

Treball de Fi de Grau

Grau en enginyeria en tecnologies industrials

**Disseny i desenvolupament d'una metodologia
d'assaig per a la caracterització elàstica lineal
de materials polimèrics per impressió 3D.**

MEMÒRIA

Autor: Pol Jorba Domènech
Director: Xavier Ayneto Gubert
Convocatòria: Juny 2021



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

El PLA és un material termoplàstic utilitzat en aplicacions mèdiques, àmpliament utilitzat en la fabricació additiva a causa de la seva bona resistència mecànica, facilitat d'impressió i baix cost.

Tot i ser un material molt versàtil amb moltes aplicacions en diferents àmbits, no existeix una normativa que reguli el procediment per a caracteritzar aquest material, això provoca que tot i conèixer les seves propietats mecàniques en un cert rang, aquestes poden variar segons la geometria de la peça o el procés de fabricació. Per aquest motiu, en aquest treball s'ha proposat desenvolupar una metodologia per a caracteritzar aquest material, aquesta metodologia té com a objectiu la determinació del mòdul elàstic del material mitjançant diferents assaigs.

La principal problemàtica que presenta el PLA a l'hora de caracteritzar-lo es el comportament asimètric que presenta el material, per aquest motiu cal realitzar diferents assaigs per sotmetre el material a diferents tipus d'esforços per veure el seu comportament per a cada un d'ells. La geometria de les provetes a la part on es prenen les dades ha de ser la mateixa per a cada tipus d'assaig, tant la geometria com el procediment d'assaig s'ha dissenyat seguint les pautes marcades per la American Society for Testing and Materials (ASTM). Posteriorment, s'ha dissenyat un software capaç de determinar el mòdul elàstic del material segons el tipus d'esforç a partir de les dades dels assaigs.

Finalment, es pot concloure que s'han assolit els objectius proposats ja que la metodologia funciona correctament en vista dels resultats obtinguts, s'ha pogut trobar una configuració geomètrica per a les provetes segons ASTM i tant les simulacions realitzades com els valors obtinguts a través del software són correctes. Cal remarcar que l'objectiu del treball es determinar una metodologia per a determinar el mòdul elàstic del PLA que funcioni correctament però en cap cas l'objectiu principal es determinar el valor del mòdul elàstic amb exactitud, ja que per aconseguir això caldria posar en pràctica la metodologia desenvolupada i realitzar els assaigs en un laboratori, cosa que queda fora de l'àmbit d'aquest treball.

Sumari

SUMARI	3
1. GLOSSARI	7
2. PREFACI	9
2.1. Origen del projecte	9
2.2. Motivació	10
2.3. Requeriments previs	10
3. INTRODUCCIÓ	13
3.1. Objectius del projecte	13
3.2. Abast del projecte	13
4. ÀCID POLILÀCTIC (PLA)	14
4.1. Origen i obtenció del PLA	14
4.2. Propietats mecàniques del PLA.....	15
4.2.1. FDM – Modelat per deposició fosa	15
4.2.2. Propietats mecàniques del PLA fabricat amb FDM	16
4.3. Aplicacions del PLA.....	18
5. PROCEDIMENTS PER A LA CARACTERITZACIÓ DE MATERIALS CONVENCIONALS	19
5.1. Assaig a tracció	19
5.1.1. ASTM D-638	20
5.1.2. Instrumentació necessària	20
5.1.3. Geometria de les provetes	21
5.1.4. Preparació i procediment d'assaig.....	22
5.1.5. Càlculs	23
5.2. Assaig a compressió	24
5.2.1. ASTM D 695	24
5.2.2. Instrumentació necessària	25
5.2.3. Geometria de les provetes	26
5.2.4. Preparació i procediment d'assaig.....	27
5.2.5. Càlculs	27
5.3. Assaig a flexió	28
5.3.1. ASTM 790	28
5.3.2. Instrumentació necessària	29
5.3.3. Geometria de les provetes	30

5.3.4.	Preparació i procediment d'assaig.....	31
5.3.5.	Càlculs	32
5.3.5.1.	Tensions	32
5.3.5.2.	Mòdul elàstic a flexió	34
5.3.5.3.	Deformació tangencial o Elongació	35
6.	DETERMINACIÓ DE LA METODOLOGIA DE CARACTERITZACIÓ DEL PLA	36
7.	DISSENY DE LES PROVETES D'ASSAIG	38
7.1.	Secció comuna	38
7.2.	Proveta a tracció	41
7.3.	Proveta a compressió.....	43
7.4.	Proveta a flexió	45
8.	SIMULACIÓ DELS ASSAIGS	49
8.1.	Assaig a tracció	50
8.1.1.	Definició de l'element	50
8.1.2.	Constants del material i definició del mallat	51
8.1.3.	Condicions de contorn.....	52
8.1.4.	Resultats dels assaigs.....	54
8.2.	Assaig a compressió	57
8.2.1.	Definició de l'element	58
8.2.2.	Constants del material i definició del mallat	58
8.2.3.	Condicions de contorn.....	59
8.2.4.	Resultat dels assaigs	61
8.3.	Assaig a flexió.....	65
8.3.1.	Definició de l'element	65
8.3.2.	Constants del material i definició del mallat	66
8.3.3.	Condicions de contorn.....	68
8.3.4.	Resultats dels assaigs.....	69
9.	DESENVOLUPAMENT DEL SOFTWARE PER AL CàLCUL DEL MÒDUL ELÀSTIC	73
9.1.	Algorisme de programació	73
9.2.	Mètode de determinació del mòdul elàstic.....	76
9.3.	Codi de programació	81
10.	ANÀLISI DE RESULTATS	89

11. IMPACTE MEDIAMBIENTAL	96
12. PRESSUPOST	97
CONCLUSIONS	99
AGRAÏMENTS	100
BIBLIOGRAFIA	101

1. Glossari

Mòdul elàstic: Es paràmetre que indica la resistència d'un material a ser deformat ens la direcció on s'aplica la força.

Límit elàstic: Es el punt de la cobra tensió-deformació a partir del qual el material comença a deformat-se plàsticament

Proveta: Es una peça fabricada d'un material a caracteritzar per tal de ser assajada en un laboratori.

Coefficient de Poisson: Es la relació que existeix entre la deformació longitudinal i transversal al aplicar un esforç sobre el material

Relació d'esveltesa: Es un paràmetre geomètric que ve determinat per la longitud i secció d'una proveta.

Span to depth: Es la relació entre la distancia entre els suports de la proveta a flexió i el seu gruix.

Isòtrops: Es un propietat d'alguns materials que sempre es comporten igual sense importar la direcció de la força.

Algorisme: Es un conjunt finit d'instruccions o passos que serveixen per a executar una tasca o resoldre un problema

Anisòtrops: Es un propietat d'alguns materials que es comporten d'una manera o una altra segons la direcció de la força

Estricció: Es un fenomen que apareix en l'assaig a tracció quan la secció central de la proveta es redueix dràsticament fins a arribar a la fallida.

Corba tensió-deformació: Es la corba que representa la relació entre la tensió que s'aplica en un material i la seva deformació.

Llei de Hooke : Es la llei que relaciona la tensió amb la deformació d'un material.

2. Prefaci

A continuació es presentarà el projecte i les raons que han motivat la seva realització.

2.1. Origen del projecte

Des del departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona va sorgir una problemàtica en la caracterització de materials polimèrics utilitzats per a la fabricació additiva o impressió 3D.

A l'hora de caracteritzar un material convencional, es sotmet una proveta del material a caracteritzar a diferents assajos per tal de d'observar el comportament d'aquest material a diferents esforços. Un cop aquestes provetes son sotmeses als diferents assajos, es recullen dades tant de tensió assolida en diferents zones de la proveta com dades relacionades amb les deformacions que aquesta pateix mentre se li aplica carrega, amb aquests resultats tot i utilitzant formules bàsiques de la mecànica dels medis es determinen les constants intrínseques del material, com la seva resistència a tracció i a compressió o el mòdul elàstic del material, aquestes donen informació de com aquest material es comporta a diferents esforços.

El problema sorgeix al realitzar el mateix procediment per a caracteritzar materials asimètrics, es a dir, que no tenen el mateix comportament a tracció que a compressió, ja que els resultats que s'obtenen a partir dels assajos realitzats en aquest tipus de materials no son del tot correctes i presenten un cert error respecte el valor que realment tenen. En aquests materials s'engloben els materials polimerics com l'àcid polilàctic o PLA, que es un dels materials mes utilitzats en la fabricació additiva a dia d'avui, per tant la seva difícil caracterització suposa un problema. Per aquest motiu, des del departament va sorgir la idea de iniciar un projecte per trobar una solució a aquest problema, per aconseguir-ho no serveix el procediment habitual, com s'ha explicat anteriorment, per tant es necessari el desenvolupament d'una nova metodologia per a caracteritzar correctament aquest tipus de material, i aquest es l'objectiu que es pretén assolir amb aquest projecte.

2.2. Motivació

A continuació es precedirà a explicar les principals raons per les quals vaig decidir emprendre la realització d'aquest projecte que des d'un principi pot semblar una mica intimidant, ja que el que es pretén es trobar una nova metodologia d'assaig la qual no ha estat provada amb anterioritat.

Una de les principals raons per les quals optar per un projecte d'aquestes característiques va ser les ganes d'aprendre i la motivació de desenvolupar una nova tècnica que doni solució a un problema actual de la indústria d'impressió 3D, ja que es una indústria nova i en constant creixement amb un gran potencial de cara al futur. Per tant em va semblar la ocasió perfecte desenvolupar el meu TFG sobre aquest tema per tal d'aprofundir en aquest sector. A mes a mes, al centrar el treball en un material biodegradable com el PLA descartant altres polímers petroquímics converteix el desenvolupament del treball amb un repte encara mes motivador, ja que seria un possible pas endavant cap a disminuir l'impacte mediambiental de la indústria.

Per altra banda, aquest treball presenta una oportunitat de repassar i ampliar conceptes interessants sobre la mecànica dels medis treballats durant la carrera. També, al haver de simular la metodologia trobada permet aprofundir en la utilització de softwares de simulació com ANSYS, que s'ha utilitzat durant la carrera, i posar en practica algunes de les tècniques estadístiques que he après per al tractament de les dades amb les quals extreure conclusions coherents de la realització d'aquest estudi.

2.3. Requeriments previs

Per tal de dur a terme la elaboració d'aquest treball de manera correcta son necessàries diverses eines i/o coneixements que s'exposaran a continuació.

Aquest treball es centra únicament en el disseny d'una metodologia d'assaig per a materials utilitzats en la impressió 3D com l'àcid polilàctic, però no inclou l'assaig d'aquesta metodologia al laboratori, per tant no serà necessari cap tipus d'instrument d'assaig ni la construcció de provetes físiques, cosa que farà que el projecte sigui mes econòmic. No obstant, si serà necessari disposar d'un software de simulació per elements finits per de veure els resultats obtinguts amb la metodologia dissenyada, en aquest cas s'utilitzarà ANSYS.



Finalment, caldran tenir coneixements bàsics de mecànica dels medis i estar familiaritzat amb conceptes com el límit elàstic o el mòdul de Young, i altres que s'utilitzen per a caracterització d'un material, també serà necessari un coneixement basic de programació amb algun llenguatge.

3. Introducció

En aquest apartat es descriuran breument els objectius i l'abast del projecte.

3.1. Objectius del projecte

Aquest treball es desenvolupa al voltant d'un objectiu principal, el qual consisteix en trobar una metodologia que permeti la caracterització de l'àcid polilàctic de manera correcta, i així eliminar l'error que s'obté fent la caracterització amb la metodologia convencional. Per tal d'assolir aquest propòsit principal, primer cal trobar els punts en comú dels assajos que es realitzen per caracteritzar la majoria de materials convencionals, i a partir d'això serà necessari dissenyar tres provetes a assajar de manera que aquestes compleixin amb la normativa. Aquestes provetes han de ser idèntiques per la part on es prendran les mesures de cada assaig, es a dir la part central de cada proveta haurà de tenir la mateixa estructura i la mateixa forma geomètrica, per tal de comparar els resultats obtinguts.

Per altra banda, es pretén aprofundir en les propietats de l'àcid polilàctic o PLA i observar el seu comportament davant diferents esforços. D'aquesta manera es vol convertir-lo en un material més accessible a través d'un millor coneixement de les seves propietats mecàniques.

Finalment, serà necessari crear un model d'elements finits de les provetes per a la seva simulació, això permetrà aprofundir en la utilització de softwares de simulació com ANSYS i aplicar tècniques estadístiques per al tractament de les dades obtingudes com a resultat de les simulacions realitzades.

3.2. Abast del projecte

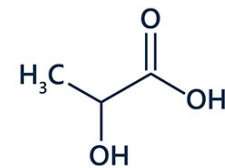
Tal i com s'especifica en el títol del treball, la metodologia a dissenyar està destinada a materials que s'utilitzen en la impressió 3D. No obstant, com aquesta indústria treballa amb diferents tipus de polímers i està en constant innovació, per reduir l'objecte d'estudi s'ha decidit centrar-se en un dels materials més utilitzats actualment a la indústria com és l'àcid polilàctic o PLA, això es així gràcies a la seva fàcil obtenció i al seu reduït impacte mediambiental. Tot i que la metodologia d'assaig es desenvolupa al voltant d'aquest material, també podria servir per a la caracterització de materials amb unes propietats mecàniques similars.

4. Àcid polilàctic (PLA)

Com s'ha esmentat anteriorment aquest treball es centra en la determinació d'un mètode de caracterització del PLA exclusivament, tot i que aquesta es podria utilitzar per materials amb característiques similars els quals presentin problemes similars a l'hora de definir les seves constants intrínseques, per aquest motiu es presentarà a continuació el procés d'obtenció d'aquest polímer termoplàstic y les propietats mecàniques, també es farà una breu explicació sobre els principals usos i possibles aplicacions del PLA.

4.1. Origen i obtenció del PLA

L'àcid polilàctic o PLA es un polímer termoplàstic biodegradable, dins del grup dels α -hidroxi-acids, y prové de la molècula de l'àcid làctic (àcid 2-hidroxiopropanoic), el qual esta format per un àtom de carboni asimètric. (1)



A partir de l'àcid làctic es possible obtenir PLA a partir de dues etapes consecutives, primer la síntesi de l'àcid làctic i posteriorment la polimerització. El primer pas es el procés d'extracció del midó de la biomassa i posteriorment el midó obtingut es converteix en sucre, posteriorment el sucre fermenta i es purifica. Finalment, un cop obtingut l'àcid làctic es procedeix a la polimerització d'aquest per tal d'obtenir l'àcid polilàctic o PLA, per aconseguir-ho existeixen dues maneres de procedir, la primera es un procés de condensació de l'àcid làctic per obtenir àcid làctic de baix pes molecular, el qual mitjançant un procés continu anomenat polimerització d'anell obert deriva en el polímer d'alt pes molecular que es el PLA. L'altre manera es mes directe, ja que mitjançant un solvent amb aigua s'obté directament un polímer d'alt pes molecular, per tant es mes ràpid però també mes costós, ja que trobar l'equilibri exacte en la mescla no es fàcil. (1)

Figura 4.1 Estructura molecular de l'àcid polilàctic (14)

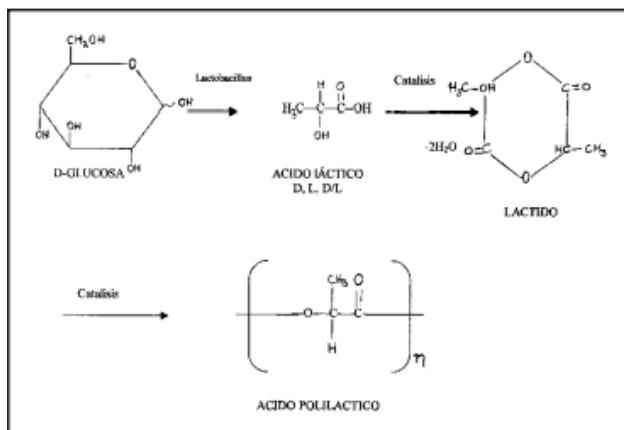


Figura 4.2 Síntesi de l'àcid polilàctic (1)

;

4.2. Propietats mecàniques del PLA

Les propietats mecàniques del PLA poden variar segons la seva composició, pes molecular i cristalinitat. No obstant, aquestes propietats es mantenen dins d'un rang de valors semblant al d'altres polímers petroquímics. A continuació es presenta una comparativa de la resistència a tracció, el mòdul elàstic i la temperatura màxima de treball del PLA amb alguns d'aquests polímers petroquímics amb propietats mecàniques semblants. (1) (2)

Polímero	Fuerza de Tensión (Mpa)	Módulo de Tensión (Gpa)	Temperatura Máx. Usada (°C)
LDPE	6.2 - 17.2	0.14 - 0.19	65
HDPE	20 - 37.2		121
PET	68.9	2.8 - 4.1	204
PS	41.3 - 51.7	3.1	78
PA	62 - 82.7	1.2 - 2.8	-
PP	33 - 37.9	1.1 - 1.5	121
PLA (L+)	40 - 60	3 - 4	50 - 60

Figura 4.3 Propietats mecàniques d'alguns polímers (1)

Com es pot observar el PLA ofereix una bona resistència a tracció, no obstant es tracta igualment d'un material rígid i fràgil, ja que com es pot apreciar en la comparativa anterior posseeix un del mòduls elàstics mes grans entre els polímers. Cal remarcar que aquestes propietats poden variar i no son exactes, per aquest motiu es donen uns rangs de valors, ja que com s'ha explicat anteriorment el PLA es un material difícil de caracteritzar a causa de les seves propietats.

4.2.1. FDM – Modelat per deposició fosa

Les propietats mecàniques del PLA exposades fins ara son molt generals i nomes serveixen per donar una primera idea de com aquest material es comporta.

Un cop es te el PLA, aquest no pot ser utilitzat directament per a la impressió 3D ja que es necessari que sigui sotmès a un procés de fabricació additiva per tal de poder imprimir cossos 3D amb PLA, aquest procés s'anomena modelat per deposició fosa (FDM), el qual consisteix en un mètode d'extrusió per filament fos que es va dipositant sobre una plataforma amb una certa direcció i va generant un peça en 3 dimensions afegint capes. (3)

Per tal de que les capes que es van afegint quedin unides entre elles i es pugui conformar una estructura solida, s'utilitza un injector escalfat que va injectant les capes de material en estat semi fos. Aquest injector va col·locant les capes de filaments movent-se dins d'un pla paral·lel a la plataforma que serveix de suport per col·locar la primera capa, aleshores l'injector va desplaçant-se per l'eix z, cada vegada que completa una capa de material per col·locar la següent, tal i com es pot apreciar a la figura. També, cal remarcar que existeix un injector adicional que s'utilitza per crear superfícies de suport que no formen part de la geometria inicial de la peça (l'injector de color vermell a la figura), les quals serveixen per recolzar la peça posteriorment per realitzar d'impressió de cares amb una geometria complicada. (3) (4)

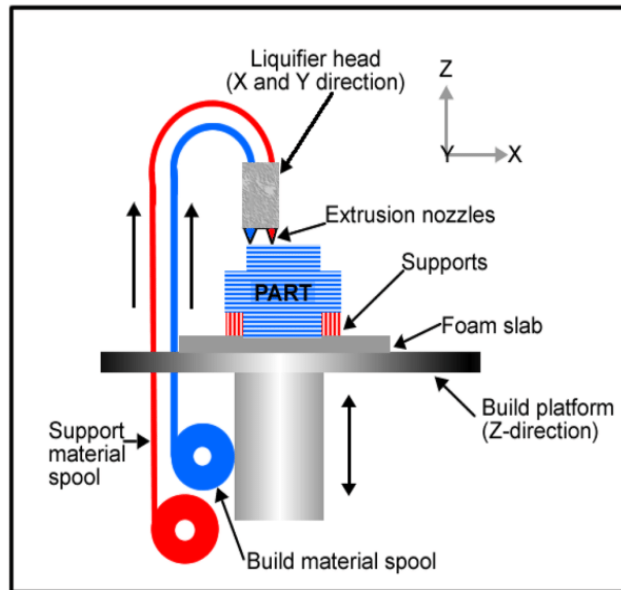


Figura 4.4 Procés FDM (3)

4.2.2. Propietats mecàniques del PLA fabricat amb FDM

Conèixer aquest mètode de fabricació additiva per al PLA es essencial per entendre com les propietats inicials del material son diferents a les propietats mecàniques que tindrà la peça un cop impresa amb aquest mètode però amb el mateix material. Un exemple molt clar d'això, i que afecta enormement el comportament del material, es la anisotropia que apareix a causa de la direcció amb la que l'injector va col·locant les capes explicada anteriorment.

A part de l'anisotropia produïda per el FDM, també existeixen altres propietats mecàniques que es modifiquen en aquest procés, aquestes no sempre varien de la mateixa manera ja que depenen de certs paràmetres característics de la impressió que influeixen en les propietats finals de la peça, alguns d'aquests paràmetres son la temperatura de l'injector, la velocitat d'impressió, la orientació del ràster que sol ser de 45 graus en la majoria dels casos, i alguns altres com la direcció de fabricació o l'infil, que en definitiva es tracta de com esta composta l'estructura interna de la peça que pot ser mes o menys densa, la qual influeix directament en propietats com la densitat i la resistència que tindrà la peça un cop fabricada. A continuació, es procedirà a analitzar les propietats mecàniques del PLA un conformat amb el procés de fabricació additiva de FDM, ja que aquest projecte es centra en l'estudi de les propietats mecàniques d'aquest material per a impressió 3D. (4)

;

En la següent taula es mostra un recull de les propietats mecàniques del PLA fabricat per FDM, cal remarcar que hi ha diversos assajos amb diferents esforços que donen valors diferents, ja que la caracterització del PLA no es fàcil i no es tenen valors exactes, per aquest motiu es dona un rang de valors per a cada propietat.

Mòdul elàstic a tracció	2346-2850 MPa
Resistència a tracció	33-65 MPa
Mòdul elàstic a flexió	2410-3000 MPa
Resistència a flexió	60-100 MPa
Mòdul elàstic a compressió	1000-1640 MPa
Resistència a compressió	18-94 MPa

Taula 4.1 Propietats mecàniques del PLA fabricat per FDM (4) (5) (6)

Com es pot observar, els valors de resistència i mòdul elàstic a tracció disminueixen lleugerament un cop s'ha conformat la peça final, però no existeix una variació significativa que canvi dràsticament el comportament de la peça. No obstant, una conclusió bastant interessant que es pot extreure d'aquestes dades es la gran diferència que existeix entre el mòduls elàstics a tracció i flexió respecte el mòdul elàstic a compressió, sent molt menor la resistència i menys rígid quan al material se li apliquen esforços de compressió. Per tant, com ja s'ha comentat amb anterioritat, es pot concloure que el PLA es un material asimètric i es comporta de manera diferent segons el tipus d'esforç que s'aplica sobre el material.

Com s'ha comentat anteriorment, els valors indicats a la taula per als diferents mòduls elàstics son valors que donen una idea del comportament de material segons l'esforç aplicat, ja que aquests poden variar segons com es realitzen els assajos per caracteritzar el material, s'han de tenir en compte paràmetres com la geometria de les provetes per a cada assaig i el tipus de normativa seguida en cada cas, cosa que s'explicarà mes endavant, tot i així, aquests valors serviran com a indicadors per tal de saber si metodologia d'assaig per tal de caracteritzar el PLA de manera correcte dona resultats mes o menys fiables o aquests disten molt del comportament real del material.

4.3. Aplicacions del PLA

Tot i que en aquest treball només es tracta l'àcid polilàctic o PLA des del punt de vista de la indústria de la impressió 3D, ja que té un gran impacte en aquesta al ser un dels materials més utilitzats per les seves propietats, es tracta d'un compost de gran varietat de característiques úniques cosa que el converteix en un material molt polivalent que pot ser utilitzat en gran varietat d'àmbits diferents que no tenen res a veure entre ells.

Un d'aquests àmbits en el qual l'ús del PLA està plenament estès és la indústria alimentària, en aquest cas el PLA s'utilitza en la confecció de materials d'envasat per a aliments, com per exemple en envasos de iogurt, mantega i alguns formatges, tot i que aquests envasos no estan fets 100% de PLA sinó que aquest està present en la seva composició, això és així gràcies a que el PLA és considerada com una substància GRAS, és a dir, una substància segura i que no afecta en l'estat dels aliments. (1)

Un altre camp on s'utilitza el PLA, per increïble que sembli, és en la cirurgia mèdica, en aquest cas el PLA té diferents aplicacions molt útils com a material per a la fabricació de sutures reabsorbibles o per a fabricar eines per a la cirurgia ortopèdica com grapes, plaques i pròtesis per a la cirurgia reconstructora craniofacial maxil·lofacial. També és útil per a l'envasament de medicaments d'alliberació lenta, els quals han d'estar sota certes condicions específiques i no es poden contenir en qualsevol envàs, alguns exemples són la insulina, antiinflamatoris o medicaments per al tractament del càncer. (1)

;

5. Procediments per a la caracterització de materials convencionals

Per tal de saber com es comporta un cert material quan es sotmès a qualsevol tipus d'esforç, primer es necessari realitzar la caracterització d'aquest material per tal d'establir certs paràmetres característiques d'aquest, i poder elaborar les equacions que descriuran el comportament del material. Aquest procediment consisteix en sotmetre una o varies provetes del material a caracteritzar a diferents assajos i veure com aquest reacciona. Els assajos mes comuns que es realitzen per caracteritzar un material son l'assaig de tracció, el de compressió i el de flexió.

