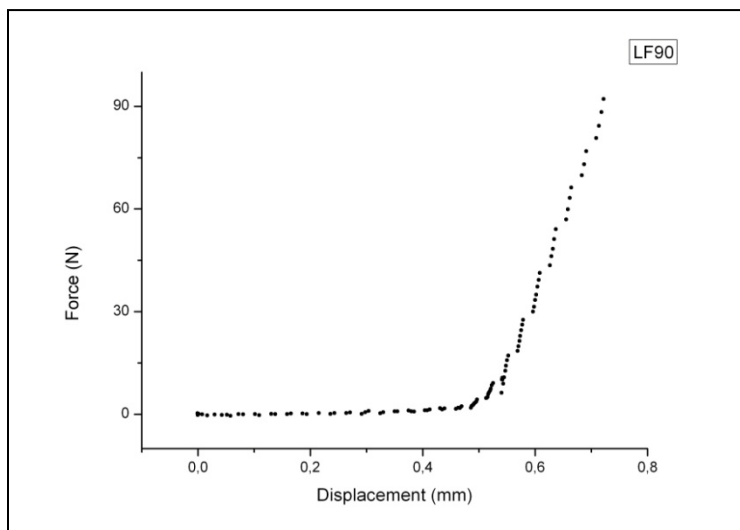
Ομάδα: Control χωρίς OVX

Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010

Ημερομηνία ευθανασίας: 20/1/2012



Εικόνα 380: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου LF90 πριν και μετά το πείραμα κάμψης.



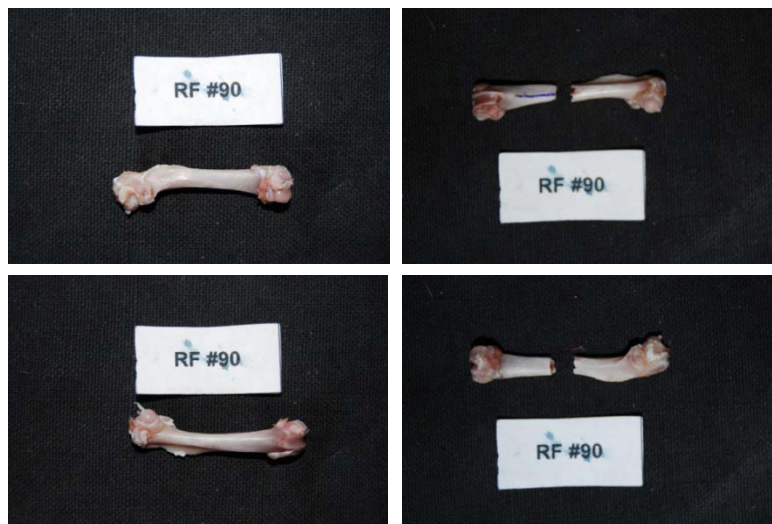
Γράφημα 168: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου LF90

Μέγιστο φορτίο: 96,22N

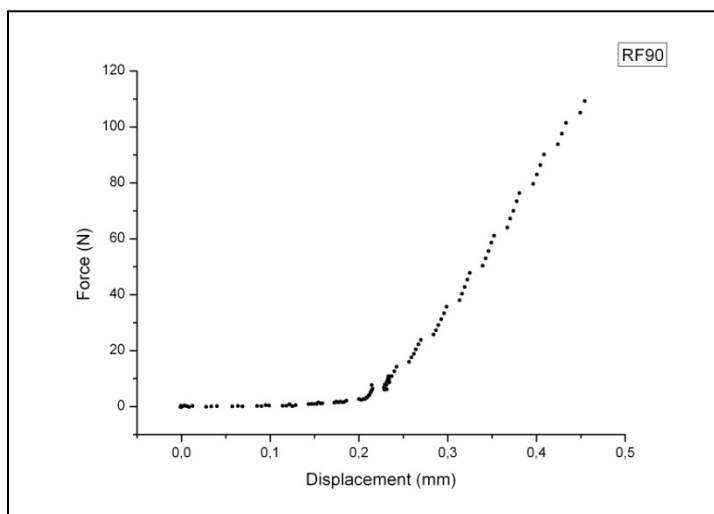
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,72mm

Δαπανηθείσα ενέργεια: 9,4mJ

Κωδικός δοκιμίου: RF90
Ομάδα: Control χωρίς OVX
Ημερομηνία γέννησης ομάδας: 25-30/7/2010
Ημερομηνία ευθανασίας: 20/1/2012



Εικόνα 381: Πρόσθια και οπίσθια όψη του δοκιμίου RF90 πριν και μετά το πείραμα κάμψης.