Cal remarcar que no existeix una única manera de procedir per a cada assaig, segons el resultat que es desitgi es pot realitzar un assaig d'una manera o d'una altra. Per aquest motiu existeixen una sèrie de normatives per a cada assaig, aquestes estableixen uns certs criteris com la geometria de les provetes a assajar o el procediment que cal seguir i les instruccions específiques per realitzar l'assaig correctament, això es així ja que es necessari seguir les instruccions que aquestes normatives donen per tal de que els resultats obtinguts i les conclusions basats en aquests siguin fiables. Per últim, es important destacar que no existeix un procediment millor que una altre per a caracteritzar un material, sinó que hi ha procediments que ofereixen diferents prestacions que altres i la elecció del procediment correcte dependrà de quin tipus d'estudi es desitgi realitzar sobre el material.

A continuació es procedirà a presentar els assajos que es podrien utilitzar per un material com el PLA i les seves normatives corresponents.

5.1. Assaig a tracció

L'assaig a tracció es un dels assaigs mes utilitzats per a poder determinar el mòdul elàstic d'un material, aquest consisteix en sotmetre a una proveta del material a caracteritzar, d'una certa geometria específica que mes endavant es comentarà a un esforç a tracció determinat i mesurar en quina mesura s'ha deformat la proveta, d'aquesta manera es pot conèixer la rigidesa del material que es la propietat que el mòdul elàstic indica. Per tal de conèixer el seu valor, cal mesurar la deformació de la proveta a diferents valors de tensió aplicada sobre la proveta i elaborar així la corba tensió-deformació, la qual permet identificar valors com el mòdul elàstic (que es la pendent en la zona elàstica), la tensió de límit elàstic i altres paràmetres com la ductilitat del material.

Com s'ha comentat amb anterioritat, hi ha diverses maneres de duu a terme l'assaig a tracció segons el tipus de conclusions que s'esperen extreure d'aquest, tots aquests procediments venen recollits en unes normatives elaborades per la American Society for Testing and Materilas (ASTM), les quals donen instruccions molt concretes de com procedir per a cada tipus d'assaig ja que contenen informació sobre la preparació del assaig, la geometria de les provetes o els aparells necessaris per a realitzar l'assaig correctament.

En el cas de l'assaig a tracció es difícil obtenir bons resultats, ja que es necessari aparells d'alta precisió que solen ser bastant costos, per aquest motiu existeixen diferents procediments ASTM. Els mes utilitzats son ASTM E8 i EN 10002-1, ja que son senzills de realitzar i no son molt costos, aquests procediments a part de permetre determinar el mòdul elàstic donen informació de la ductilitat del material, ja que permeten fer un estudi de tota la corba tensió-deformació, tot i que la majoria de vegades no donen resultats molt precisos. Per altra banda existeix el ASTM E111, que nomes es centra en l'estudi de la zona elàstica i permet trobar el mòdul elàstic d'un material de manera molt precisa, l'inconvenient que presenta es l'alt cos dels aparell de mesura que utilitza, ja que son instruments molt precisos.

5.1.1. ASTM D-638

Finalment, s'ha decidit agafar com a referencia el ASTM D-638, ja que dona resultats força bons i no es gaire costos, i encara que nomes estudi la zona elàstica, es suficient si el que es busca es únicament conèixer el mòdul elàstic del material. A mes a mes, el ASTM D-638 es el test mes utilitzat per a la caracterització de tot tipus de plàstics i polímers, per tant es el test idoni per a caracteritzar PLA.

5.1.2. Instrumentació necessària

En aquest apartat es procedirà a esmentar breument els diferents aparells que son necessaris per a la correcta realització del assaig.

- **Màquina d'assaig:** Una màquina que permet subjectar la proveta i aplicar càrrega sobre aquesta a diferents nivells. Aquesta ha de estar composta per una part fixe i una altra de mòbil que la doti de moviment, ha de tenir també fixadors que subjectin la proveta per tal de que aquesta no es mogui mentre se li aplica la càrrega. També caldrà un mecanisme controlat que li doni a la part mòbil un moviment uniforme a velocitat constant, finalment haurà de contenir un indicador de carga per tal de saber el valor de carga que s'està aplicant sobre al proveta.
(7)

;

- **Extensòmetre:** Un aparell de mesura capaç de mesurar la distància entre dos punts de la proveta abans i després d'aplicar la carrega per veure quan la deformació que s'ocasiona. Segons el paràmetre que es vulgui determinar caldrà utilitzar un extensòmetre o un altre, en el cas del mòdul elàstic es necessari un extensòmetre amb un error màxim de 0,0002 mm/mm que prengui mesures de manera continua. Una alternativa mes econòmica però menys fiable de mesura son les galgues extensomètriques, col·locant una a cada banda de la proveta es possible mesurar el desplaçament d'una forma menys precisa. (7)

5.1.3. Geometria de les provetes

Les provetes que son sotmeses a esforços de tracció han de tenir una geometria molt específica, la secció ha de ser prismàtica per tal d'assegurar una subjecció correcta i ha de tenir una forma molt concreta amb una secció central significativament mes estreta que als extrems, això es així per tal d'assegurar que la proveta falli a la zona central i no als extrems, que es per on esta subjectada, per tant on realment s'han de prendre les mesures de deformació es a la zona centra, que es on anirà col·locat l'extensòmetre. (7)

Dins d'aquesta geometria comuna per a totes les provetes a tracció, les dimensions d'aquestes venen determinades segons el gruix de la proveta a assajar, a continuació es mostren les dimensions segons el gruix de la proveta.

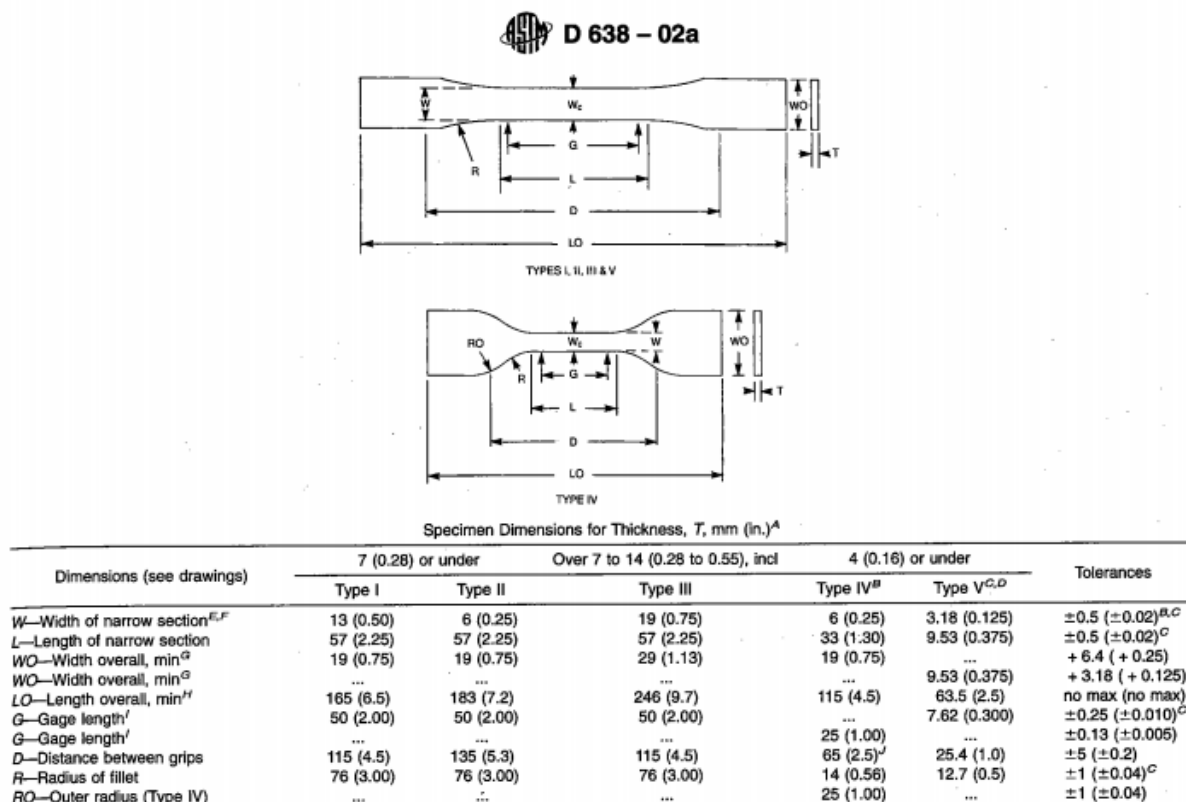


Figura 5.1 Dimensions de la proveta a tracció (7)

Com es pot observar en la figura anterior, les provetes es classifiquen en diferents tipus segons el seu gruix.

El tipus de proveta mes utilitzat es el Tipus 1, que es per aquelles que tenen un gruix menor a 7 mm, son les mes comuns ja que d'aquesta manera les provetes fallen abans i s'estalvia mes material, el Tipus 2 s'utilitza sota les mateixes condicions que el Tipus 1 però quan la proveta Tipus 1 no arriba a fallar. Per a les provetes entre 7 i 14 mm de gruix s'utilitza el Tipus 3. Finalment, els Tipus 4 i 5 son per aquelles provetes que no poden ser fabricades amb mes de 4mm de gruix, ja sigui per especificacions tècniques del propi material o per falta d'aquest. Cal remarcar la diferenciació entre Tipus 4 i 5, ja que el Tipus 4 esta reservat per quan el propòsit de l'assaig es la comparació de dos o mes materials que no tenen la mateixa rigidesa. (7)

Existeixen algunes excepcions per a provetes de certs tipus de materials, com es el cas dels compostos reforçats els quals nomes poden utilitzar provetes de Tipus 1. També es el cas dels tubs o les barres rígides, ja que al tenir una secció diferent de la esmentada anteriorment segueixen unes altres restriccions pel que fa a la seva geometria.

5.1.4. Preparació i procediment d'assaig

Per tal de realitzar l'assaig de manera correcta caldrà reunir una sèrie de condicions d'assaig marcades per la normativa, aquesta estipula que tant el lloc on es realitzarà l'assaig com la proveta a assajar han de romandre a temperatura ambient, a uns 23 graus Celsius aproximadament, i la humitat relativa haurà de ser del 50% aproximadament. (7)

Un cop es reuneixen les condicions esmentades anteriorment, es procedirà a realitzar l'assaig. Primerament, es mesurarà l'amplada i el gruix de la proveta per la seva secció mes estreta amb un micròmetre i s'anotaran els valors, d'aquesta manera es coneixeran les dimensions inicials reals de la proveta. A continuació, es procedirà a col·locar la proveta a la maquina d'assaig subjectant-la pels fixadors, per a fer-ho s'ha de col·locar l'eix llarg de la proveta alineat amb els punts de la fixació que subjecten la proveta, la distancia entre aquests dos punts ve estipulada per la normativa segons el tipus de proveta utilitzada, en la secció de la geometria de la proveta. Abans d'aplicar la carrega es necessari determinar amb quina velocitat s'aplicarà, aquesta esta determinada per la normativa segons el tipus de proveta a assajar, a continuació es mostra una taula amb la velocitat amb que cal aplicar la càrrega segons el tipus de proveta. (7)

;

TABLE 1 Designations for Speed of Testing^A

Classification ^B	Specimen Type	Speed of Testing, mm/min (in./min)	Nominal Strain ^C Rate at Start of Test, mm/mm·min (in./in·min)
Rigid and Semirigid	I, II, III rods and tubes	5 (0.2) ± 25 %	0.1
		50 (2) ± 10 %	1
		500 (20) ± 10 %	10
	IV	5 (0.2) ± 25 %	0.15
		50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15
	V	1 (0.05) ± 25 %	0.1
		10 (0.5) ± 25 %	1
		100 (5) ± 25 %	10
	Nonrigid	III	50 (2) ± 10 %
500 (20) ± 10 %			10
IV		50 (2) ± 10 %	1.5
		500 (20) ± 10 %	15

Taula 5.1 Velocitats de l'assaig a tracció (7)

Finalment, es procedirà a aplicar la carrega amb la velocitat segons indica la figura anterior i a mesura que aquesta s'aplica s'aniran realitzant mesures de la càrrega aplicada i de la elongació de la proveta, com mes mesures es realitzin durant el procés major ser la precisió dels resultats que s'obtinguin. Un cop finalitzat l'assaig, s'utilitzaran les mesures obtingudes per a determinar la corba tensió-deformació, a partir de la qual es podran extreure paràmetres característics del material. També seria interessant prendre mesures de tensió i deformació en el punt de límit elàstic i en el punt de fallada del material.

Per tal que els resultats siguin fiables es necessari repetir el procés varies vegades, per als materials isotròpics es necessari realitzar l'assaig al menys 5 vegades, però si es tracta d'un material anisòtrop caldrà fer l'assaig 10 vegades, 5 aplicant la carrega en direcció normal a l'eix principal d'anisotropia i 5 vegades aplicant-la en direcció paral·lela a aquest. Si en algun dels intents la proveta es trenca abans del previst o no es trenca per la secció central es descartarà la proveta i no es tindran en compte els valors obtinguts d'aquesta. (7)

5.1.5. Càlculs

A partir de la corba tensió-deformació obtinguda a partir dels assajos, es pot començar a extreure conclusions. Primer de tot cal comprovar si la corba obtinguda té una zona de comportament lineal, ja que si no presenta aquest comportament caldrà un procés més complicat per a assolir valors correctes, això es necessari ja que en la majoria de casos les corbes tensió-deformació obtingudes a partir d'assajos a tracció presenten una regió inicial irregular que no representa el comportament elàstic del material, per tant es necessària una correcció la qual es realitzarà mitjançant una prolongació de la zona lineal fins a la intersecció amb l'eix de carrega zero, aquest punt es prendrà com el punt de zero deformació.

Un cop realitzada la correcció de la corba es procedirà al càlcul dels paràmetres desitjats per a caracteritzar el material, com el mòdul de elàstic, el coeficient de Poisson o el límit elàstic.

En aquest cas com es comenta en l'abast del projecte, aquest treball només es centra en la determinació del mòdul elàstic, per tant la determinació d'altres paràmetres esmentats anteriorment queden fora d'estudi. Per a determinar el mòdul elàstic del material de manera correcta serà necessari anar anotant els valors de tensió i deformació a mesura que s'augmenta la càrrega, aquests valors seran introduïts com a input en un software, el qual calcularà i retornarà el valor mig del mòdul elàstic segons totes les dades introduïdes.

5.2. Assaig a compressió

L'assaig de compressió es duu a terme mitjançant un procediment bastant semblant a l'assaig de tracció, exceptuant que en aquest la càrrega s'aplica en la mateixa direcció però en sentit contrari i la geometria de les provetes es totalment diferent. Aquest assaig no és el més utilitzat per la caracterització de materials convencionals, ja que la maquinària i els instruments necessaris per a realitzar-lo són complexos, també cal tenir molta cura amb les cares de la proveta on s'aplica la força ja que aquestes han de ser totalment planes i perpendiculars entre si per tal d'evitar que la càrrega s'apliqui de manera irregular, per tant aquestes provetes requereixen un procés de fabricació i acabat molt precís.

No obstant, l'assaig a compressió és necessari per a materials asimètrics com el PLA ja que al tenir diferent comportament a tracció que a compressió cal determinar diferents valors del mòdul elàstic segons el tipus de càrrega aplicada.

5.2.1. ASTM D 695

Com en el cas de l'assaig a tracció existeixen diverses normatives regulades per ASTM les quals recullen diferents procediments per duu a terme l'assaig de compressió segons el material sobre el que es vulgui treballar o l'objectiu de l'assaig. En aquest cas s'ha decidit estudiar l'assaig a compressió sota les directrius de la normativa ASTM D 695, ja que aquesta és específica per a la caracterització de les propietats a compressió de plàstics rígids, això el converteix en un procediment adequat per a caracteritzar les propietats a compressió del PLA, en aquest cas el mòdul elàstic a compressió.

;

5.2.2. Instrumentació necessària

- **Màquina d'assaig:** Per tal de duu a terme l'assaig es essencial disposar de l'aparell que aplicarà la carrega sobre la proveta. Aquest aparell no disposa de guies o fixadors per a subjectar la peça a assajar, ja que al aplicar un esforç de compressió, sempre i quan la proveta estigui ben fabricada i es col·loqui de forma correcta, aquesta romandrà fixe a causa de l'esforç que s'aplica. La maquina disposa d'un mecanisme que permet aplicar la carrega desitjada en cada moment amb un control de velocitat regulable, també incorpora un indicador de càrrega per que l'usuari sàpiga en tot moment la quantitat de carrega que esta aplicant sobre la proveta en tot moment, cal remarcar que aquest indicador ha de ser molt precís i estar calibrat abans de començar l'assaig per tal d'evitar possibles errors de mesura.(8)

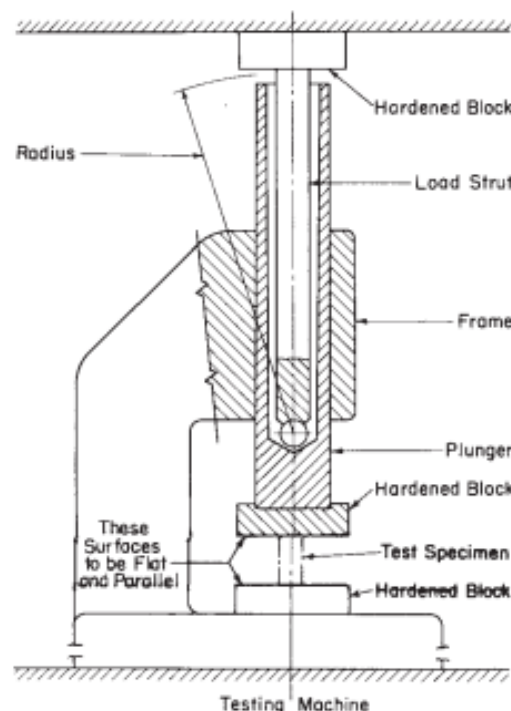


Figura 5.2 Màquina d'assaig a compressió

- **Compressòmetre:** Es imprescindible disposar d'un aparell capaç de mesurar el desplaçament que pateix la proveta a cada moment a causa de la càrrega aplicada per la màquina. Es molt recomanable que aquest aparell vagi indicant el desplaçament contínuament en funció de la carrega per tal de veure el comportament de la proveta a mesura que augmentem la carrega.(8)
- **Fixacions:** Es necessari disposar d'unes fixacions per poder assajar provetes mes fines, ja que al aplicar carrega suficient aquestes podrien bolcar a causa de la seva inestabilitat o patir vinclament.(8)
- **Eina de compressió:** Es necessari disposar d'un objecte situat al final de la maquina d'assaig que estarà en contacte amb la proveta, es molt important que aquest element tingui un bon acabat superficial i estigui en perfectes condicions, ja que tal i com passa amb la proveta qualsevol irregularitat pot comportar que la carrega no s'apliqui de manera uniforme. També es important que la superfície que esta en contacte amb la proveta tingui un coeficient de fricció elevat, ja que d'aquest manera s'assegura un contacte sense lliscament.(8)

5.2.3. Geometria de les provetes

Les provetes que s'utilitzen a l'assaig a compressió tenen generalment dues formes diferents, prismàtiques o cilíndriques. No existeixen unes condicions que determinin la utilització d'una forma o d'una altra, ja que aquesta s'escollirà segons les conveniències de l'assaig que es vulgui realitzar o de la facilitat que aportï una forma respecte l'altre. El que sí que recull la normativa són les dimensions que ha de tenir la proveta independentment de la seva forma per tal de que l'assaig es realitzi de manera correcta i la proveta no falli abans d'hora.

La normativa no especifica les dimensions exactes segons algun paràmetre de la proveta o del material com era el cas de l'assaig a tracció, sinó que dona un rang de valors per a un paràmetre característic de la geometria de la proveta anomenat relació d'esveltesa o en anglès 'stiffness ratio', en el qual intervenen magnituds que fan referència a la longitud i secció de la proveta.

$$SR = \frac{L}{\sqrt{\frac{I}{A}}}$$

Equació 5.1 Stiffness Ratio (8)

Les dimensions de la proveta han de ser tals que aquest paràmetre assoleixi valors entre 11 i 16, ja que aleshores es considera que està ben dimensionada i és apte per a assajar sense cap contratemps. Tot i que la normativa no especifica les dimensions de la proveta més enllà de la relació d'esveltesa, dona unes dimensions com a guia per a dimensionar la proveta, aquestes són una secció quadrangular de 12,7 x 12,7 i una altura de 50,8 mm en el cas de que la proveta sigui prismàtica, si el que es busca és una proveta cilíndrica aquesta estaria composta per una secció de 12,7 mm i una altura de 50,8 mm. (8)

També existeixen certes restriccions per a altres tipus de provetes que no són ni prismàtiques ni cilíndriques, com és el cas de provetes en forma de tubs o d'altres laminars amb materials ortòtrops, que tenen unes dimensions específiques a causa de la seva geometria particular o han de complir uns rangs de relació d'esveltesa diferents.

;

5.2.4. Preparació i procediment d'assaig

Pel que fa a la preparació prèvia a l'assaig, les condicions necessàries perquè aquest es pugui realitzar correctament són les mateixes que en l'assaig a tracció, una temperatura ambient d'uns 23 graus Celsius aproximadament i una humitat relativa entorn al 50% tant per a l'ambient com per a la proveta. Es cert que per a certes provetes fabricades amb certs materials anomenats hideoscòpics com el Nylon, cal que romanguin secs i per aquest motiu es guarden en uns recipients que no deixen passar el vapor d'aigua i no es retiren fins a l'hora d'assajar-los. (8)

Tal i com es fa en l'assaig a tracció, abans de començar l'assaig es necessari prendre valors de les dimensions de la proveta, cal mesurar la seva longitud i també la seva amplada varies vegades al llarg d'aquesta, aquesta mesures serviran per determinar l'àrea i longituds inicials reals de la proveta amb les quals es basaran els càlculs posteriors al assaig, per a obtenir valors de tensió i deformació. A continuació, es depositarà la proveta a la màquina d'assaig de manera que l'eix longitudinal d'aquesta estigui alineat amb el punt central de l'eina de compressió i que estigui totalment recta. Un cop situada la proveta correctament, es procedirà a aplicar la carrega gradualment a velocitat constant, segons la normativa per a totes les provetes la aquesta velocitat hauria de ser d'uns 1,3 mm/min, durant el procés caldrà anar prenent els valors de tensió i deformació de la proveta per tal de dibuixar la corba tensió-deformació de l'assaig, de la qual es realitzaran els càlculs posteriors i s'extrauran les propietats característiques del material per a poder caracteritzar-lo.

Finalment, caldrà repetir l'assaig varies vegades per tal de minimitzar l'impacte de errors en la mesura de els magnituds preses durant l'assaig, tal i com es fa en l'assaig a tracció es necessari repetir el procés fins a 5 vegades per a materials isotròpics i fins a 10 vegades en el cas que el material presenti anisotropia, 5 vegades aplicant la carrega paral·lelament a l'eix longitudinal de la proveta i altres 5 aplicant-la de manera perpendicular. (8)

5.2.5. Càlculs

A partir de la corba tensió-deformació obtinguda durant l'assaig es procedirà a determinar les diferents propietats del material per a caracteritzar-lo, tals com el límit elàstic, la resistència del material o el mòdul elàstic. En aquest cas l'estudi es centra en la determinació del mòdul elàstic, per a fer-ho de manera correcta es traçarà una recta tangent a la part lineal de la corba tensió-deformació fins a trobar el punt d'intersecció amb l'eix de deformació, a partir d'aquest punt i comparant-lo amb qualsevol altre de la recta es calcularà el pendent d'aquesta, el valor obtingut serà el modula elàstic del material en MPa.

5.3. Assaig a flexió

L'assaig a flexió es un procediment per tal de caracteritzar un material, esta extensament utilitzat en la industria, es una molt bona alternativa a l'assaig de tracció per a la determinació de propietats del material com el mòdul elàstic ja que a diferència d'aquest en l'assaig a flexió s'aconsegueixen grans deformacions en la proveta a aplicar una mica de càrrega, això el converteix en un test ideal per assajar provetes fines i llargues de materials amb mòdul elàstic elevat, ja que cal aplicar una gran força per aconseguir deformar-los.

Una característica molt interessant de l'assaig a flexió es que al aplicar la càrrega i la peça comença a flectar, a la secció de la proveta on la força esta aplicada apareixeran esforços de tracció i de compressió simultàniament (tensió per la cara exterior i compressió per la cara interior), això permet observar dos comportaments diferents aplicant una càrrega puntual per tant es pot dir que l'assaig a flexió son dos assajos en un.

5.3.1. ASTM 790

Per a determinar les dimensions i el procediment correcte a seguir per a caracteritzar un material com el PLA la normativa mes adequada es la ASTM 790. Aquest document es centra en el procediment per a la determinació de les propietats a flexió per a plàstics reforçats i no reforçats i per a materials que son aïllants elèctrics. Aquest mètode s'aplica d'igual manera per a materials rígids i semirígids. (9)

Aquesta normativa recull 2 procediments diferents per a realitzar l'assaig, el procediment A i el procediment B. La diferencia entre aquestes dues maneres de procedir rau en els punts de contacte entre la proveta i la maquina d'assaig. Tots dos procediments son assajos de flexió clàssics amb 3 punts de contacte amb la proveta, no obstant en el procediment B aquest punts tenen molta mes superfície que en el procediment A. Tot i tractares del mateix assaig, aquesta diferenciació existeix perquè segons l'objectiu de l'assaig pot existir un procediment mes adequat que l'altre, ja que en el cas del procediment B nomes esta dissenyat per a determinar la resistència a flexió del material, per tant si es desitja determinar qualsevol altra propietat del material es mes adequat emprar el procediment A, especialment si es desitja obtenir el mòdul elàstic a flexió com es el cas d'aquest treball. També cal remarcar que el procediment A treballa millor amb materials que es deformen poc abans de trencar i el procediment B amb aquells que assoleixen llargues deformacions, per aquest motiu es indicat utilitzar-lo si es desitja conèixer la resistència a flexió de material.

;

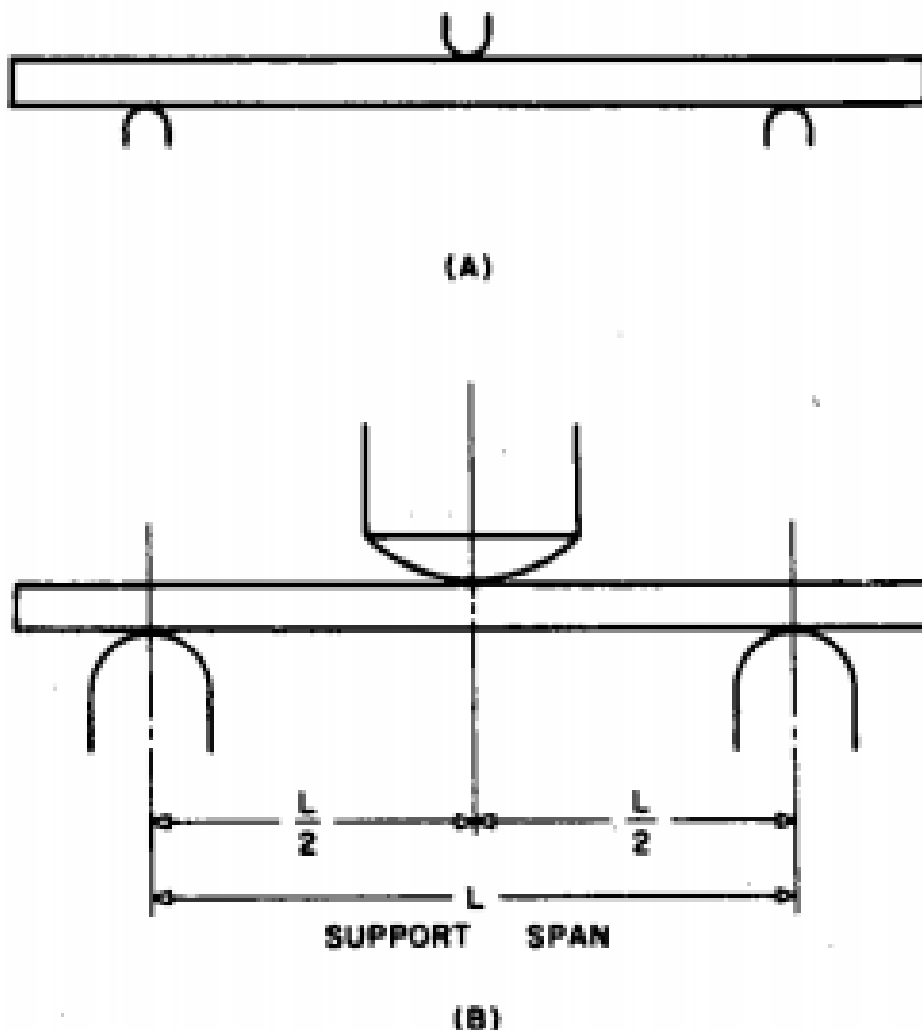


Figura 5.3 Croquis de l'assaig a flexió (9)

5.3.2. Instrumentació necessària

- **Màquina d'assaig:** Es tracta de l'aparell en el qual es col·loca la proveta per a ser assajada, aquesta màquina incorpora un mecanisme encarregat d'aplicar la càrrega sobre la proveta gradualment. És important que l'aparell estigui ben calibrat per tal que s'apliqui exactament la càrrega desitjada, a més ha de estar construït d'un material força rígid ja que no es recomana que la màquina pateixi deformacions de més del 1% del total de la proveta. En la majoria de casos la màquina ja incorpora un indicador de càrrega i un aparell que mesura la flexió total que pateix la proveta a mesura que s'augmenta la càrrega. (9)

- **Suports i braç de carrega:** Aquests elements van subjectes a la màquina d'assaig i són els punts que estan en contacte amb la proveta que en el cas d'aquest assaig són 3, 2 punts de suport situats a cada extrem que estan en contacte amb la proveta per la part inferior i el braç de carrega que es troba equidistant entre els dos suports. Les superfícies d'aquests elements que estan en contacte amb la proveta han de ser cilíndriques i han de tenir un radi mínim de 5 mm aproximadament, d'aquesta manera s'eviten altes concentracions de càrrega en la zona de contacte amb la proveta i també possibles danys a la superfície de la proveta per dentició. (9)

5.3.3. Geometria de les provetes

Les provetes que són assajades a flexió normalment es tallen a partir de planxes o lamines del gruix desitjat per a la proveta es conformen a través de diferents processos per a obtenir la geometria desitjada.

La forma de les provetes ha de ser allargada i prima per tal de facilitar la flexió a l'hora d'aplicar la càrrega en el punt central, i la seva secció es normalment quadrangular per a assegurar la seva estabilitat durant l'assaig. Partint d'aquestes premisses comunes per a totes les provetes que s'assagen a flexió, les dimensions de la proveta es determinen segons el seu gruix i el material del qual estan fetes. Per a les provetes amb un gruix superior al 1,6 mm, la normativa especifica que la distància entre els dos suports que subjecten la peça ha de ser 16 vegades més gran que el gruix d'aquesta aproximadament, i per a aquelles provetes amb un gruix superior a 3,2 mm la amplada no pot superar $\frac{1}{4}$ la distància entre suports. En canvi, per a aquelles provetes amb un gruix inferior a 1,6 mm les dimensions estan perfectament definides i no depenen de cap relació entre magnituds, aquestes provetes han de tenir una longitud de 50,8 mm i una amplada de 12,7 mm. (9)

Tot i que cal complir aquestes directrius que la normativa imposa segons el gruix de la proveta també existeixen algunes altres referents al tipus de material que es vol caracteritzar i a les seves propietats. Un exemple són les provetes fabricades amb motlles que solen estar compostes per termoplàstics i termoestables, en aquests casos es recomana una longitud de 127 mm, una amplada de 12,7 mm i un gruix 3,2 mm, amb aquestes dimensions s'assegura una relació de distància entre suports contra gruix de 16, ja que sempre cal deixar material sobrant a després del suport a cada banda de la proveta per assegurar l'estabilitat d'aquesta durant tot l'assaig. Per a alguns materials compostos laminats es necessari augmentar la relació distància-profunditat 'span to Depth ratio' a més de 16, fins a 30 o 40. (9)

;

Per a aquells materials que presenten un comportament anisòtrop a causa d'estar formats per diferents capes apilades en direccions diferents, com es el cas del PLA, es recomanable augmentar el 'span to Depth ratio' fins a 60, d'aquesta manera s'aconsegueix reduir els efectes de les deformacions de cisallament que apareixen a causa de la anisotropia i que poden afectar al càlcul del mòdul elàstic a flexió, tot i així la seqüència d'apilament de les capes a l'hora de constituir el material pot afectar al mòdul elàstic tangencial considerablement. (9)

5.3.4. Preparació i procediment d'assaig

Les condicions prèvies a l'assaig son exactament iguals que s'havien de donar en els assajos a tracció i a compressió tant per la sala d'assaig com per la proveta, aquests consisteixen en mantenir una temperatura d'uns 23 graus Celsius i una humitat relativa entorn al 50%. (9)

Abans de començar l'assaig es necessari prendre mesures de la proveta, es prendran diverses mesures de l'amplada i el gruix d'aquesta al centre de la proveta, on s'aplicarà la càrrega, aquests valors serviran per a realitzar els càlculs posteriors a l'assaig. Després es procedirà a col·locar la proveta a la maquina d'assaig, al tractar-se d'un assaig a flexió de 3 punts es necessari col·locar la peça per tal que el braç amb el que s'aplica la càrrega quedi situat al punt central de la proveta, d'aquest manera també quedarà la mateixa quantitat de proveta sobrant per cada extrem.

Un cop col·locada la proveta s'aproparà el braç a la proveta fins a tocar la seva superfície i posteriorment s'aplicarà un petit valor de força anomenat precàrrega, el qual equival a una tensió de 2 MPa o mes en funció de les dimensions de la peça. A continuació, es procedirà a aplicar la carrega de manera gradual, la velocitat a la que aquesta s'aplica depèn de paràmetres geomètrics de la proveta com la distancia entre els suports o el gruix d'aquesta, a continuació es mostra l'equació per a calcular la velocitat a la que avança el braç o capçal (Z). (9)

$$R = ZL^2/6d \quad (1)$$

where:

R = rate of crosshead motion, mm (in.)/min,

L = support span, mm (in.),

d = depth of beam, mm (in.), and

Z = rate of straining of the outer fiber, mm/mm/min (in./in./min). Z shall be equal to 0.01./

Equació 5.2 Velocitat del capçal (9)

Un cop definida la velocitat del capçal, es procedirà a realitzar l'assaig mentre s'aniran registrant el valors de deformació vertical (mm) del punt central de la proveta segons la força (N) aplicada de manera continua. Amb les dades enregistrades es realitzaran els càlculs post-assaig.

5.3.5. Càlculs

Després de realitzar l'assaig amb el procediment descrit en l'apartat anterior, es té el valor de desplaçament vertical màxim de la peça que es troba en el punt d'aplicació de la força per a cada valor d'aquesta. Com es pot observar, no es pot dibuixar una gràfica amb aquests dos valors per a determinar el mòdul elàstic, ja que per una banda tenim valors de força en N i per l'altre valors de desplaçament absolut en mm.

5.3.5.1. Tensions

Per a trobar el desplaçament que pateix la proveta es necessari identificar els esforços que apareixen a l'interior de la peça provocats per la càrrega aplicada que provoquen les deformacions en aquesta. A continuació, es presenta un esquema de les tensions que actuen sobre la proveta en aplicar la carrega.

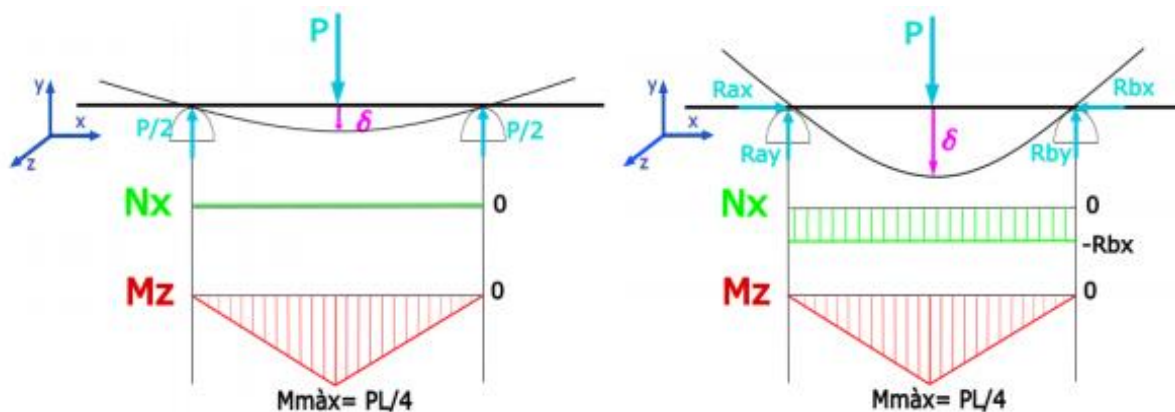


Figura 5.4 Esquema d'esforços sobre la proveta (4)

Com es pot observar en la figura, a causa de la carrega P aplicada al punt central entre els dos suport apareix un moment flector en l'eix z que assoleix el seu màxim en el punt d'aplicació de la carrega amb un valor de $PL/4$. Segons la proveta assoleixi o no grans deformacions pot aparèixer un esforç normal a la secció de la proveta constant al llarg d'aquesta, aquest fenomen s'anomena flexió composta i afectarà en les tensions que apareixen a la secció central de la proveta. També cal remarcar que la carrega P actua com a un esforç tallant sobre la secció de la proveta per tant es produirà tensió tallant sobre aquesta, no obstant el valor que aquesta assolirà serà insignificant enfront de la tensió normal produïda per el moment flector i en cas que apareixia l'esforç normal, per aquest motiu no es té en compte.

;

A continuació es mostra un gràfic que representa les tensions que apareixen en la secció central de la proveta produïdes per el moment flector i l'esforç normal.

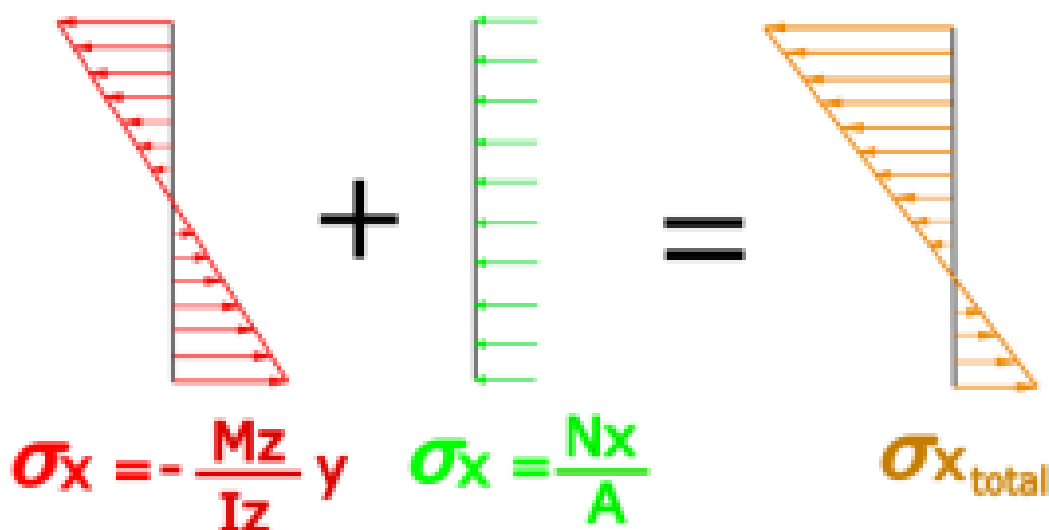


Figura 5.5 Distribució de tensions sobre la secció de la proveta (4)

En la figura anterior es poden observar la contribució de cada un dels esforços provocats per la càrrega P a les tensions que apareixen en la secció central, es pot apreciar com el moment flector provoca tensions en 2 sentits diferents però amb la mateixa magnitud, per aquest motiu la cara interior de la proveta es comprimeix i la cara exterior s'estira, però el fet de tenir un esforç normal de compressió trenca aquesta simetria provocant que les tensions de compressió siguin majors que les de tracció deixant una distribució de tensions asimètriques com representa el gràfic.

Un cop es coneix quines tensions actuen sobre la proveta es pot procedir a calcular el valor d'aquesta tensió. Per a calcular la tensió introduïda per el moment flector s'utilitza la formula de Navier, que relaciona el moment flector amb la tensió que apareix sobre la secció a partir de la geometria d'aquesta. Pel que fa a la tensió produïda per l'esforç normal, el càlcul es senzill ja que només caldrà dividir la força que s'aplica entre l'àrea on aquesta s'aplica com s'havia fet en els assajos anteriors, aleshores aplicant el principi de superposició es combinaran aquestes dues tensions per trobar el valor de tensió final. No obstant per tal de simplificar els càlculs es recomanable despreciar les tensions introduïdes per la força normal, ja que en cas de que finalment estiguin presents a causa d'una gran deformació assoliran valors insignificant en comparació a les tensions introduïdes per el moment flector. Per tant les tensions que apareixen en la proveta es calcularan de la següent manera.

$$\sigma_x = \frac{M_z}{W_z} = \frac{P \cdot L/4}{\frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2} = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} = \sigma_x$$

Equació 5.3 Càlcul de la tensió per a l'assaig a flexió (9)

5.3.5.2. Mòdul elàstic a flexió

Per a calcular el mòdul elàstic a flexió no es pot aplicar el mateix procediment que s'aplicava en els assajos de tensió i compressió, en els quals es comparava la tensió aplicada en cada moment amb la deformació que aquesta produïa, en el cas de la flexió tot i que es coneixen les tensions que van apareixen sobre la secció de la proveta durant l'assaig no es coneix la deformació que aquestes produeixen, per aquest motiu no es pot obtenir la corba tensió-deformació que s'utilitzava per trobar el valor del mòdul elàstic, ja que les úniques dades que es tenen de l'assaig son el desplaçament vertical o flexió de la proveta segons la força aplicada. No obstant, la normativa dona una fórmula per a calcular el mòdul elàstic tangencial en funció dels paràmetres obtinguts durant l'assaig.

$$E_T = \frac{P \cdot L^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \delta}$$

Equació 5.4 Càlcul del mòdul elàstic a flexió (9)

;

5.3.5.3. Deformació tangencial o Elongació

Aquest valor representat com ϵ , es la deformació que correspon a la tensió de resistència a flexió, i es calcula utilitzant la llei de Hooke a partir dels valors de tensió i mòdul elàstic calculats a partir de les dades recopilades durant l'assaig.

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} = \frac{\frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}}{\frac{P \cdot L^3}{48 \cdot \delta \cdot I}} = \frac{3 \cdot P \cdot L \cdot 48 \cdot \delta \cdot I}{2 \cdot b \cdot h^2 \cdot P \cdot L^3} = \frac{6 \cdot \delta \cdot h}{L^2} = \epsilon_f$$

Equació 5.5 Càlcul de la deformació per a l'assaig a flexió (9)

6. Determinació de la metodologia de caracterització del PLA

Tot i la existència de les normatives vistes anteriorment per a assajar materials amb característiques semblants al PLA, no existeix una normativa o model que reculli com duu a terme de manera correcta la caracterització elàstica lineal d'un material com el PLA. És cert que les normatives vistes expliquen amb detall els procediments correctes per determinar el comportament elàstic de materials com el PLA mitjançant un assaig o un altre, però no és suficient amb un d'aquests assajos per a caracteritzar el material completament, ja que com s'ha explicat amb anterioritat molts dels materials utilitzats en la indústria de la impressió 3D no tenen un comportament simètric, es a dir que el comportament que exhibeixen depèn del tipus d'esforç que s'apliqui sobre ells, per tant si es fa servir qualsevol dels procediments descrits anteriorment per a caracteritzar un d'aquests materials, el PLA en aquest cas, només es coneixerà com es comporta el material quan se li aplica aquell esforç en concret ja que aquest comportament no es pot extrapolar per a altres tipus d'esforços. Per aquest motiu la metodologia per a caracteritzar qualsevol d'aquests materials ha de incorporar els 3 assajos que s'utilitzen per a caracteritzar qualsevol altre material, l'assaig a tracció, l'assaig a compressió i l'assaig a flexió. El problema és que tot i que aquests assajos estan definits per a assajar un material com el PLA per separat no estan correlacionats entre ells, es a dir els resultats que s'obtinguin de cada procediment per separat no es poden comparar ni contrastar entre ells, per aquest motiu el que es pretén és unificar aquests procediments sota una mateixa metodologia amb una geometria comuna respectant en tot moment les normatives de cada un dels assajos.

Per començar serà necessari determinar la geometria de les provetes que es pretenen assajar, seran un total de 3 provetes amb diferents geometries per a cada un dels 3 assajos a realitzar, cada proveta s'ha de dissenyar seguint les directrius que dona la normativa segons l'assaig però totes les provetes hauran de tenir una secció central comuna, es a dir, que encara que les 3 provetes tinguin formes i longituds diferents hauran de ser iguals per la part central, ja que és la zona on es mesuraran les deformacions produïdes al aplicar la càrrega, aleshores s'haurà de determinar una secció comuna per a les 3 provetes que entri dins de les restriccions geomètriques de cada assaig, d'aquesta manera es podran comparar els resultats obtinguts ja que realment estaran extrets de la mateixa geometria.

;

Un cop es defineix la geometria de cada proveta especificant la seva forma i dimensions, amb el programa de disseny tridimensional SolidWorks es dibuixaran els corquis amb les dimensions definides i es donarà una representació 3D de cada una de les provetes. A continuació, s'introduiran els dissenys en el software de simulació per elements finits ANSYS® Academic Research Mechanical (15), on es tractarà de fer simulacions de cada assaig com si es tractes del laboratori, es definiran el tipus d'elements i les condicions de contorn segons cada assaig per intentar imitar la realitat, aleshores es realitzaran diferents simulacions amb diferents valors de càrrega aplicada per a obtenir els valors de deformació en cada cas, d'aquesta manera es podrà obtenir la corba tensió-deformació tal i com es faria en el laboratori. No obstant, per a realitzar la simulació es necessari introduir en el software les propietats del material com el mòdul elàstic i el coeficient de Poisson, el problema es que l'objectiu de l'assaig es precisament determinar aquestes propietats, especialment el mòdul elàstic, per tant el que es farà es agafar un valor aproximat dins del rang de valors conegut per a cada mòdul elàstic i introduir-lo en el software segons l'assaig que es vagi a realitzar. Es cert que d'aquesta manera s'introdueix un error en el càlcul del mòdul elàstic, per aquest motiu es seguirà un procés iteratiu en el qual un cop s'obtingui el mòdul elàstic es tornarà a introduir en el software i es realitzarà el procés de nou fins a minimitzar aquest error.

Finalment es realitzarà la confecció d'un software senzill capaç de realitzar els càlculs post assaig utilitzant el llenguatge de programació Python. Aquest software es basarà en un algorisme el qual tindrà com a 'input' les dades de tensió i deformació de cada proveta extretes a partir dels assajos, també s'haurà d'indicar juntament amb aquestes dades un codi d'identificació de cada assaig, es a dir, cada conjunt de dades haurà d'anar acompanyat amb un identificador que indiqui de quin assaig provenen aquelles dades, ja que segons quin sigui l'identificador el software tractarà les dades que l'acompanyen d'una manera o d'una altre. L'objectiu principal d'aquest software serà automatitzar el procés de càlcul a partir de les dades obtingudes de cada assaig segons s'ha especificat amb anterioritat, d'aquesta manera no serà necessari realitzar els càlculs a ma o recorre a diferents programes cada vegada que es desitgi caracteritzar un material ja que només caldrà introduir les dades recopilades durant l'assaig per a obtenir el resultat desitjat. A partir de les dades introduïdes, el software retornarà el valor del mòdul elàstic segons l'assaig tot i especificant a quin mòdul elàstic fa referència aquell valor, també incorporarà la possibilitat de representar la corba tensió-deformació a partir de les dades introduïdes.

7. Disseny de les provetes d'assaig

El primer pas per començar a definir la metodologia d'assaig es definir la geometria de les provetes que s'assajaran. Com s'ha comentat es presentaran un total de 3 dissenys, un per a cada assaig, això es així ja que com s'ha vist anteriorment cada assaig requereix un tipus de geometria diferent segons les seves necessitats.

7.1. Secció comuna

Cada proveta es dissenyarà segons els estàndards definits per les normatives de cada assaig, el problema es que la zona on es prenen les dades de tensió i deformació de cada assaig ha de ser igual per als 3 dissenys per poder comparar els resultats obtinguts, aleshores s'ha de definir una secció central comuna per a les 3 provetes que s'ajusti a les restriccions geomètriques dels 3 assajos. Un cop definida la secció comuna s'ajustaran les altres dimensions de les provetes per que aquestes compleixin la normativa que defineix el seu assaig.

Tal i com s'explica anteriorment, les normatives no defineixen els la geometria de les provetes completament sinó que especifiquen unes certes dimensions en funció d'alguna altra o d'algun paràmetre geomètric, per tant si s'escullen les dimensions de cada proveta de manera estratègica es possible determinar una secció comuna per a totes les provetes sense incomplir les restriccions geomètriques de cada normativa. No obstant, possiblement la geometria final possiblement no s'ajusti perfectament a les recomanacions de cada geometria ja que no existeix un configuració que s'adapti a les 3 normatives, per tant es tractarà de buscar un equilibri entre totes les restriccions i trobar la millor solució possible tenint en compte diferents factors.