Γράφημα 169: Γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου RF90

Μέγιστο φορτίο: 113,41N
Μέγιστη βύθιση σημείου φόρτισης: 0,45mm
Δαπανηθείσα ενέργεια: 12,8mJ

Βιβλιογραφία

1. Martin, R.B. *A Genealogy of Biomechanics*. University of Pittsburgh, October 23 1999.
2. Borelli, G.A., *De Motu Animalium*. 1 January 1680.
3. Snell, R.S., *Clinical Anatomy by Regions*. 8th Edition ed, ed. W. Kluwer: Wolters Kluwer.
4. Zioupos P, Currey JD, Hamer AJ. *The role of collagen in the declining mechanical properties of aging human cortical bone*. J Biomed Mater Res 1999; 45(2):108-116.
5. Wang X, Bank RA, TeKoppele JM, Agrawal CM. *The role of collagen in determining bone mechanical properties*. J Orthop Res 2001; 19(6):1021-1026.
6. Hasegawa K, Turner CH, Burr DB. *Contribution of collagen and mineral to the elastic anisotropy of bone*. Calcif Tissue Int 1994; 55:381-386.
7. Wikipedia, *Bone Marrow*.
8. Reddy, S., M. Dischino, and L.J. Soslowky, *Biomechanics - Part I Bone Pathology*, J.S. Khurana, Editor. 2009, Humana Press. p. 61-68.
9. Yuehuei, A., *Mechanical Properties of Bone*, in *Mechanical Testing of Bone and the Bone-Implant Interface*. 1999, CRC Press. p. 41-63.
10. Samuel, S.P. et al., *Biomechanics – Part II Bone Pathology*, J.S Khurana, Humana Press. p. 69-77
11. An YH, Draughn RA (1999). *Mechanical testing of bone*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
12. Turner CH, Burr DB. *Basic Biomechanical measurements of bone: A Tutorial*. Bone 1993; 14:595-608.
13. Carter DR, Hayes WC. *Bone compressive strength: the influence of density and strain rate*. Science 1976; 194:1174-1176.
14. Γιαννακόπουλος, Χ.Κ., *Αρχές Εμβιομηχανικής των Οστών*. Οστούν, 2007. (2007) 18 (1): 11-17: p. 11-17.
15. Bagi, C.M., et al., *Morphological and structural characteristics of the proximal femur in human and rat*. Bone, 1997. 21(3): p. 261-267.
16. Timoshenko, S., *Strength of Materials*. 1986: Delhi : CBS Publishers & Distributors.
17. Timoshenko, S., *Strength of Materials*. 1940, Van Nostrand Company, Inc.
18. Peng, Z., et al., *The mechanical strength of bone in different rat models of experimental osteoporosis*. Bone, 1994. 15(5): p. 523-532.
19. Simkin, A. and G. Robin, *The mechanical testing of bone in bending*. Journal of Biomechanics, 1973. 6(1): p. 31-39.

20. Leppanen, O., et al., *Three-point bending of rat femur in the mediolateral direction: introduction and validation of a novel biomechanical testing protocol*. J Bone Miner Res, 2006. 21(8): p. 1231-7.
21. Brzóška, M., K. Majewska, and J. Moniuszko-Jakoniuk, *Mechanical Properties of Femoral Diaphysis and Femoral Neck of Female Rats Chronically Exposed to Various Levels of Cadmium*. Calcified Tissue International, 2005. 76(4): p. 287-298.
22. Panjabi, M.M., et al., *Biomechanical time-tolerance of fresh cadaveric human spine specimens*. J Orthop Res, 1985. 3(3): p. 292-300.
23. www.chem.uoa.gr/applets/AppletTtest/Appl_Ttest1.html.
24. www.ohio.edu/people/bayless/seniorlab/chauvenet.pdf.
25. Cakounes, K., Ross, A., *An Exploration of Coordinate Metrology*. August 5 2009, p. 7-9.