A l'hora de determinar la secció comuna s'ha tingut molt en compte les restriccions geomètriques de la normativa que recull l'assaig a tracció, com s'ha vist anteriorment la forma d'aquest assaig esta bastant definida i les seves dimensions canvien segons el gruix de la proveta, que es on aquesta es mes flexible, per tant aquesta normativa serà la que definirà la amplada de la secció central de les 3 provetes i aquesta serà una o una altra segons el gruix que s'esculli per a la secció, ja que com s'ha explicat existeixen diferents tipus de provetes segons en la geometria, i per al assaig que es desitja realitzar en aquest cas existeixen 2 opcions o 2 rangs de gruix que definiran una amplitud diferent, el tipus 1 i el tipus 3, ja que els tipus 4 i 5 s'utilitzen per realitzar assajos amb una altra finalitat i el tipus 2 defineix una geometria alternativa per si l'assaig amb el tipus 1 no dona resultats. Per tant s'haurà de triar entre una amplada de 13 mm amb un gruix de 4 a 7 mm o una altra de 19 mm amb un gruix de 7 a 14 mm.

;

Finalment s'ha optat per una secció de **19 mm** d'amplitud i **7 mm** de gruix. S'ha escollit aquesta opció en front d'altres possibilitats com una secció amb una amplada de 13 mm, ja que això deriva en provetes de petites dimensions que son molt sensibles a la carrega aplicada, es a dir que es deformen fàcilment amb la mínima carrega i pot ser mes difícil prendre mesures durant l'assaig. També es podria escollir una geometria amb un gruix superior, per exemple una secció de 19 x 12 mm, tot i que en l'assaig de compressió la secció recomanada es rectangular ja que es la geometria que donar una major estabilitat al comprimir la peça, es podria realitzar l'assaig sense problemes amb una secció rectangular, a mes també existeixen altres factors a considerar abans de determinar el gruix de les provetes.

Com la secció escollida serà la mateixa per a les 3 provetes, el gruix final condicionarà la geometria de les provetes de cada assaig, per tant per a prendre una decisió cal estudiar com el gruix afecta a tots es assajos. En el cas de l'assaig a flexió, les provetes acostumen a no ser molt gruixudes a diferencia de l'assaig a compressió, per tant es necessari trobar un equilibri considerant tos els factors, si s'escull un gruix excessivament gran la longitud de la proveta haurà de ser molt gran i a conseqüència la distancia entre suports, això pot suposar un problema ja que no en tots els laboratoris d'assaig es disposa de maquines d'assaig que assoleixin distancies entre suports molt grans, un altre factor es el mètode de fabricació del PLA, com s'ha explicat anteriorment les provetes es fabriquen amb el mètode de modelat per deposició fosa (FDM), en aquest procés es van col·locant capes una sobre l'altre que posteriorment es refreden i formen un material compacte, el problema es que la col·locació d'aquestes capes no es immediata i mentre encara s'estan col·locant les capes superiors aquelles que s'han col·locat a primer ja es comencen a refredar, això provoca un comportament diferent si es flexiona la peça cap a un sentit o cap a l'altre cosa que pot ser un problema al realitzar l'assaig a flexió. Aquest fenomen no te solució, el que es pot fer es repetir l'assaig a tracció per les dues direccions i fer la mitjana, no obstant per evitar aquesta mesura que incrementaria el cost de fabricació de les provetes, es possible minimitzar aquest fenomen reduint el gruix de la proveta ja que al tenir un gruix menor es redueix el temps de fabricació de les provetes i es minimitza l'efecte que te aquest fenomen sobre l'assaig a flexió, d'aquesta manera la diferencia entre flectar la peça cap a un sentit o cap a l'altre serà insignificant. Veient tots aquests factors es clar que la millor opció es optar per la opció de mínim gruix possible, que en aquest cas segons les restriccions geomètriques de l'assaig a tracció que s'han comentat es de 7 mm.

A continuació es mostra una taula amb totes les possibles geometries plantejades per a la secció central

Wc	T
19	8
19	9
19	10
19	11
19	12
19	13
19	14
13	4
13	5
13	6
13	7
19	7

En negreta es mostren les dimensions de l'amplada i el gruix de la geometria escollida.

Wc = Amplada (With)

T = Gruix (Thickness)

Taula 7.1 Possibles dimensions de la secció comuna

Cal remarcar que totes les possibles geometries presentades per a la secció central de les 3 provetes son perfectament valides, ja que totes han estat escollides per a complir les restriccions geomètriques de cada assaig, per tant s'ha escollit una d'aquestes per el motius exposats anteriorment però s'hagués pogut realitzar els assajos escollint qualsevol de les altres sense cap tipus de problemes.

;

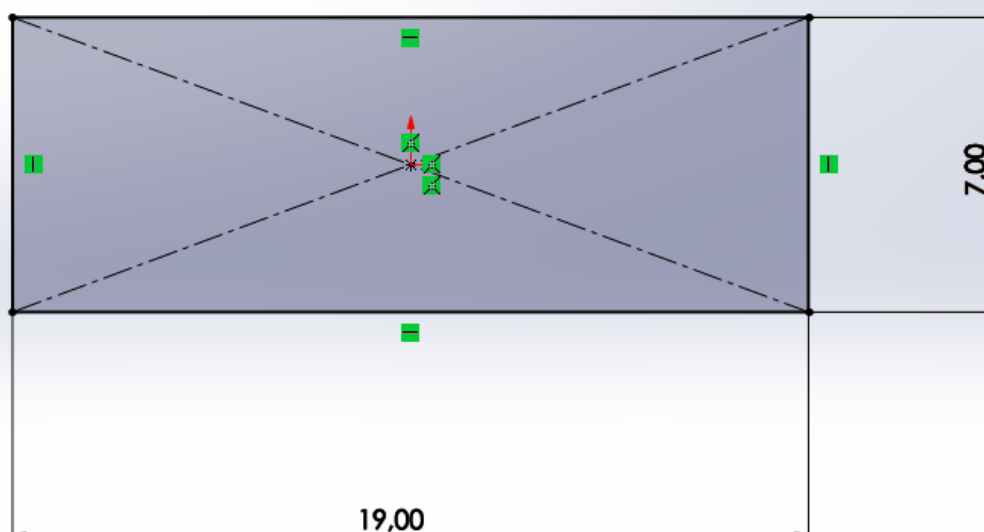


Figura 7.1 Croquis de la secció comuna

7.2. Proveta a tracció

La forma d'aquesta proveta ve fixada per la normativa, com s'ha explicat anteriorment aquesta ha de ser estreta per la part central i més ample per els extrems que es per on es subjecta durant l'assaig. La estratègia seguida per a determinar la geometria de la proveta va molt lligada a la seguida per a determinar la secció comuna, per tant un cop s'ha definit la secció, les altres dimensions de la proveta ja queden definides per la normativa. Segons les dimensions escollides per a la secció central les quals son 19 x 7 mm, queda definida el tipus de proveta segons la normativa. En aquest cas com el gruix de la proveta es de 12 mm, la proveta es de tipus 3 ja que el seu gruix esta en el rang entre 7 i 14 mm, d'aquesta manera queden definides les dimensions restants necessàries que permeten determinar la geometria de la proveta per complet, com l'amplada dels extrems, la llargada de la secció central i el radi de curvatura que te la proveta en el canvi d'amplada. A continuació es mostra un croquis amb el disseny final de la proveta i una representació 3D d'aquesta.

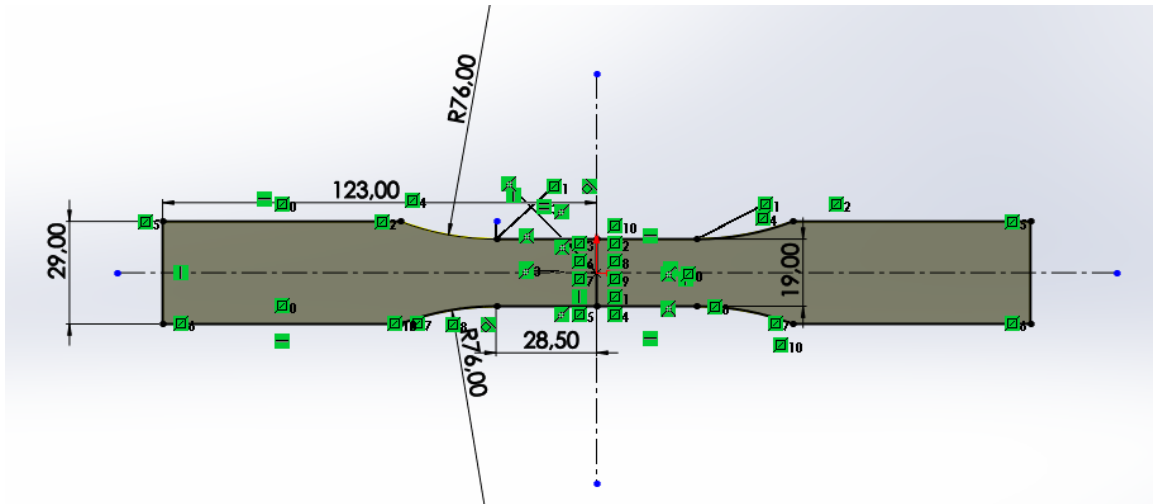


Figura 7.2 Croquis de la proveta a tracció

El croquis de la proveta presentat en la figura anterior ha estat realitzat per simetria horitzontal a partir de la línia de simetria vertical, per tant tot i que no s'especifiqui en el croquis, la longitud total de la proveta es el doble de 123 mm, es a dir **246 mm**, succeeix el mateix per a la longitud de la secció central que es el doble de 28,5 mm, es a dir de **55 mm** en total. També es poden apreciar altres magnitud definida per la normativa com l'amplada dels extrems que es de **29 mm** i el radi de curvatura que es de **76 graus**.

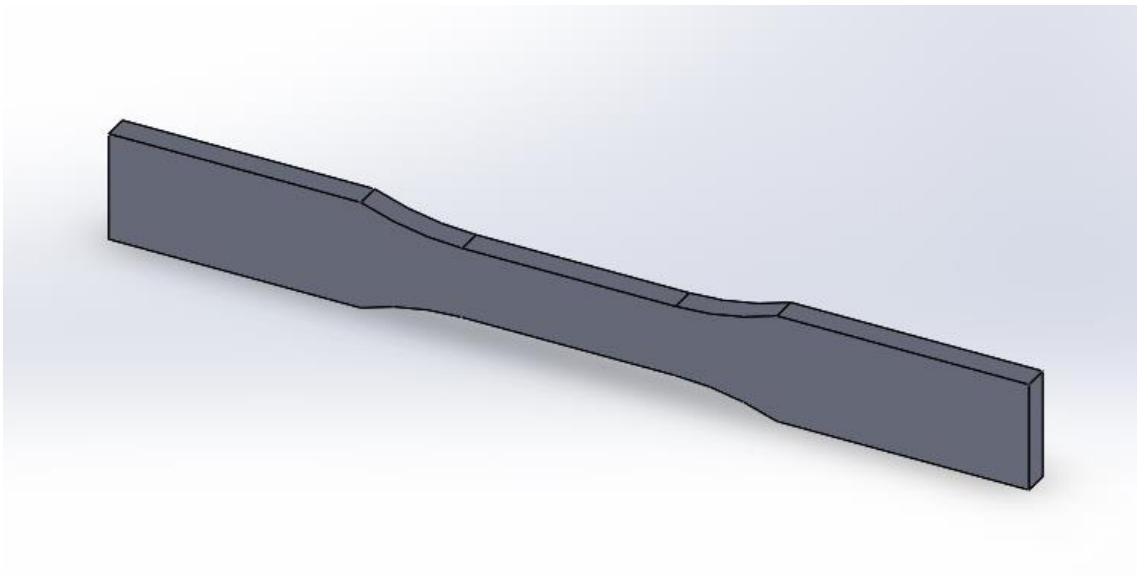


Figura 7.3 Representació 3D de la proveta a tracció

7.3. Proveta a compressió

La proveta a compressió ha de resistir altes cargues d'aixafament per tant la seva geometria ha de ser robusta i compacte amb una base que doni estabilitat a la peça mentre s'aplica la carrega. En aquest cas la normativa proposa dues possibles formes que assegurin la estabilitat de la proveta, es tracten d'una forma cilíndrica o una forma prismàtica amb una base quadrangular. No obstant, cap d'aquestes configuracions es possible ja que anteriorment s'ha definit la geometria de la proveta a tracció i de la secció comuna, així que l'única configuració possible es un prisma amb les dimensions de la secció comuna ja que totes les provetes han de tenir la mateixa geometria, per tant l'únic paràmetre en el que es té una certa llibertat es la longitud de la proveta.

Com s'ha comentat, la normativa recomana una secció quadrangular de 12,7 x 12,7 mm en cas de haver triat una geometria prismàtica però no es indispensable per que la proveta sigui segura per a assajar, la condició que si que imposa la normativa es que el radi d'esveltesa de la proveta o 'stifness ratio', del qual s'ha parlat anteriorment, ha de tenir un valor entre 11 i 16, es a dir que l'ideal es que aquest paràmetre tingui un valor de 14 o 15. Per assegurar que el radi d'esveltesa tingui el valor desitjat s'ajustarà la longitud de la proveta per tal d'assolir aquest valor, ja que afortunadament la longitud de la proveta es una magnitud directament proporcional al radi d'esveltesa.

Wc	T	SR	StD	Lc	Lt	I	A
19	8	12,9903811	62,5	30	500	810,666667	152
19	9	13,4715063	61,11111111	35	550	1154,25	171
19	10	13,8564065	60	40	600	1583,333333	190
19	11	14,1713248	59,09090909	45	650	2107,41667	209
19	12	14,4337567	58,33333333	50	700	2736	228
19	13	14,6558145	57,69230769	55	750	3478,58333	247
19	14	14,8461498	57,14285714	60	800	4344,66667	266
13	4	12,9903811	62,5	15	250	69,33333333	52
13	5	13,8564065	60	20	300	135,416667	65
13	6	14,4337567	58,33333333	25	350	234	78
13	7	14,8461498	57,14285714	30	400	371,583333	91
19	7	14,8461498	35,71428571	30	250	543,083333	133

Taula 7.2 Paràmetres geomètrics de les provetes

SR = Stifness ratio

Lc = Longitud de la proveta a compressió

Com es pot observar en la figura anterior, s'ha fet us de la fórmula de la relació d'esveltesa per tal de determinar la longitud de la proveta (L_c) que assoleixi un valor de la relació d'esveltesa entre 11 i 16. En aquest cas es pot observar com imposant una longitud de **30 mm** s'aconsegueix una relació d'esveltesa de 14,85, per tant 30 mm es un valor de longitud adequat per a dimensionar la proveta. També es pot apreciar quines serien les longituds adequades per a altres valors de secció, com es pot observar existeixen altres configuracions geomètriques que permeten valors més petits per a L longitud per tant s'obtidrien provetes més curtes, no obstant les altres seccions proposades son de dimensions més reduïdes, per tant la geometria **19 x 7 x 30 mm** tot i no semblar la més indicada ja que les seves dimensions disten bastant a les recomanades per la normativa 12,7 x 12,7 x 50,8 mm, la relació d'esveltesa té un valor acceptat per la normativa. Els altres paràmetres que es mostren a la figura fan referència a la inèrcia de la secció (I) i a l'àrea d'aquesta (A) ja que son paràmetres que intervenen en el càlcul de la relació d'esveltesa, els paràmetres restants fan referència a la geometria de la proveta a flexió i s'explicaran més endavant.

A continuació es mostra un croquis de la proveta a compressió de la seva geometria final i un representació 3D de la mateixa.

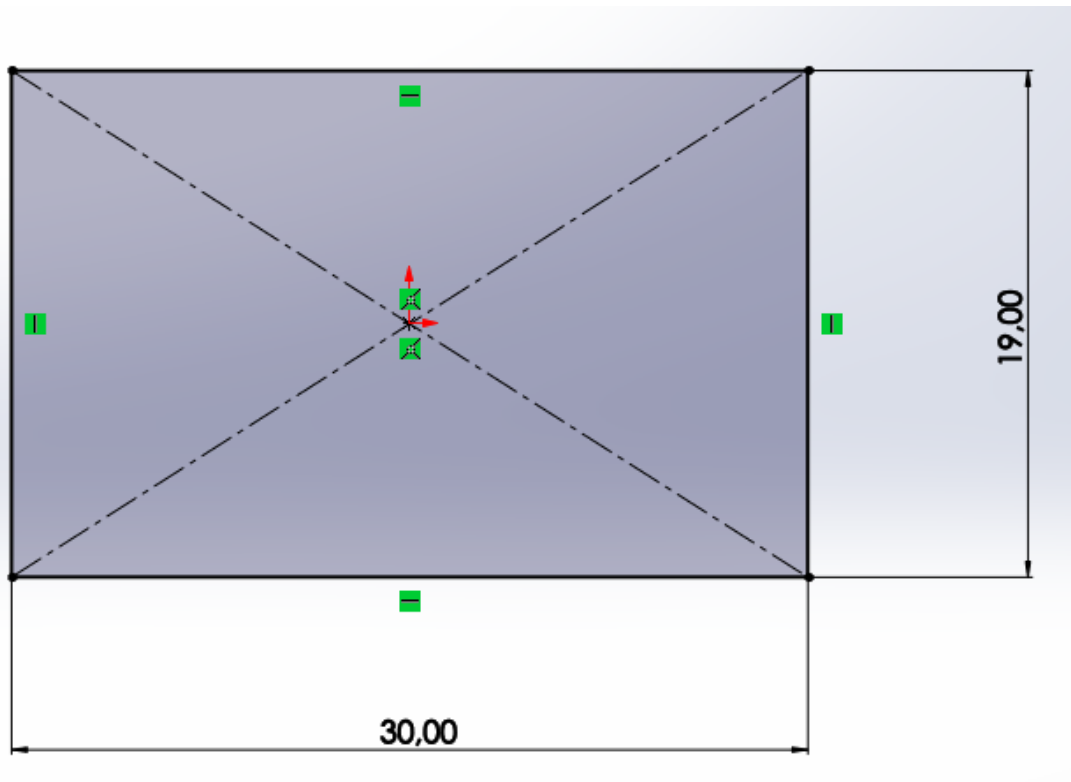


Figura 7.4 Croquis de la proveta a compressió

;

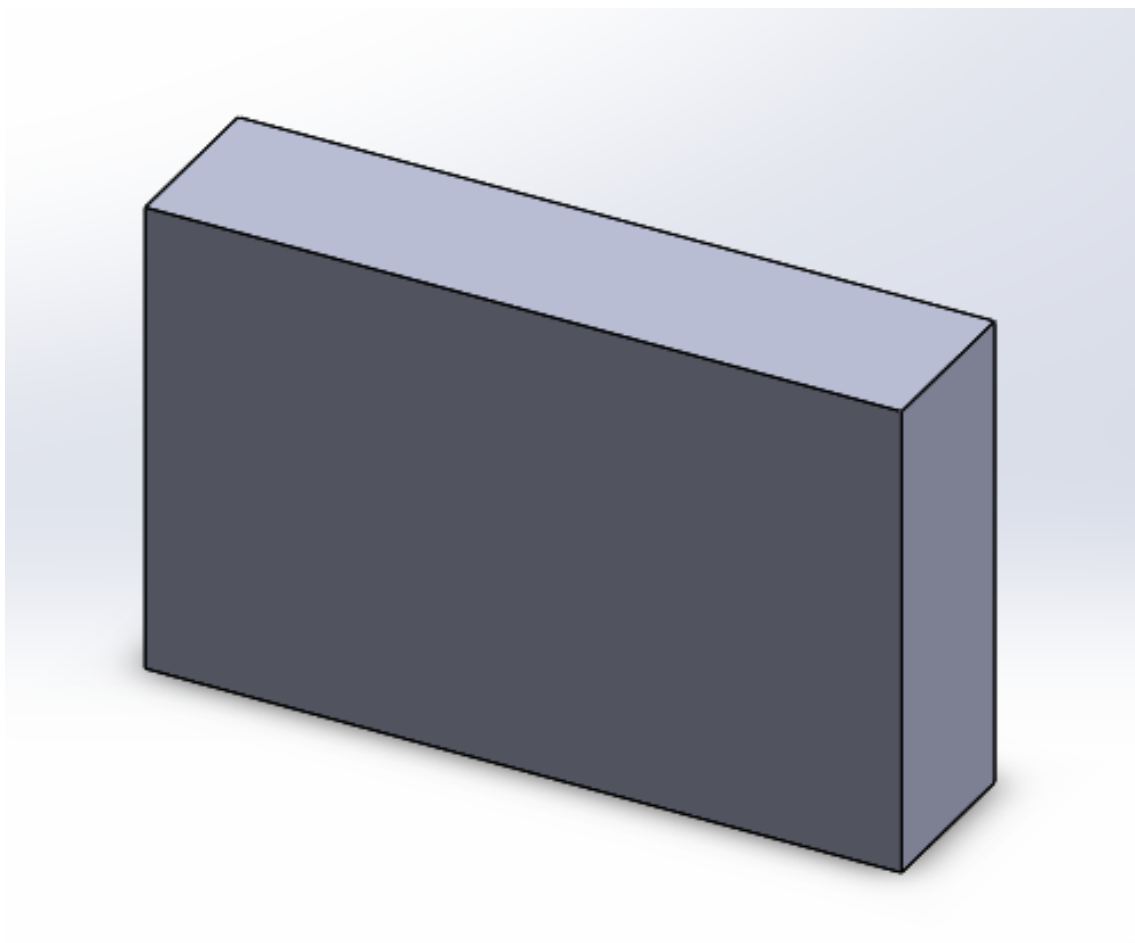


Figura 7.5 Representació 3D de la proveta a compressió

7.4. Proveta a flexió

Les provetes per a l'assaig a flexió han de ser llargues i primes, aquesta geometria característica té l'objectiu de que la peça flecti fàcilment al aplicar carrega en el punt central de la proveta. La geometria més indicada per una proveta que s'assaja a flexió és la prismàtica, ja que si la proveta tingues una secció d'una altra forma presentaria dificultats a l'hora de recolzar-la en el suport o per trobar una superfície on aplicar la carrega, en canvi una proveta prismàtica al tenir cares paral·leles dona unes condicions perfectes per recolzar la peça per una de les cares i aplicar carrega sobre la cara contrària. Si es planteja una altra geometria com podria ser una cilíndrica, seria molt difícil assegurar la estabilitat de la peça al aplicar carrega, es presenta el mateix problema amb una secció triangular, ja que tot i que es podria recolzar fàcilment per una de les cares seria molt difícil trobar una superfície estable on aplicar la carrega.

Tal i com passava amb l'assaig a compressió, la normativa recomana unes dimensions per a dimensionar les provetes de l'assaig que recull, es tracta d'una geometria prismàtica rectangular allargada i prima, ja que com s'acaba de comentar aquesta es la geometria que mes s'adequa al assaig. Les dimensions que la normativa recomana son 12,7 mm d'amplada, 3,2 mm de gruix i 127 mm de longitud, tot i que aquestes dimensions no son obligatòries i poden variar segons les propietats del material que es vol assajar. Com es pot apreciar la tendència que segueix la geometria de les provetes assajades a flexió es relativament mes prima i mes llarga que les provetes per a l'assaig a compressió, tot i que en aquest cas la proveta que s'assajarà a flexió ha de tenir el mateix gruix que la que s'assajarà a compressió, ja que com s'ha comentat amb anterioritat una de les premisses imposades abans de començar el dimensionament de les provetes es que totes les provetes han de compartir una geometria comuna.

Tot i que la normativa no imposa unes dimensions determinades per a la proveta, si que imposa uns certs valors per a un paràmetre geomètric de la proveta. En aquest cas la relació entre la distancia que hi ha entre els dos suports en els quals es recolza la proveta i el seu gruix o 'span-to-depth ratio' ha de tenir un valor al voltant de 16 per tal d'assegurar que l'assaig es realitzarà de manera correcta i no apareixeran complicacions, per tal d'assolir aquest valor es seguirà la mateixa estratègia utilitzada per a dimensionar la proveta a compressió, com ja es te definida la secció comuna i no es pot modificar s'haurà de donar un valor estratègic a la distancia entre els suports per tal d'assolir el valor desitjat de 'span-to-depth ratio', tot i que la distancia entre suports no sigui una magnitud que formi part de la geometria de la proveta te una gran influencia sobre la longitud d'aquesta, per tant al determinar aquest valor juntament amb la secció comuna definida anteriorment quedarà definida la geometria de la proveta per complet.

Per a materials que presenten comportament anisòtrop, la normativa recomana augmentar el valor del 'span-to-depth ratio' fins a 60 per tal d'eliminar la possible influència que aquest comportament del material a causa de la direcció de les seves capes pugi tenir sobre el valor del mòdul elàstic tangencial, ja que normalment aquest valor sol ser sensible al comportament anisòtrop. Aleshores, per assolir aquest valor de 60 serà necessari establir una distancia entre suports mes gran.

;

Wc	T	SR	StD	Lc	Lt	I	A
19	8	12,9903811	62,5	30	500	810,666667	152
19	9	13,4715063	61,11111111	35	550	1154,25	171
19	10	13,8564065	60	40	600	1583,33333	190
19	11	14,1713248	59,09090909	45	650	2107,41667	209
19	12	14,4337567	58,33333333	50	700	2736	228
19	13	14,6558145	57,69230769	55	750	3478,58333	247
19	14	14,8461498	57,14285714	60	800	4344,66667	266
13	4	12,9903811	62,5	15	250	69,3333333	52
13	5	13,8564065	60	20	300	135,416667	65
13	6	14,4337567	58,33333333	25	350	234	78
13	7	14,8461498	57,14285714	30	400	371,583333	91
19	7	14,8461498	35,71428571	30	250	543,083333	133

Taula 7.2 Paràmetres geomètrics de les provetes

Com es pot observar, per assolir un 'span-to-depth ratio' al voltant de 60 es necessitarà una distància entre suports molt elevada, no obstant per tal de facilitar l'assaig s'ha decidit limitar la distància entre els suports a **250 mm**, ja que per tal d'assolir aquest valor de 60 s'hauria d'imposar una longitud molt elevada, cosa que dificultaria la fabricació de la proveta mitjançant la fabricació additiva, a més com s'ha comentat anteriorment es possible que alguns laboratoris no disposin màquines d'assaig com per assolir aquests valors de distància entre suports. Finalment amb la distància entre suports imposada s'obté un 'span-to-depth ratio' de 35,71 que tot i ser inferior al valor de 60 que la normativa recomana per a materials anisòtrops com el PLA, serà suficient per a minimitzar els efectes que aquest comportament pugui tenir sobre el mòdul elàstic.

Finalment, caldrà determinar la longitud total de la proveta, aquesta ha de ser una mica més llarga que la distància entre suports establerta ja que ha de quedar una part de proveta després dels suports a ambdues bandes per tal de garantir l'estabilitat de la peça a l'hora d'assajar-la, ja que al aplicar carrega aquesta flectarà exposant un desplaçament vertical i els punts de contacte de la proveta amb els suports també es mouran, per tant si no es deixa un marge la peça es sortirà dels suports. En aquest cas, la normativa recomana deixar de marge un 10% de la distància entre suports a cada banda de la proveta, per tant per a determinar la longitud total de la proveta caldrà afegir 25 mm a banda i banda a la distància entre suports de 250 mm, aleshores la longitud final de la peça quedarà en uns **300 mm**. Aleshores, les dimensions de la proveta a flexió seran **19 mm** d'amplada, **7 mm** de gruix i **300 mm** de longitud.

A continuació es presenta un croquis del disseny de la proveta amb la seva geometria completament determinada i una representació 3D de la peça.

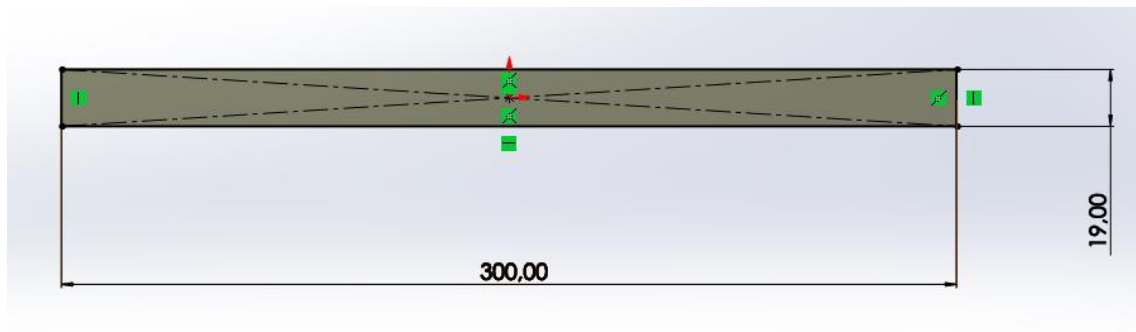


Figura 7.6 Croquis de la proveta a flexió

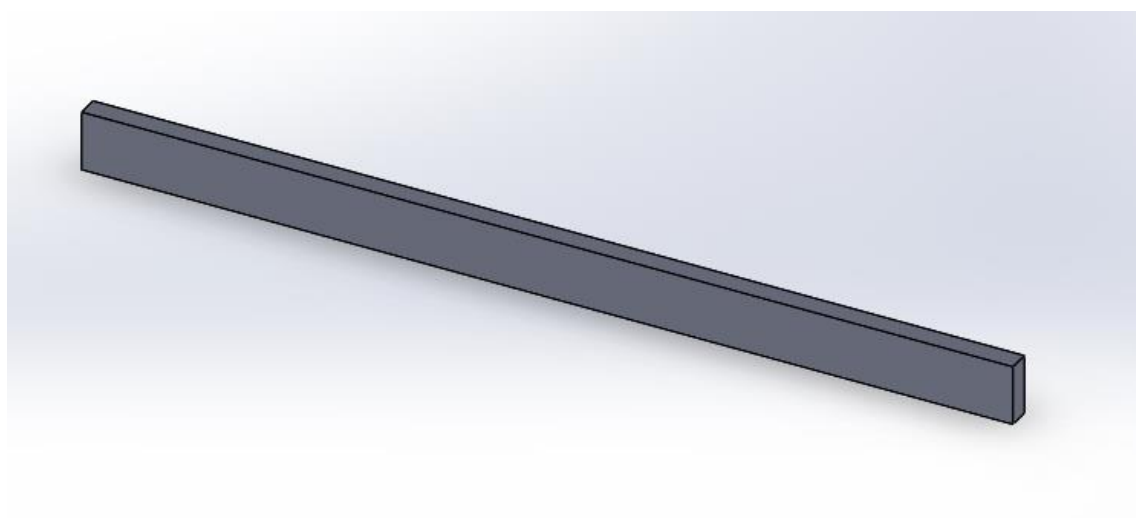


Figura 7.7 Representació 3D de la proveta a flexió

8. Simulació dels assaigs

Un cop definida la geometria de les provetes ja es pot procedir a assajar-les per a recopilar les dades de tensió i deformació per a cada un dels assajos. Com que en aquest treball no es duu a terme la fabricació de les provetes, com s'ha comentat anteriorment s'utilitzarà el software de simulació per elements finits ANSYS® Academic Research Mechanical (15), d'aquesta manera serà possible assajar les provetes dissenyades i obtenir dades de cada una d'elles per tal d'extreure conclusions posteriors. A continuació s'explicarà quins paràmetres s'han establert per a imitar el comportament del PLA i quines condicions de contorn s'han imposat a cada assaig per tractar d'emular les condicions d'assaig del laboratori. Finalment, es recopilaran els resultats de cada un dels assajos mitjançant una sèrie de simulacions sobre cada disseny.

Per a cada assaig es realitzaran un total de 10 simulacions alterant el valor de la carrega aplicada progressivament, es començarà amb una primera simulació amb un valor relativament baix i s'anirà augmentant de manera progressiva fins a arribar a valors de tensió propers al límit elàstic del material, ja que el software no té informació sobre la resistència del material per tant mai arribarà a la fallida per molta carrega que s'apliqui, per tant és important no superar el límit elàstic ja que els valors que s'obtinguin de deformació no seran reals perquè el material entrarà a la zona plàstica i en aquesta el material no es deixa de comportar de manera lineal.

Per a poder realitzar els càlculs pertinents, el software necessita informació sobre el comportament del material, es a dir, com aquest actua al aplicar carrega. Tot i que el PLA es tracti d'un material amb comportament anisòtrop, durant les simulacions se'l tractarà com si fos un material isotròpic ja que això facilita enormement la simulació, això no introduirà una error tan gran com es pugui pensar ja que en els assajos a tracció i a compressió la carrega s'aplica en la mateixa direcció per tant encara que el material sigui anisòtrop aquest es comportarà de la mateixa manera, i pel que fa a l'assaig a flexió ja s'ha dissenyat la geometria de manera que l'efecte de l'anisotropia es redueixi al màxim. Per tant en tots els assajos es definirà el comportament del material com elàstic i isotròpic, aleshores només caldrà introduir els valors del mòdul de Young i del coeficient de Poisson i el material quedarà completament definit, no obstant el valor del mòdul de elàstic serà diferent per a cada assaig, ja que com s'ha comentat anteriorment el PLA és un material asimètric i es comporta diferent segons el tipus de carrega aplicada per tant aquests valors s'hauran d'ajustar segons el tipus d'assaig que es vagi a simular.

8.1. Assaig a tracció

L'assaig a tracció consisteix en col·locar la proveta entre dues mordaces i traccionar-la separant les mordaces de manera equidistant. Abans d'iniciar l'assaig es col·locarà l'extensòmetre a la part central de la proveta el qual s'encarregarà de mesurar la deformació en cada instant a mesura que s'aplica la carrega. Per tal de simular aquest comportament amb el software es seguiran una sèrie de passos que permetran obtenir uns resultats similars als que s'obtidrien en assajar la peça en el laboratori. Primer s'importarà el croquis del disseny des de SolidWorks amb el format igs, després es definirà el tipus d'element que s'utilitzarà per a realitzar els càlculs i es donarà grossor a la peça, posteriorment es procedirà a realitzar el mallat que dividirà la peça en diferents elements del tipus seleccionats anteriorment, i finalment es definiran les condicions de contorn sobre la proveta tractant d'imitar les condicions del laboratori i s'aplicarà la carrega corresponent. Posteriorment, el software realitzarà els càlculs segons les dades introduïdes i es recopilaran els resultats de tensió i deformació a la part central mitjançant una sèrie de gràfics donats pel propi software que indiquen els valors de cada magnitud a les diferents parts de la proveta.

8.1.1. Definició de l'element

Per a triar l'element que s'utilitzarà per a realitzar els càlculs es imprescindible identificar el tipus de simulació que es vol realitzar, en aquest cas es té una superfície plana en la qual se li aplicarà carrega en el seu propi pla, per tant les tensions i deformacions que apareixeran sobre la peça també estaran en aquest pla, aleshores es tracta d'un cas de tensió plana, ja que no hi ha tensions en l'eix perpendicular a la superfície de la peça, aleshores existeixen 2 tipus d'elements per a definir el mallat, el Plane 182 i Plane 183. Entre aquests dos es preferible escollir el **Plane 183**, ja que el element està format per 8 nodes i el 182 per 4, al estar format per 8 nodes s'aconseguirà a una precisió major dels resultats. (10)

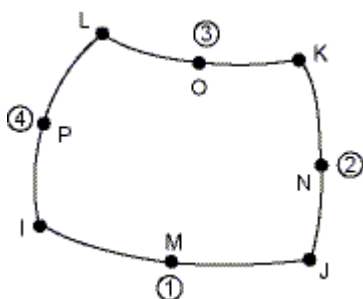


Figura 8.1 Representació de l'element Plane 183 (10)

;

Un cop definit l'element cal indicar el gruix que ha de tenir la proveta, en aquest cas tal i com s'ha determinat anteriorment s'estableix un gruix de 7 mm.

8.1.2. Constants del material i definició del mallat

Com ja s'ha comentat, a l'hora de definir el material al software es negligirà el comportament anisòtrop del material i s'indicarà que es tracta d'un material isotròpic amb comportament elàstic. Al definir aquest tipus de comportament el software requereix que s'introdueixin les constants del mòdul de Young i el coeficient de Poisson per tal de definir el comportament del material per complet, com que aquests valors no es coneixen amb exactitud ja que l'objectiu de l'assaig es precisament la caracterització del material, es triarà un valor intermedi dins del rang de valors els qual s'estima que aquestes constants es troben. No obstant, es coneix que el valor del coeficient de Poisson per al PLA ronda una valor proper al 0,37, per tant s'establirà com a valor predeterminat durant tot l'assaig. Pel que fa al mòdul elàstic a tracció es coneix que te un valor entre 2346 i 2850 MPa, per tant un valor intermedi entre aquests dos com 2500 MPa seria el mes adient.

$$E = 2500 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,37$$

Un cop definit completament el material es necessari definir el mallat per a poder realitzar els càlculs, en aquest cas i al tenir una geometria bastant senzilla el mallat tindrà forma de quadricula especialment en la part central de la proveta, això es així ja que com s'ha comentat anteriorment l'element escollit per a realitzar els càlculs (Plane 183) te un geometria que s'aproxima a un quadrat. Es important escollir minuciosament la mida dels elements que conformen el mallat, ja que si aquets son massa grans la malla estar conformada per poc elements i els càlculs seran inexactes, això provocaria una discontinuïtat en els valor donats entre un element i el seu adjacent i això es un comportament que no s'ajusta a la realitat, per altra banda si es tria unes dimensions molt petites, tot i que la precisió dels resultats serà prou bona el software haurà d'afrontar una gran quantitat de càlculs cosa gens eficient, per tant es important definir unes dimensions intermèdies.

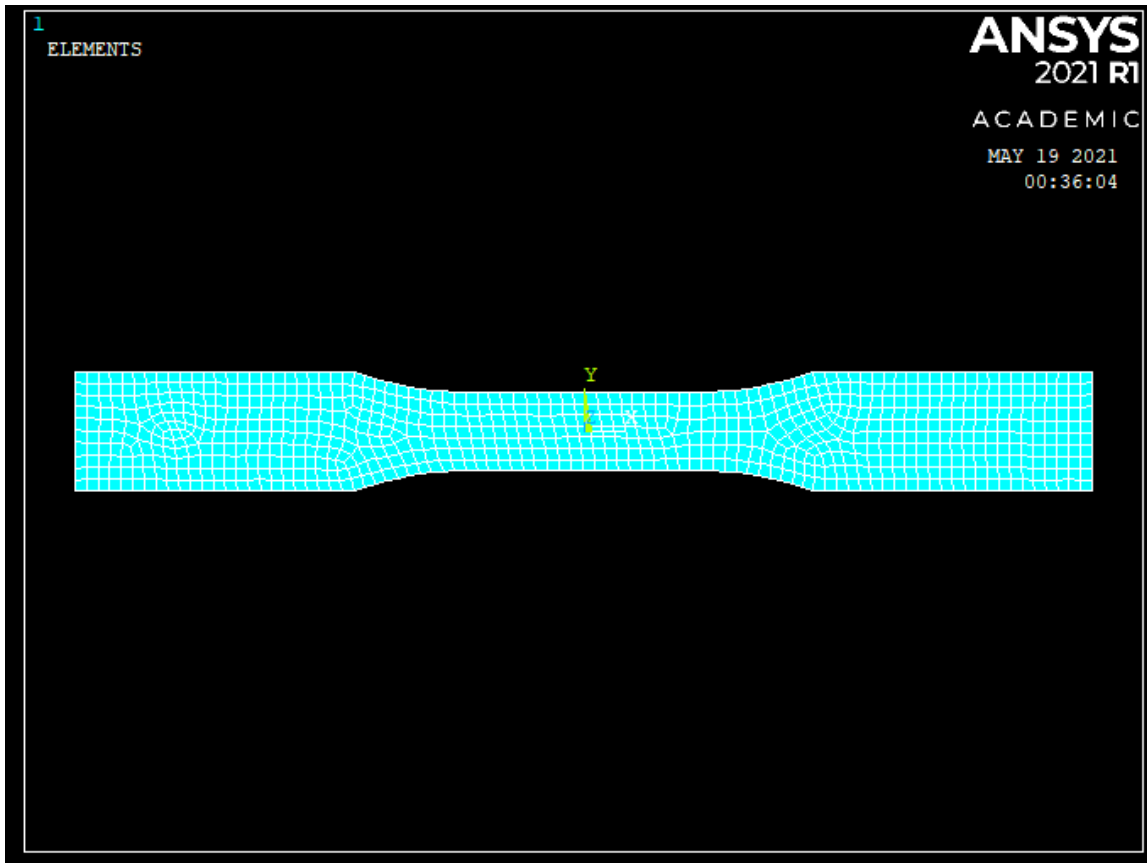


Figura 8.2 Representació del mallat de la proveta a tracció

Finalment, s'ha optat per una dimensió dels elements de 2 que indica que es tracta de la segona dimensió més petita que ofereix el software. Com es pot observar, la malla no segueix exactament una quadrícula a causa del canvi de secció de la proveta, on es poden observar elements orientats en diferents direccions. També es podria optar per refinar la malla a la part central fins a una dimensió de 1, ja que és la zona on s'extrauran les dades en després de cada simulació.

8.1.3. Condicions de contorn

Per tal de tractar d'emular l'assaig de tracció que es pugui realitzar en el laboratori, és imprescindible definir les condicions de contorn de la proveta. Cal restringir el moviment en certes direccions d'alguns nodes de la peça per tal que aquesta es desplaci tal i com ho faria al laboratori.

L'assaig a tracció consisteix en col·locar la proveta entre dues mordaces que la subjecten pels extrems i desplaçar aquestes mordaces en la direcció longitudinal de la proveta però en sentit contrari per a produir tensions i deformacions a la part central de la proveta fins al moment de la fallida del material. Per tant, per tal de replicar aquest comportament es fixarà el moviment vertical de les dues línies de nodes de cada extrem de la proveta i s'anirà donant valors al desplaçament horitzontal o longitudinal progressivament.

;

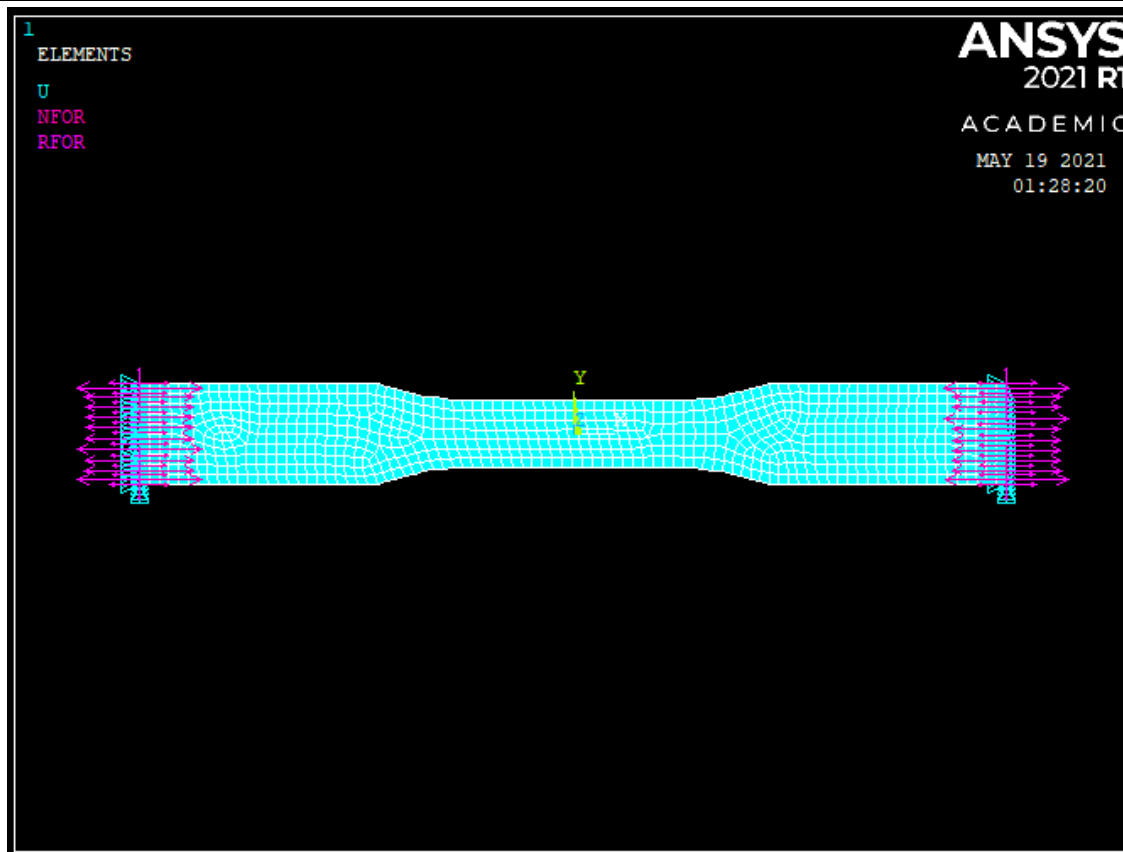


Figura 8.3 Condicions de contorn de la proveta a tracció

Com s'ha comentat anteriorment, es important que les tensions que van apareixen a la part central no superin el valor del límit elàstic a tracció del material, ja que d'aquesta manera s'estaria s'entraria a la zona plàstica de la corba tensió-deformació mentre que el software seguiria realitzant simulacions amb un comportament elàstic lineal. Per tal d'evitar això, només es realitzaran simulacions fins a una separació de 2 mm entre les dues mordaces, es a dir 1 mm per cada banda, per tant com es pretén realitzar 10 simulacions diferents, es començarà fixant el desplaçament vertical de les línies de nodes de cada extrem amb un valor de 0,1 mm, i s'anirà augmentant progressivament a mesura que es prenen les dades fins a 10 mm.

Finalment, un cop ja establides les condicions de contorn el software realitzarà els càlculs pertinents per a cada simulació, si les condicions de contorn s'han definit correctament aquets donarà una solució vàlida.

8.1.4. Resultats dels assaigs

Un cop el software arriba a una solució, aquest dona la opció de mostrar resultats de diferents magnituds de diferents maneres. Una manera bastant visual es mostrar uns gràfics de colors que indiquen els valors de tensió i deformació als diferents punts de la proveta, també hi ha la opció de veure en quina mesura s'ha deformat la peça per a assegurar que la simulació s'ha realitzat de manera correcta.

En aquest assaig el software calcula directament els valors de tensió i deformació per a cada punt de la peça, per tant no es necessari realitzar cap càlcul posterior a la simulació. El software calcula es valors de cada magnitud per a cada un dels elements o per a cada node que formen aquests elements, en aquest cas s'ha optat per mostrar la solució dels nodes i per a prendre els valors després de cada simulació s'ha escollit el node central de la malla, d'aquesta manera s'emula el comportament que tindria la presa de dades durant l'assaig al laboratori, ja que s'obtidria directament el valor de la deformació de la proveta en la part central segons la carrega aplicada mitjançant un extensòmetre.

A continuació es mostren els resultats obtinguts al separar les mordaces 1 mm entre elles imposant un desplaçament horitzontal de -0,5 mm i 0,5 mm per a cada extrem de la peça. També es mostra com s'ha deformat la proveta al aplicar la carrega.

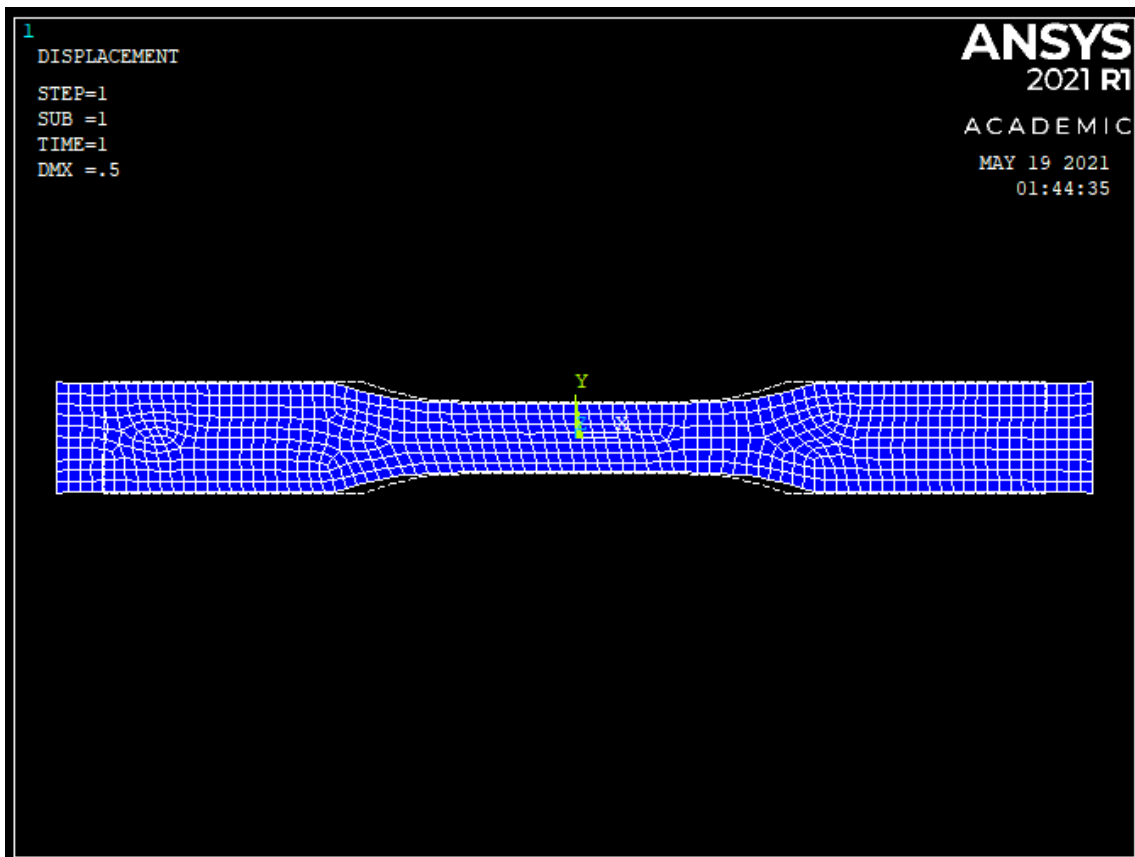


Figura 8.4 Representació de la proveta a tracció post assaig

;

Com es pot observar la proveta s'estira de manera simètrica tali com succeiria en el laboratori ja que les dues mordaces estirarien amb la mateixa força, si s'observa la figura amb detall es pot observar com a part del clar desplaçament que la proveta pateix a banda i banda per parts iguals, el conjunt de l'amplitud de la proveta ha disminuït especialment en la part central d'aquesta, aquest fenomen va en augment a mesura que la carrega sobre la proveta augmenta provocant finalment el fenomen d'estricció en el qual l'amplitud de la proveta disminueix ràpidament i es produeix la fallida del material. No obstant, això significaria entrar en la zona de deformació plàstica del material la qual cosa queda fora de l'estudi d'aquest projecte.

A continuació es mostren els mapes de tensió i deformació corresponents un desplaçament de 0,5 mm per banda.

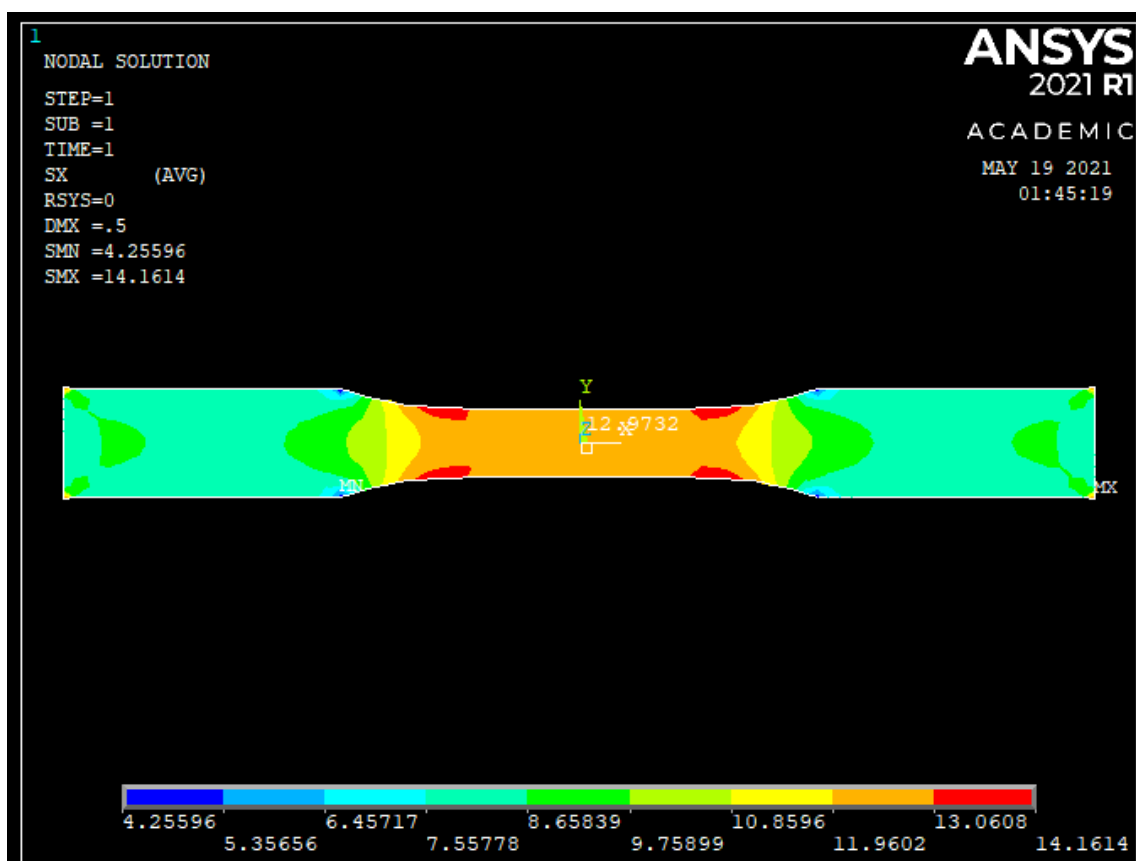


Figura 8.5 Distribució de tensions de la proveta a tracció per a una separació de 0,5 mm per banda

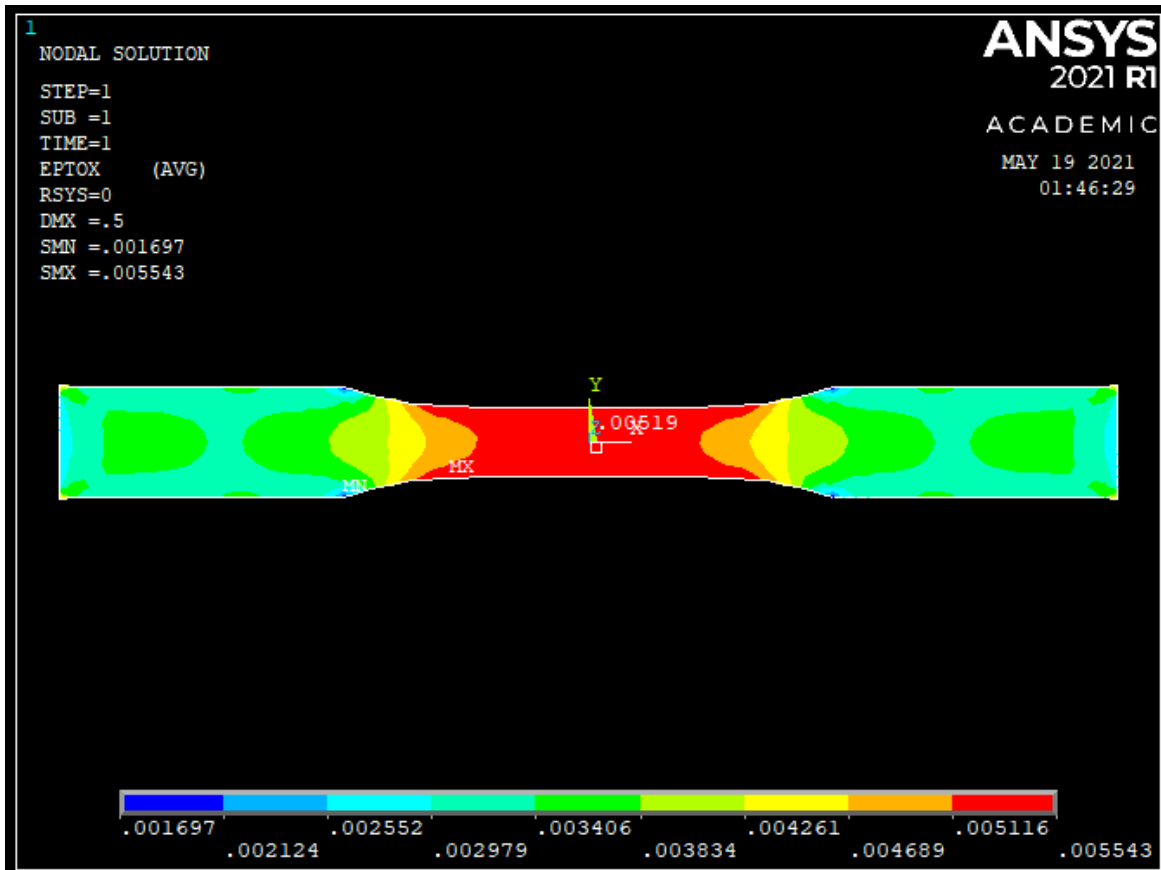


Figura 8.6 Distribució de deformacions de la proveta a tracció per a una separació de 0,5 mm per banda

Les figures anteriors mostren les distribucions de tensions i deformacions de la proveta per a un desplaçament dels extrems de 0,5 mm, com es pot apreciar en ambdós casos apareix una simetria, es a dir les tensions i deformacions a la dreta de la proveta son les mateixes que a l'esquerra, això es indicatiu que la simulació s'ha realitzat correctament i els valors que mostren les gràfiques son fiables. Com era de esperar, els valors màxims per a les tensions tant com per a les deformacions s'assoleixen a la zona central de la proveta ja que esta dissenyada per tal de que sigui així, en ambdós gràfics aquesta zona central te el mateix color, es a dir que les tensions i deformacions son uniformes i no hi ha discontinuïtats significatives al llarg de l'eix longitudinal de la proveta, si que es cert que en els extrems apareixen singularitats amb valors mes alts de tensió i deformació del que s'esperaria, però no s'han de tenir en compte ja que apareixen a causa de la simulació i no es tindrien en un assaig real.

;

Finalment, els valors assolits per a un desplaçament de 0,5 mm a cada banda son d'una tensió de 12,973 MPa i 0,00619 per a la deformació. S'han realitzat 9 simulacions mes alterant el desplaçament longitudinal dels extrems i en totes s'ha obtingut unes distribucions de tensions i deformacions semblants amb diferents valors. A continuació es mostra una taula amb tots els de tensió i deformació recollits per a cada un de les 10 simulacions realitzades.

N Sim	Tensió (MPa)	Deformació (mm/mm)
1	2,595 MPa	0,001083
2	5,189 MPa	0,002076
3	7,784 MPa	0,003114
4	10,378 MPa	0,0041152
5	12,973 MPa	0,00519
6	15,568 MPa	0,006227
7	18,568 MPa	0,007265
8	20,757 MPa	0,008303
9	23,352 MPa	0,009341
10	25,946 MPa	0,01038

Taula 8.1 Dades de la simulació de l'assaig a tracció

8.2. Assaig a compressió

El procediment per duu a terme l'assaig a compressió es bastant senzill, consisteix en col·locar la proveta prèviament dissenyada a la maquina d'assaig i aplicar una pressió per tal de deformar-la. Per a realitzar la simulació de l'assaig es seguirà un procediment semblant al utilitzat en la simulació de l'assaig a tracció. Primer de tot, s'importarà el croquis de la proveta des de SolidWorks tal i com es va fer amb la proveta a tracció, posteriorment es definiran els paràmetres per duu a terme la simulació com el tipus d'element, les constants del material i el mallat, finalment s'aplicaran les condicions de contorn per tractar d'imitar el procediment de l'experiment que es realitza al laboratori i el software mostrarà els resultats corresponents a cada simulació.

8.2.1. Definició de l'element

En la simulació l'assaig a compressió es presenta una situació molt semblant a l'assaig a tracció ja que s'aplica carrega en la mateixa direcció però en sentit contrari, i tot i que la geometria de la proveta sigui diferent les tensions resultats seran del mateix tipus. Per tant, en aquest cas torna a haver-hi una situació de tensi plana ja que totes les tensions apareixeran en el pla de la peça a causa de l'esforç d'aixafament tot i que en aquest cas aquestes tensions eren de compressió, aleshores el mes adient es tornar a triar l'element **Plane 183** per a conformar el mallat, ja que tal i com s'ha explicat anteriorment es el que obté resultats mes precisos a l'hora de fer càlculs en situacions de tensió plana. Finalment se li aplicarà in gruix de 7 mm gruix a la superfície importada.

8.2.2. Constants del material i definició del mallat

Com s'ha comentat anteriorment es defineix el material coma isotròpic lineal per a representar el comportament elàstic del PLA, tot i que aquest tingui un comportament anisòtrop es negligeix per a realitzar les simulacions per raons explicades anteriorment.

Tot i tractar-se del mateix material que s'ha simulat a l'assaig a tracció seria un error definir-lo de la mateixa manera, ja que com s'ha comentat el PLA es un material asimètric i per tant no es comporta de la mateixa manera si s'apliquen forces a tracció que a compressió. Per tant, com que el software necessita els valors del mòdul de Young i el coeficient de Poisson aquests es definiran segons el comportament a compressió del material. En aquest cas, com s'ha vist anteriorment el valor del mòdul elàstic a compressió esta entre 1000 i 1640 MPa, per tant per a la primera iteració s'ha escollit un valor intermedi de 1300 MPa, pel que fa al coeficient de Poisson per a totes les simulacions es de 0,37, ja que es un valor conegut del material.

$$E = 1300 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0,37$$

A continuació, es procedirà a realitzar el mallat amb el tipus d'element escollit, en aquest cas el Plane 183. En aquest cas al tractar-se d'elements quadràtics i al tenir la proveta una geometria rectangular, un mallat en forma de quadricula encaixa perfectament en la geometria de la proveta. Pel que fa a la grandària dels elements, com succeeix amb el mallat de la proveta a tracció cal escollir una grandària optima com per obtenir resultats precisos sense irregularitats entre elements però sense que el software es vegi obligat a realitzar una gran quantitat de càlculs, en aquest cas al tenir que mallar una superfície menor que la que es tenia a la simulació de l'assaig a tracció es recomanable reduir una mica la grandària, ja que al imposar elements mes petits caben mes dins del mallat. Per tant, s'ha imposat una grandària dels elements de 1, que es la mes petita que el software permet.

;

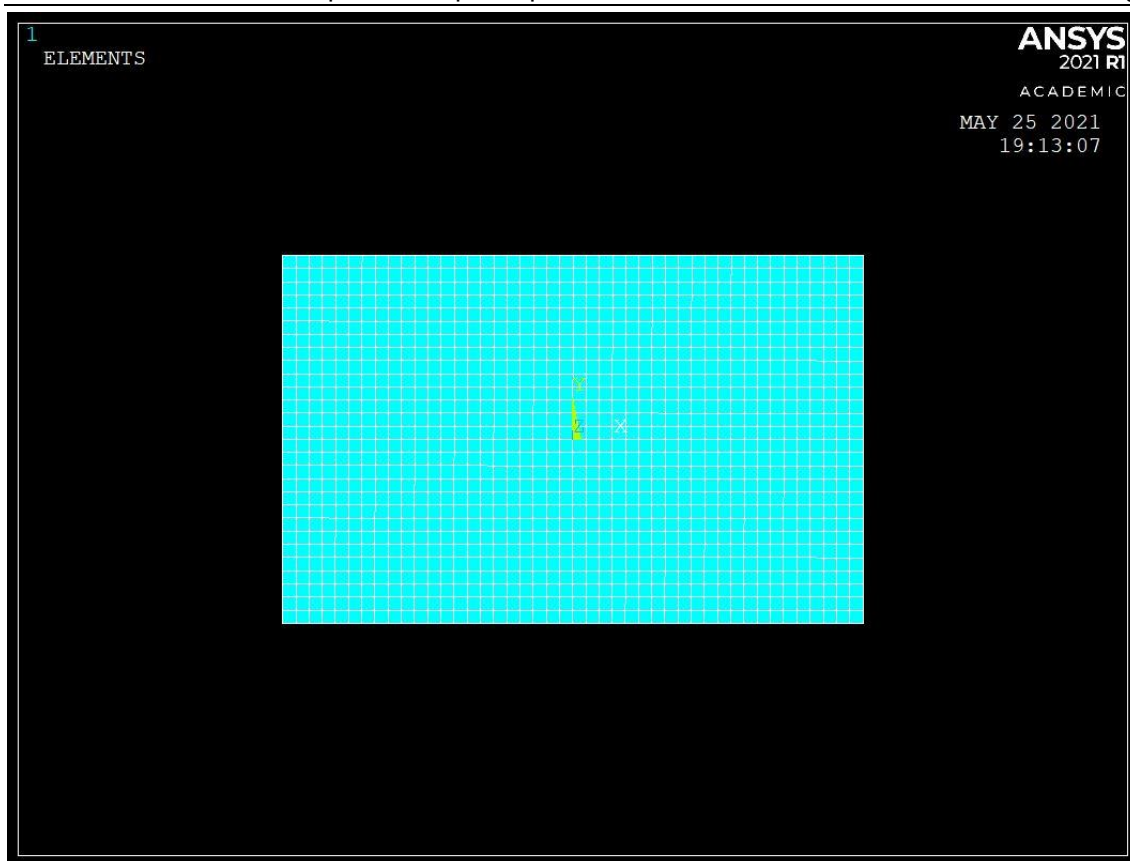


Figura 8.7 Representació del mallat de la proveta a compressió

8.2.3. Condicions de contorn

A continuació, s'explicaran les condicions de contorn que se li han aplicat a la peça, es a dir quins moviments s'han restringit i com s'ha fet per aplicar la carrega per tal de poder realitzar la simulació de l'assaig a compressió el mes semblant possible a com es faria al laboratori.

L'assaig a compressió consisteix en col·locar la proveta dins de la maquina recolzada sobre una superfície plana, aleshores amb una altra superfície plana mòbil que entra en contacte amb la proveta s'aplica un esforç de compressió uniforme a la superfície superior de la proveta per tal de veure en quina mesura es deforma segons la tensió aplicada en cada moment. En aquest cas, s'ha tractat d'emular aquest comportament fixant el moviment longitudinal de la línia de nodes de la superfície esquerra de la proveta i el moviment transversal del node central d'aquesta línia, això representaria el contacte de la superfície inferior amb la maquina ja que al estar recolzada no es desplaçaria cap avall a causa de la força aplicada per l'altre cara, s'ha fixat nomes un node en la direcció transversal deixant lliure el moviment en els altres nodes, d'aquest manera es suposa un fregament gaire be nul.

Cal remarcar, que per a emular correctament el comportament de la proveta al laboratori el més adequat seria fixar només el desplaçament de la superfície inferior en la direcció longitudinal de la peça, ja que realment la peça queda fixada a causa de la compressió entre les dues superfícies i no hi ha cap fixació addicional que impedeixi el moviment de la peça transversalment a part del coeficient de fricció entre la màquina i la proveta, no obstant cal restringir el moviment transversal en almenys 1 dels nodes de la línia perquè sinó el software no es capaç de resoldre el sistema per falta d'informació.

Finalment, s'ha aplicat una pressió constant a la línia de nodes contrària la qual representa la superfície superior de la proveta on s'aplica la carrega, també s'ha fixat el desplaçament horitzontal aplicant la mateixa hipòtesi. Com s'ha fet en els 3 assaigs s'han realitzat un total de 10 simulacions amb diferents valors d'aquesta carrega uniforme fins a un valor de 30 MPa, que és on normalment comença el comportament plàstic del material per a esforços a compressió en provetes amb geometries similars.

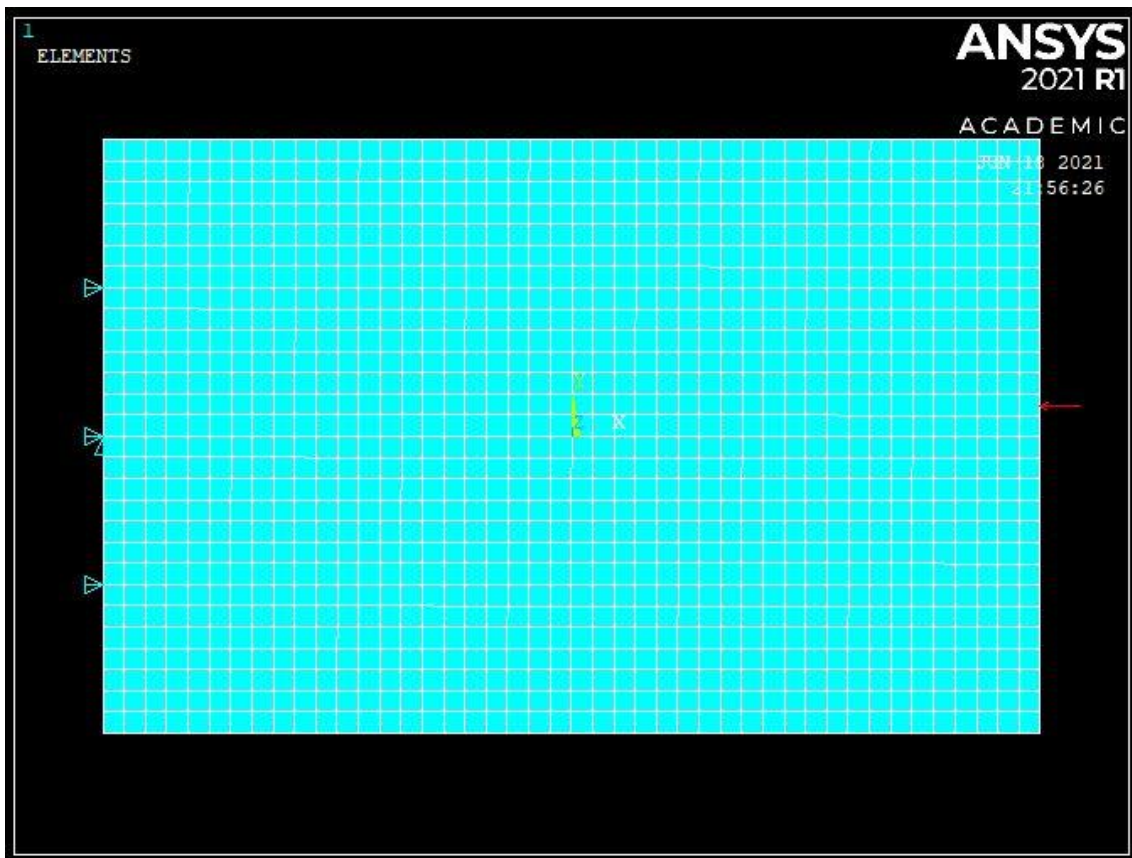


Figura 8.8 Condicions de contorn de la proveta a compressió

8.2.4. Resultat dels assaigs

Al definir les condicions de contorn de manera correcta com s'ha explicat anteriorment el software es capaç d'arribar a una solució. Per tal d'extreure els valors tensió i deformació calculats pel software a partir de les dades introduïdes als diferents punts de la peça, s'utilitzaran eines visuals com els mapes de distribucions de tensió i deformació utilitzats en les simulacions de l'assaig a tracció.

En aquest cas s'utilitzaran els mapes de distribució de tensions per veure que realment la proveta esta sotmesa a la tensió que se li ha imposat i per veure si aquesta es uniforme al llarg de la proveta o no, també es mostrarà un mapa de distribució de desplaçaments en mm, per tal de veure en quina mesura s'ha reduït la longitud de la proveta al aplicar la carrega, tot i que el software doni valors de desplaçament per a cada punt de la proveta el valor important es el desplaçament longitudinal dels punt de la cara superior de la proveta ja que aquest serà el valor tota que la proveta s'ha encongit, i amb uns càlculs posteriors a la simulació es trobaran els valors de deformació segons la quantitat de carrega aplicada, per tant en cada simulació es recollirà el valor de desplaçament d'aquests punts. A continuació es mostra una imatge amb la forma de la proveta després de l'assaig on es pot apreciar la deformació produïda al aplicar una carrega de 15 MPa sobre la proveta.

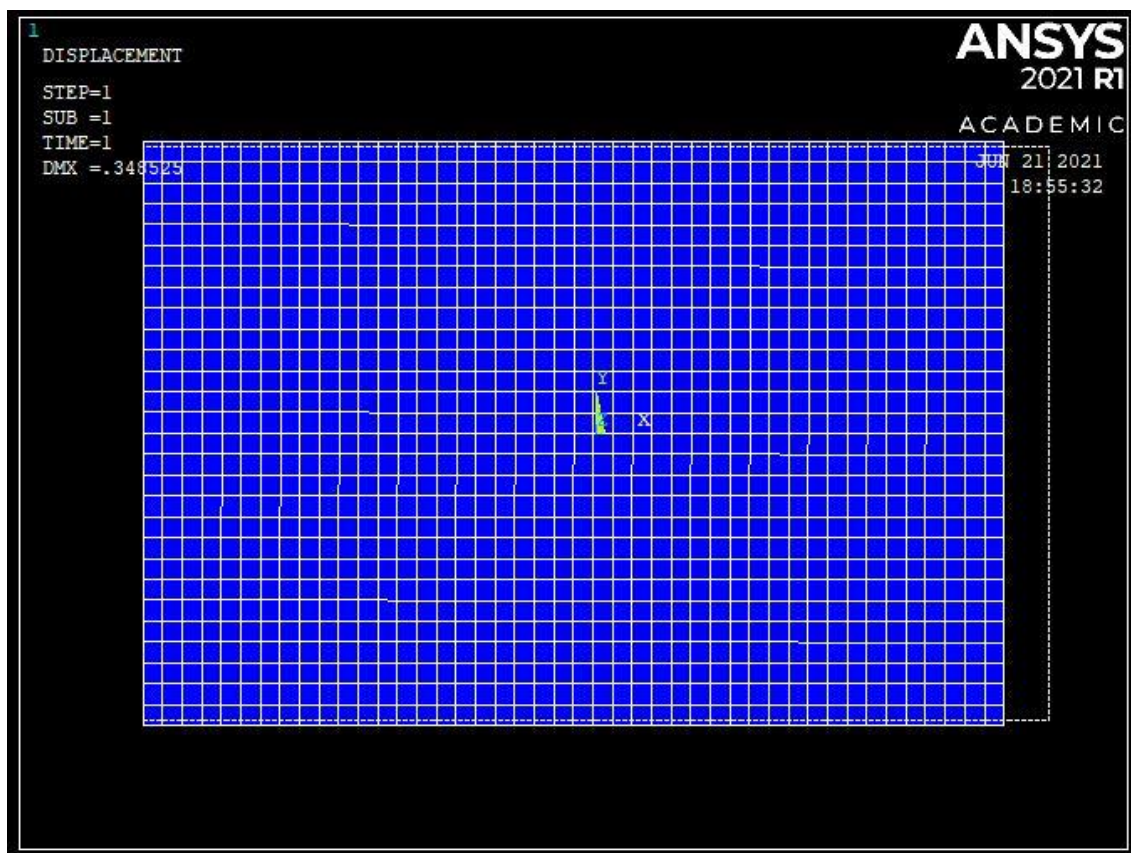


Figura 8.9 Representació de la proveta a compressió post assaig

Com es pot observar en la figura anterior, la proveta a patit un escurçament de la seva longitud al aplicar la carrega, si s'observa amb detall es pot apreciar com a banda de disminuir la seva longitud també ha augmentat en menor mesura la seva amplitud, aquest es un comportament esperat a causa del seu coeficient de Poisson i per tant es pot concloure que la simulació s'ha realitzat de manera correcta.

A continuació es mostren els mapes de distribució de tensió i deformació de la proveta al aplicar una tensió de 15 MPa sobre aquesta.



Figura 8.10 Distribució de tensions de la proveta a compressió per a una tensió de 15 MPa

;

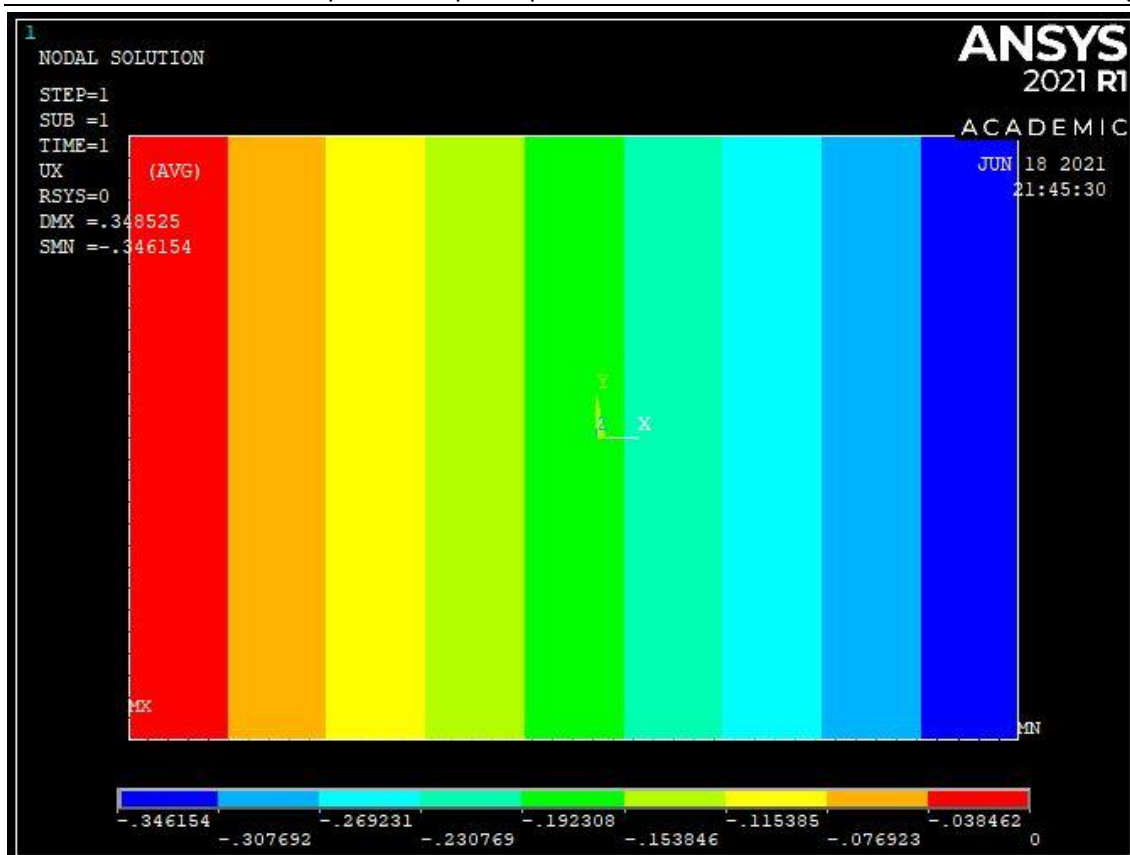


Figura 8.11 Distribució de desplaçaments de la proveta a compressió

En les figures anteriors es pot apreciar la distribució de tensions i el desplaçament a les diferents zones de la proveta al aplicar una tensió de 15 MPa sobre aquesta. Si s'observa el mapa de tensions es pot apreciar com hi ha una distribució uniforme de tensions i no existeix una gran diferència entre els valors assolits als diferents punts de la peça, ja que en tots els punts de la proveta s'assoleixen valors de tensió al voltant de 15 MPa que és la carrega que s'ha aplicat, per tant es pot concloure que les dades donades pel software són correctes. No obstant, la distribució de tensions en un assaig al laboratori no seria exactament la que mostra la figura ja que tot i aplicar una tensió de 15 MPa a la superfície superior, les tensions a la base de la proveta serien majors a causa del pes propi de la proveta i aquest és un fenomen que el software no té en compte a l'hora de realitzar els càlculs, no obstant al ser una peça de petites dimensions l'efecte del propi pes de la proveta sobre les tensions és negligible i no distorsionaria els resultats en gran mesura.

Pel que fa a les deformacions que es produeixen a la proveta es pot observar que aquestes són majors a la part superior de la proveta i van disminuint progressivament a mesura que s'acosta a la base, això és així perquè al estar la peça recolzada sobre una superfície plana està restringit el desplaçament de la superfície inferior i els punts més propers aquesta tenen menys marge de moviment que els que estan a la part superior.

Tot i així, els punts dels qual interessa conèixer el seu desplaçament longitudinal son els de la superfície superior, ja que com s'ha comentat amb anterioritat son els que indiquen l'escorçament de la proveta, valor necessari per a calcular la deformació que pateix la proveta al aplicar la carrega. En el cas que presenta la figura anterior, es pot observar un escurçament de la proveta de **0,346 mm** produïda per una tensió de 15 MPa.

A continuació, es mostra una taula amb el desplaçament longitudinal de la superfície superior de la proveta per cada una de les 10 simulacions realitzades i el valor de tensió aplicada en cada una d'elles.

N Sim	Tensió (MPa)	Desplaçament (mm)
1	3	0,0689
2	6	0,1368
3	9	0,2053
4	12	0,2737
5	15	0,3461
6	18	0,4106
7	21	0,479
8	24	0,5474
9	27	0,6158
10	30	0,6843

Taula 8.2 Dades de la simulació de l'assaig a compressió

;

8.3. Assaig a flexió

Com ja s'ha comentat, en aquest cas es durà a terme l'assaig a flexió a 3 punts, aquest consisteix en col·locar la proveta tal i com s'ha dissenyat anteriorment recolzada per 2 suports, un a cada extrem, posteriorment s'aplicarà carrega a la superfície contraria on els recolza la peça en un punt equidistant entre els 2 suports, d'aquesta manera es produirà una flexió a sobre la proveta que anirà augmentant progressivament amb la càrrega.

Com ja s'ha fet amb els assajos anteriors, es faran un total de 10 simulacions amb diferents valors de carrega, i en cada una d'aquestes simulacions es recolliran el valors de força aplicada (N) i desplaçament vertical màxim (mm), el qual es produirà en el punt central de la peça, exactament en el punt d'aplicació de la força a causa de la configuració de l'assaig, ja que serà en aquell punt on s'assolirà el moment flector màxim com ja s'ha comentat anteriorment.

8.3.1. Definició de l'element

En aquest cas, tot i tenir el croquis per importar dins del software no es presenta la situació de tensió plana sobre aquest tal i com succeïa amb els assajos anteriors. Per aquest motiu, s'ha decidit utilitzar l'element **Solid 185**, aquest element es ideal per a simulacions d'estructures volumètriques.

El Solid 185 es tracta d'un element tridimensional format per 8 nodes, aquest pot adoptar diferents formes tot i mantenint els nodes, algunes d'aquestes formes son tetraèdrica, prismàtica o hexagonal. L'element es totalment deformable i disposa de 3 graus de llibertat per cada node, per aquest motiu serà necessari imposar les condicions de contorn adequades per tal que el software pugui realitzar els càlculs de manera correcta i així donar resultats coherents. (10)

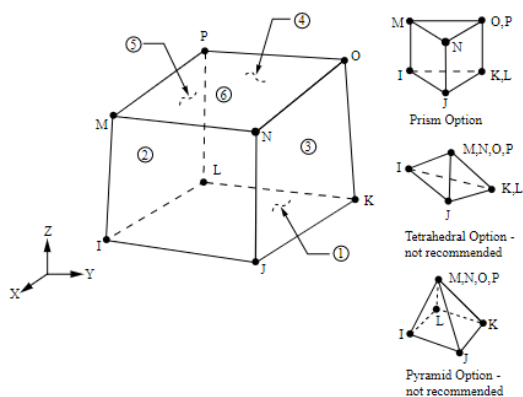


Figura 8.12 Representació de l'element Solid 185 (10)

8.3.2. Constants del material i definició del mallat

Per tal de replicar el comportament que tindria una proveta fabricada amb PLA amb les dimensions establertes caldrà definir les constants que defineixen el material. Com s'ha fet en totes les simulacions anteriors, es defineix el PLA com un material isotròpic amb comportament lineal negligint el seu comportament anisòtrop per raons esmentades anteriorment, aleshores caldrà introduir en el software els valors de mòdul de Young i coeficient de Poisson per que aquest pugui realitzar els càlculs necessaris. Com que en aquest cas s'està sotmetent el material a esforços de flexió no es possible seguir el procediment que s'ha seguit en simulacions anterior de introduir un valor inicial de referència per al mòdul elàstic, ja que com s'ha comentat el valor d'aquest es diferent segons es tingui tracció o compressió, i al sotmetre la peça a un esforç de flexió apareixen els dos simultàniament. Per aquest motiu, es definirà la proveta amb les dimensions especificades però estarà formada per 2 materials diferents, un definit de la mateixa manera que s'ha definit el PLA a tracció el qual anirà des de la base de la proveta fins a l'eix neutre d'aquesta que es la zona on apareixeran esforços de tracció, i l'altre material es definirà com s'ha definit el PLA a compressió i estar situat des de l'eix neutre fins a la superfície superior de la proveta que es on apareixeran esforços de compressió.

Per tal de determinar la posició de l'eix neutre es farà servir una equació que permet calcular la distància des de la base de la proveta fins a l'eix neutre, aquest paràmetre permetrà definir els gruixos dels 2 materials dels que estarà formada la proveta en el qual influeixen els valors del mòdul elàstic a tracció i a compressió, així com paràmetres característics de la geometria de la proveta.

$$h_b = \frac{h}{1 + \left(\frac{E_T}{E_C}\right)^{1/2}} \quad h = h_t + h_b$$

Equació 8.1 Càlcul de la posició de l'eix neutre (11)

Per a un mòdul elàstic a tracció de 2500 MPa i un mòdul a compressió de 1300 MPa, s'obté $h_b = 2,933 \text{ mm}$. Per tal de simplificar la geometria s'imposarà un gruix de 3 mm per al material definit a tracció i 4 mm per al definit a compressió, posteriorment s'enganxaran els 2 materials per tal que no es separin al aplicar la càrrega.

;

Pel que fa a la definició del mallat, s'ha dividit la proveta en 50 al llarg de l'eix longitudinal, en 10 mes al llarg de l'eix transversal i 5 divisions mes al llarg del gruix de la proveta, obtenint un total de 2500 elements que calcularan diferents valors de tensió i deformació, s'ha definit una longitud de 250 mm ja que en la simulació només es té en compte la part de la proveta que està entre els suports que la subjecten i no s'analitza els 25 mm sobrants per cada extrem ja que no tenen cap importància en el comportament de la proveta al aplicar la carrega i només serveixen per garantir l'estabilitat de la proveta durant tot l'assaig.

A continuació es mostra una imatge de la geometria de la proveta amb el seu mallat construïda des de zero en el propi software.

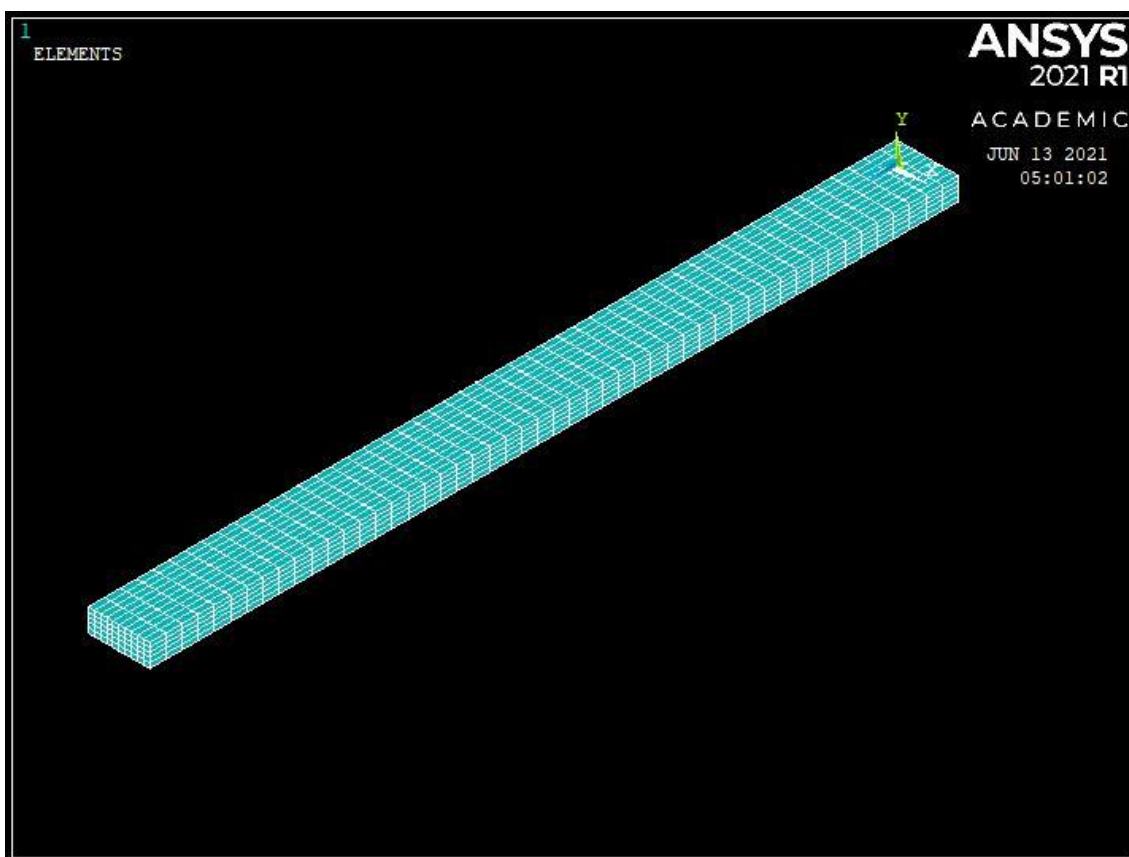


Figura 8.13 Representació del mallat de la proveta a flexió

8.3.3. Condicions de contorn

Per tal d'emular el comportament de la proveta al laboratori cal determinar unes condicions de contorn per tal de reproduir els elements que intervenen en l'assaig. Per començar, cal definir els punts de contacte de la proveta amb els suports, per tal d'aconseguir-ho cal restringir els moviments de certes direccions en els nodes de cada extrem. Tot i que el més lògic seria restringir el moviment vertical en aquets nodes ja que principalment un suport evita que la peça es desplaci cap avall i permet la resta de moviments com el desplaçament horitzontal o la rotació en diferents eixos, en aquest cas aquestes restriccions de moviment no són suficients ja que deixen masses graus de llibertat sense restringir en aquests nodes i el software no és capaç de realitzar els càlculs pertinents amb les dades introduïdes. Per aquest motiu, s'ha restringit el moviment en totes les direccions de les files de nodes inferiors de cada extrem, d'aquesta manera es simula el contacte amb els suports i al restringir el moviment en els eixos X i Z a part del eix Y, es suposa un cas de fregament infinit, d'aquesta manera es simplifica la simulació i un cop aplicada la carrega el software serà capaç d'arribar a una solució.

Finalment, s'aplicarà una força puntual en el node central de la superfície superior de la proveta la peça just en la divisió número 50 del mallat, aquesta força tindrà una direcció i sentit en l'eix Y negatiu i el seu valor serà diferent per a cada una de les 10 simulacions que es realitzaran. Aquest valor anirà augmentat progressivament amb el nombre de simulacions des de un valor de 10 N de precàrrega fins a un valor màxim de 100 N, ja que aquest valor de força provocarà unes tensions en la part central de la peça d'uns 40 MPa, valor a partir del qual el material deixa de tenir un comportament lineal i entra en la zona de deformació plàstica, la qual queda fora del abast d'estudi d'aquest projecte.

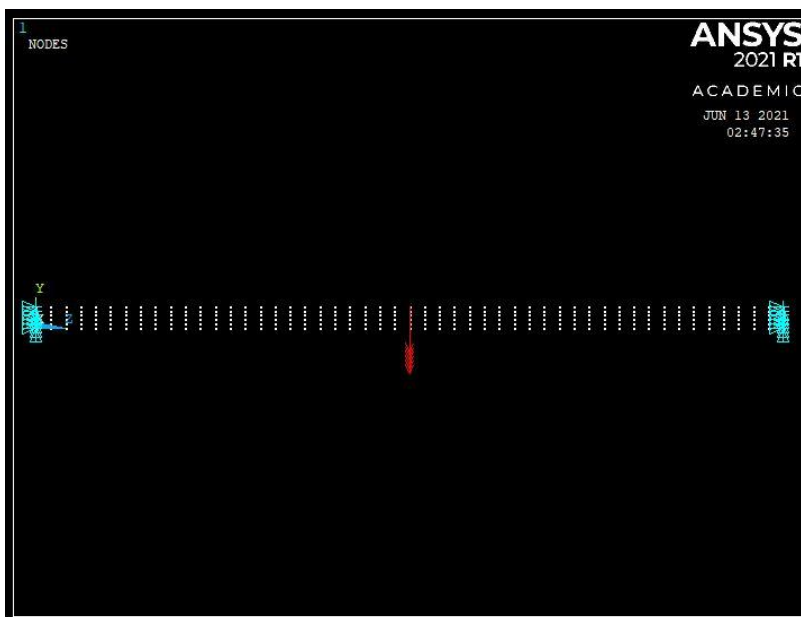


Figura 8.14 Condicions de contorn de la proveta a flexió

;

8.3.4. Resultats dels assaigs

Per tal de mostrar els resultats de les simulacions de manera visual es seguirà el mateix procediment que s'ha emprat en les simulacions dels assaigs anteriors. Es mostraran uns mapes de colors que indiquen la distribució de tensions i deformacions al llarg de tota la peça.

En aquest cas, els valors recollits a partir de les diferents simulacions no són valors de tensió i deformació tal i com succeïa amb assaigs anteriors, sinó es recolliran valors de desplaçament vertical a partir del gràfic de distribució de desplaçaments verticals. Aquests valors de desplaçament es prendran en el punt central de la peça en cada una de les 10 simulacions realitzades, això és així ja que el valor necessari per al càlcul del mòdul elàstic a flexió és el desplaçament vertical màxim o flexió màxima i aquesta es produeix en el punt d'aplicació de la força en l'assaig de flexió de 3 punts, ja que a causa de la configuració de l'assaig en aquest punt es on apareix el màxim moment flector al llarg de tota la peça.

A continuació es mostra una figura de la distribució del moment flector al llarg de la proveta per a un valor de força aplicada de 50 N, el qual assoleix un valor màxim de 3125 Nmm en el punt d'aplicació de la força.

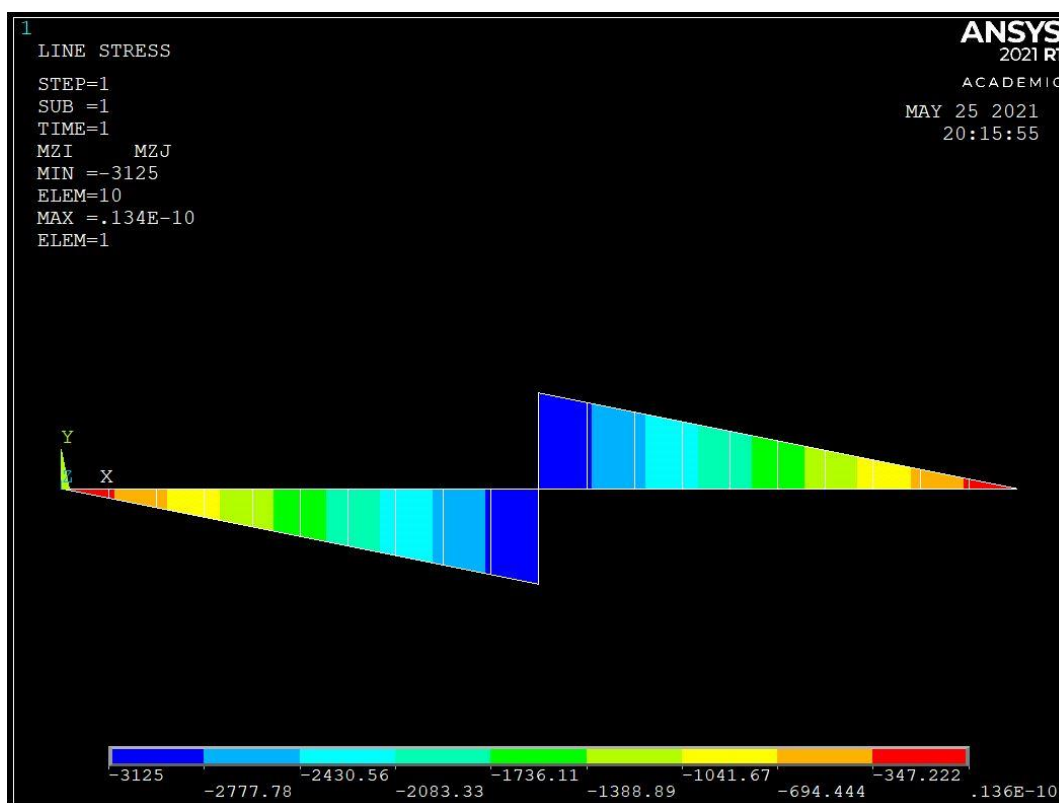


Figura 8.15 Distribució de moment flector al llarg de la proveta a flexió

Finalment, es comparen les dades de desplaçament vertical màxim (mm) en front a la seva respectiva força aplicada (N) per a cada simulació, que es va augmentant progressivament de 0 a 100 N al llarg de 10 simulacions, tal i com s'ha fet en els assaigs anteriors. Es prenen aquests dos valors ja que son necessaris per al càlcul del mòdul elàstic juntament amb altres paràmetres característics de la geometria de la secció, com dimensions de la secció i separació entre suports, els quals mitjançant certes equacions explicades anteriorment permeten el càlcul del mòdul elàstic i dels valors de tensió i deformació de la proveta per als diferents valors de força aplicada.

A continuació es mostra una imatge que presenta en la forma final de la proveta després de la simulació per a una força de 50 N.

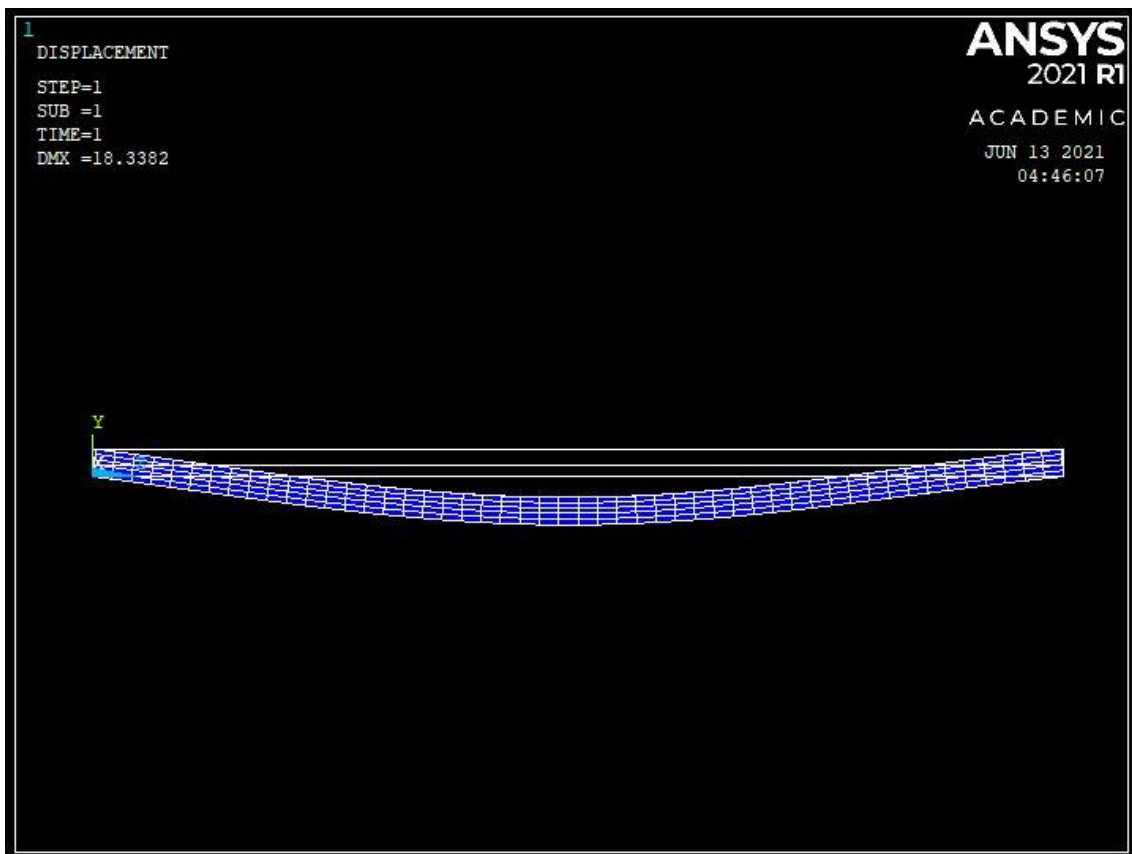


Figura 8.16 Representació de la proveta a flexió post assaig

Com es pot observar, es produeix una deformació simètrica que coincideix amb la distribució de moment flector al llarg de la peça vista anteriorment.

;

Es pot apreciar com als extrems on la peça esta recolzada sobre els suports la deformació d'aquesta es mínima perquè el moment flector en aquests punts es nul, això es així perquè en els punts de contacte de la proveta amb els suports es on estan aplicades les forces resultants que s'oposen a força aplicada en el punt central per tal de mantenir la proveta en equilibri, i aquestes forces col·locades als extrems de la peça son les que generen el moment flector que va augmentant progressivament amb la distancia als suports fins al punt central de la peça, on s'assoleix el valor màxim el qual produeix el desplaçament vertical màxim en aquest punt.

A continuació es mostren les distribucions de desplaçament vertical al llarg de la peça per a una força aplicada de 50 N.

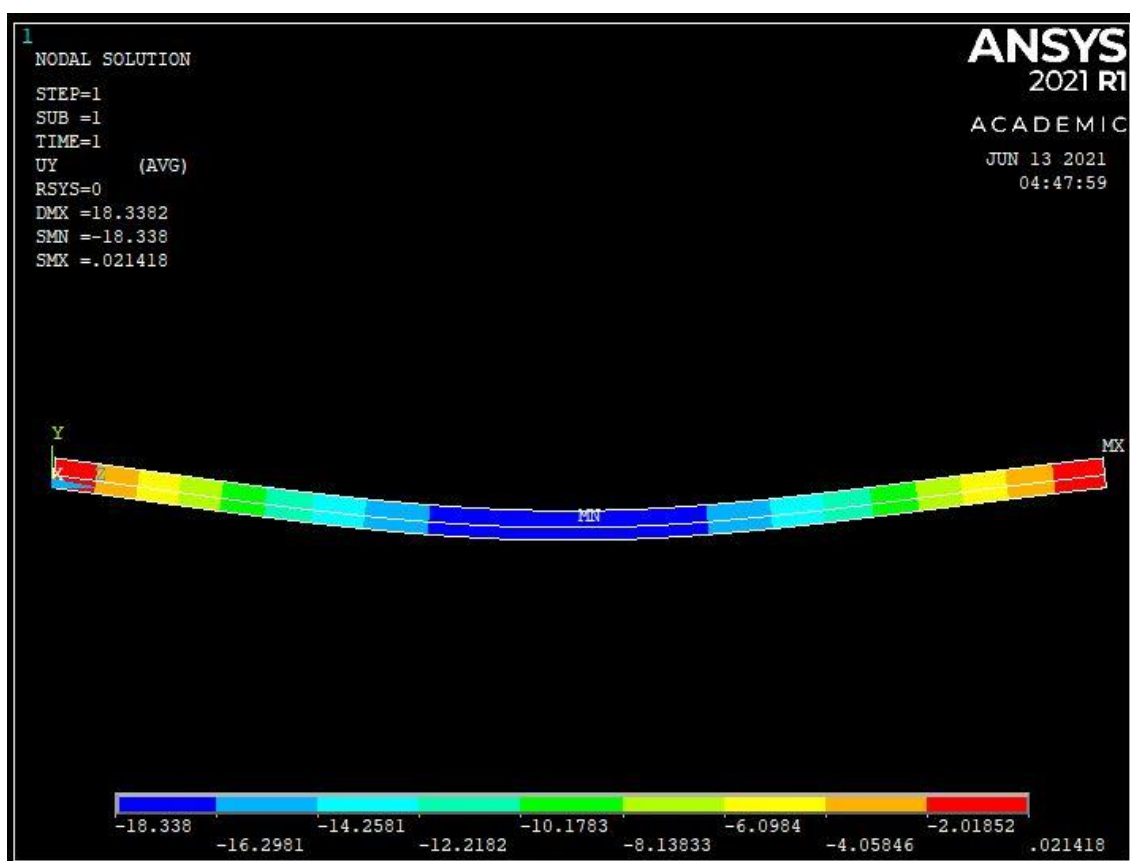


Figura 8.17 Distribució de desplaçaments verticals de la proveta a flexió

En la figura anterior es pot apreciar el comportament explicat anteriorment, on els valors de desplaçament vertical son mes grans a prop del centre de la proveta i quasi be nuls als punts de recolzament amb els suports.

En aquest cas, es pot observar com es produeix un desplaçament vertical màxim al punt d'aplicació de la força de **18,338 mm** per a una força de 50 N.

A continuació es mostra una taula amb els valors de força (N) i desplaçament vertical (mm) per a cada una de les 10 simulacions realitzades.

N Sim	Força (N)	Desplaçament (mm)
1	10	3,6676
2	20	7,33521
3	30	11,0028
4	40	14,67
5	50	18,338
6	60	22,006
7	70	25,6732
8	80	29,341
9	90	33,008
10	100	36,676

Taula 8.3 Dades de la simulació de l'assaig a flexió

9. Desenvolupament del software per al càlcul del mòdul elàstic

Un cop realitzats els assaigs i haver recopilat les dades corresponents a cada un d'ells, es procedirà a realitzar els càlculs pertinents per trobar els diferents mòduls elàstics segons el tipus d'esforç al que es sotmet el material, per tant l'objectiu es determinar els diferents valors del mòdul elàstic a tracció, compressió i flexió a partir de les dades obtingudes en cada un dels assaigs.

Per tal de agilitzar aquest procés de càlcul a partir de les dades obtingudes en els assaigs, s'ha plantejat el desenvolupament d'un software senzill que permeti automatitzar aquest procés. Aquest software permetrà a partir de les dades obtingudes en qualsevol dels 3 assaigs determinar el mòdul elàstic corresponent segons quin sigui l'assaig, ja que el software serà capaç de reconèixer de quin tipus d'assaig es tracta. D'aquesta manera no serà necessari realitzar els càlculs post assaig manualment ja que només introduint les dades en format Excel, el software les analitzarà i donarà el valor del mòdul elàstic de manera immediata.

Cal remarcar que aquest software només servirà per a algun dels 3 assaigs de la metodologia i no es podrà utilitzar per assaigs que no estiguin recollits dins de la metodologia, ja que el software forma part d'aquesta. No obstant es pretén que el software sigui capaç de processar paquets de dades de més de 10 mostres, per tant dins de la metodologia es poden prendre més mostres durant els assaigs per tal d'augmentar la precisió del valor de mòdul elàstic que es vulgui obtenir.

9.1. Algorisme de programació

Abans de començar a programar el software es necessària la confecció d'un algorisme en el qual es basarà el software. Aquest algorisme es essencial per tal de definir la estructura que tindrà el software i quins son els passos a seguir a l'hora de programar, d'aquesta manera es té una idea inicial de quins processos ha de realitzar el software fins a arribar al resultat final (output) i ordena aquests processos per tal que el software procedeixi de manera correcta. L'algorisme es una gran eina que facilita la implementació de la idea inicial que es té del software en un llenguatge de programació identificant quines son les entrades i les sortides, i quins son els processos que transformen aquestes entrades en sortides.

El primer pas per a definir l'algorisme es identificar quines son les seves entrades i sortides per tal de determinar els processos que transformen les entrades en sortides. En aquest cas, l'objectiu del software es transformar les dades obtingudes a partir dels assaigs i donar el valor del mòdul elàstic corresponent al tipus d'assaig, per tant el software haurà de tenir una única entrada o 'input' que seran les dades provinents del assaig. Pel que fa a les sortides de l'algorisme aquestes seran el que es vol obtenir del software a partir de les entrades introduïdes, en aquest cas seran dues, la primera i principal serà el valor del mòdul elàstic en qüestió i la segona serà un gràfic tensió-deformació que servirà com a eina visual per a veure la correlació entre aquestes dues variables i veure si la relació entre aquestes es lineal, senyal inequívoca de que l'assaig i els càlculs posteriors realitzats pel software son correctes ja que s'espera un comportament lineal per part del PLA.

Per tal de transformar les entrades en sortides seran necessaris una sèrie de processos tal com agrupar les dades introduïdes com a 'input' en un banc de dades segregat segons el seu tipus, i posteriorment filtrar-les i transformar-les per així preparar-les per a realitzar els càlculs pertinents per tal d'obtenir el valor del mòdul elàstic, que serà l'output del sistema juntament amb el gràfic tensió-deformació.

A continuació es mostra la estructura de l'algorisme en el qual es basarà el software encarregat de donar els valors de mòdul elàstic.

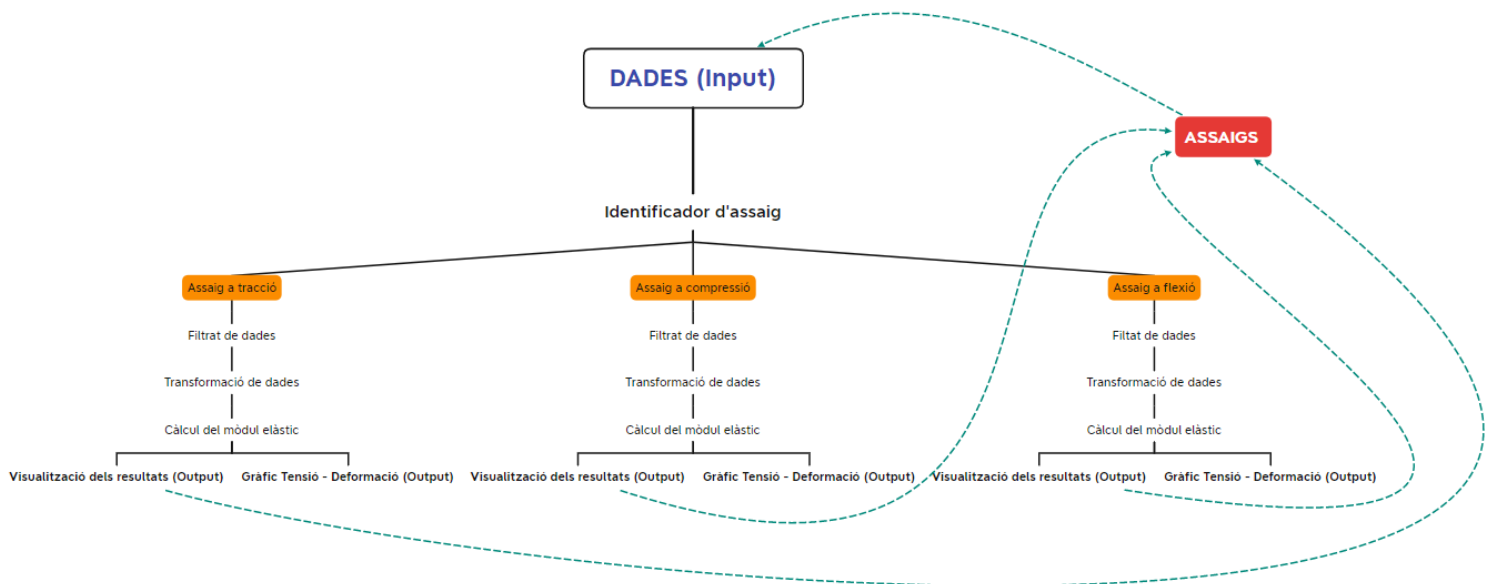


Figura 9.1 Esquema de l'algorisme del software

;

Per tal que el software sigui capaç de interpretar les dades i realitzar els càlculs posteriors aquestes hauran d'estar en format Excel amb una certa disposició segons l'assaig, aquesta disposició es tracta d'ordenar els tipus de valors amb diferents columnes i que cada fila faig referència a una mostra o simulació d'aquell assaig. A continuació es mostra una imatge de com les dades estan estructurades per a l'assaig a tracció.

	A	B	C	D
1	Nsim	Tensio	Deformacio	Assaig
2	1	2,595	0,001083	T
3	2	5,189	0,002076	
4	3	7,784	0,003114	
5	4	10,378	0,0041152	
6	5	12,973	0,00519	
7	6	15,568	0,006227	
8	7	18,162	0,007265	
9	8	20,757	0,008303	
10	9	23,352	0,009341	
11	10	25,946	0,01038	
12				

Taula 9.1 Dades de l'assaig a tracció en format Excel

Com es pot observar les dades s'estructuren en 4 columnes referents al nombre de simulació o mostra, als valors de tensió obtinguts, als valors de deformació i finalment una ultima columna amb una sola fila que fa referència a l'identificador d'assaig. També s'observen 10 files de dades que corresponen a les 10 simulacions realitzades.

Un cop s'han introduït les dades al software amb la disposició indicada anteriorment, el primer pas en l'algoritme es identificar de quin assaig provenen les dades introduïdes, ja que com s'ha comentat amb anterioritat aquest software es capaç de tractar les diferents dades dels 3 assaigs de la metodologia. Per tal de saber d'on provenen aquestes dades, s'inclou juntament amb el conjunt de dades obtingudes a partir de l'assaig un caràcter identificador d'aquell assaig en concret, el qual el software utilitzarà per identificar de quin assaig provenen les dades i les tractarà d'una manera o d'un altre segons aquest identificador.

Es molt important acompanyar les dades d'un assaig del indicador correcte ja que si es comet un error i es col·loca un identificador que no correspon amb les dades que acompanya, el software serà capaç d'arribar a una solució i donarà unes sortides, però aquestes seran completament errònies, ja que les dades que es recullen durant els assaigs tenen diferents magnituds per un assaig que per un altre, per exemple en l'assaig a tracció es recullen dades de tensió (MPa) i deformació (mm/mm), en canvi en l'assaig a flexió les dades extretes son de força (N) i desplaçament vertical (mm), com es lògic aquestes dades rebran tractament diferents. Els diferents identificadors son 3 caràcters diferents que fan referencia a la inicial del nom de cada un dels assaigs, com es pot apreciar en la figura anterior l'identificador per a l'assaig a tracció es 'T', per a l'assaig a compressió es 'C' i per a l'assaig a flexió es 'F'. Si on va l'identificador no es col·loca res o es col·loca qualsevol altre caràcter que no es correspon amb cap dels 3 mencionats, el software retornarà un error amb la indicació de 'Identificador d'assaig incorrecte', d'aquesta manera s'evita que el software falli si no s'ha introduït el identificador correctament i l'usuari veu de manera clara que s'ha equivocat al introduir l'identificador al software.

Un cop identificat el tipus d'assaig s'aplicarà es tractaran les dades amb el procediment corresponent a l'assaig indicat per l'identificador, primer es guardaran les dades en un banc de dades bidimensional per posteriorment interactuar amb elles. A continuació, es procedirà a realitzar un filtrat de dades segons el seu valor de tensió, es descartaran aquells parells de dades de les quals el seu valor de tensió no estigui comprès entre els valors de precàrrega i límit elàstic, el motiu d'aquest filtrat s'explicarà amb mes detall mes endavant. Després, es realitzaran un seguit de transformacions de dades, en les quals es generaran noves columnes aplicant transformacions al les columnes ja existents i s'afegiran al banc de dades creat anteriorment, posteriorment amb aquestes noves dades generades a partir de les ja existents es procedirà a realitzar els càlculs pertinents segons l'assaig que derivaran en la determinació del mòdul elàstic corresponen a l'assaig realitzat, a continuació s'explicarà mes detalladament el mètode utilitzat per a determinar el mòdul elàstic en cada cas i els càlculs pertinents a realitzar.

9.2. Mètode de determinació del mòdul elàstic

Tal i com s'ha explicat anteriorment, el mòdul elàstic d'un material es determina per la resistència del material a deformar-se al ser sotmès a certs valors de tensió en la direcció en la qual es deforma. Aquest es un concepte senzill, per tant el procediment per a determinar el valor del mòdul elàstic no sembla molt complicat sobre el paper, ja que l'únic que cal fer es un gràfic de la corba tensió-deformació i posteriorment traçar una recta sobre la part lineal de la corba, que correspon a la zona de deformació elàstica del material. No obstant, sobre la pràctica existeixen una sèrie de factors que incideixen sobre el valor final del mòdul elàstic com el soroll i variabilitat de les dades extretes a

;

partir dels assaigs, també influeix la forma de la corba tensió-deformació ja que aquesta pot tenir un comportament mes o menys lineal. (12)

Actualment existeix una gran varietat d'algorismes dissenyats per al càlcul del mòdul elàstic els quals utilitzen diferents procediments a per a determinar el seu valor, segons s'empri un procediment o un altre es poden obtenir valors bastant diferents per al mòdul elàstic, per aquest motiu es important escollir un procediment que s'ajusti al comportament del material per tal de trobar el valor del mòdul elàstic que representi millor el comportament elàstic lineal del material. (12)

El procediment mes habitual consisteix en examinar la zona elàstica de la corba tensió-deformació que es troba per sota del valor del límit elàstic del material, aleshores amb les dades d'aqueta zona que normalment presenten un comportament lineal es determina la pendent per trobar el valor del mòdul elàstic mitjançant una regressió per mínims quadrats o altres tècniques estadístiques. No obstant, cal tenir en compte el comportament de la corba tensió-deformació, ja que segons la distribució que aquesta presenti es preferible utilitzar una tècnica o un altre per a determinar el mòdul elàstic. A continuació, es mostren diferents tècniques per a determinar el pendent de la corba segons la distribució que aquesta presenta. (12)

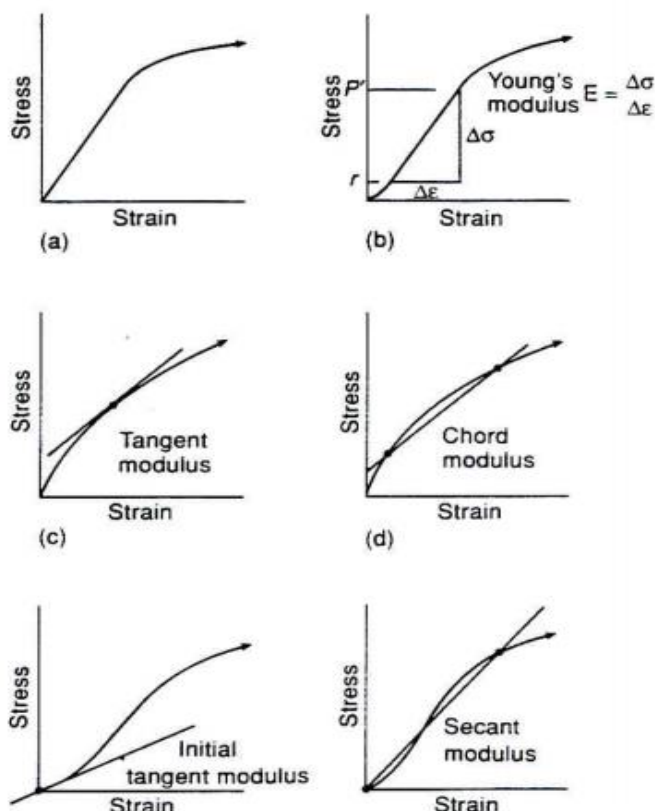


Figura 9.2 Representació dels diferents mètodes per al càlcul del mòdul elàstic (12)

Com es pot observar, les rectes traçades per a determinar el valor del mòdul elàstic adquireixen pendents diferents segons la tècnica utilitzada per a traçar-les, inclús es pot apreciar com aplicant diferents tècniques per a la mateixa corba s'obtenen rectes diferents, es per això es el valor del mòdul elàstic pot variar significativament segons la tècnica utilitzada cosa que complica la seva determinació a causa de la gran varietat de tècniques existents.

Si s'observa la figura anterior, es poden apreciar les diferents distribucions que la corba tensió-deformació pot presentar i les tècniques més adequades per a cada una d'elles. En la primera fila es mostra el comportament més habitual per als materials elàstics lineals, el qual consisteix en una distribució lineal de les dades en la zona elàstica i un canvi de tendència a partir del límit elàstic, en aquest cas es preferible centrar-se en les dades obtingudes per sota del límit elàstic i ignorar aquelles que es troben en la zona plàstica, es relativament fàcil traçar una recta que s'ajusti a la distribució de les dades ja que segueixen un comportament lineal. Si es té una distribució discreta de punts es possible determinar el pendent de la corba traçant una recta a mà que s'ajusti a al punts de la zona elàstica, aquest procediment es conegut com a mètode gràfic, no obstant si es vol obtenir una major precisió en l'ajust de la recta es millor utilitzar el mètode numèric, que consisteix en determinar el pendent de la recta mitjançant tècniques estadístiques com una regressió lineal pel mètode dels mínims quadrats, aquest valor s'anomena mòdul de Young. Entre la primera i la segona gràfica es pot observar una lleugera diferència en la part inicial de la corba, ja que la segona corba no presenta un comportament lineal en aquest tram, això pot ser a causa d'algun error durant la realització de l'assaig per un mal col·locament de la proveta en la màquina d'assaig, aquest es un comportament bastant freqüent en aquest tipus d'assaigs i per tal de que aquest fenomen no interfereixi en el càlcul del mòdul elàstic es necessari fer un filtrat de les dades del assaig i només tenir en compte aquelles dades amb uns valors de tensió entre la precàrrega (r) i el límit elàstic (P'), tal i com planteja l'algorisme en el qual es basarà el software. (12) (13)

Tot i que en la majoria d'assaigs s'obté una corba tensió-deformació amb una distribució lineal a vegades aquest corba presenta una distribució més semblant a una paràbola que a una recta, en aquests casos no es possible traçar una recta que s'ajusti a les dades per tant es necessari utilitzar tècniques alternatives com la determinació del mòdul tangent, aquest mètode com el seu propi nom indica consisteix en traçar una recta tangent en un punt de la corba per tal de determinar el pendent d'aquesta, es habitual dividir la corba en diferents segments i traçar la recta tangent a cada un d'aquets segments, posteriorment es calcula el pendent de cada una d'aquetes tangents i es fa una mitjana per a trobar el valor del mòdul elàstic, o simplement es pot determinar el pendent traçant la recta tangent a la corba en el límit elàstic, tot i que en aquest tipus de comportament pot ser difícil de determinar. (12)

;

Una altra alternativa es utilitzar el mètode del mòdul de corda o 'Chord modulus', aquest es un mètode gràfic que es tracta de traçar una recta definida per dos punts escollits per l'usuari per sota del límit elàstic, aquests dos punts solen ser el punt que correspon al valor de precàrrega de la tensió i el límit elàstic del material. També es pot donar el cas que la corba a part de presentar una distribució no lineal també presenti un comportament anòmal a la part inicial de la corba a causa d'un error en l'assaig com s'ha comentat anteriorment, aquest comportament es mostra en les dues últimes gràfiques de la figura **xx** i com es pot observar presenta un comportament molt canviant sense seguir cap patró, on al principi el pendent de la corba es quasi be nul, després augmenta a la zona central i torna a disminuir al entrar a la zona de deformació plàstica, en aquests casos es mes adequat utilitzar determinar el valor del mòdul elàstic amb la determinació del mòdul secant, el qual consisteix en traçar una recta que va des de l'origen fins a un punt proper al límit elàstic tot i tallant la recta per un altre punt entre aquests dos el qual coincideix amb el punt de màxim pendent de la corba. També existeixen altres mètodes alternatius com pot ser aplicar el mètode del mòdul tangent a la part inicial de la corba per veure quin efecte te aquesta sobre el valor final del mòdul elàstic. (12) (13)

En el cas del PLA, es coneix que te un comportament com el que es mostra en les dues primeres gràfiques de la figura **xx** ja que segueix una distribució lineal en la primera part de la corba tensió-deformació fins a arribar al límit elàstic, punt on hi ha un canvi de tendència en el comportament de la corba al entrar a la zona plàstica. Per tant, com es sol fer en aquests casos es preferible centrar l'estudi en la part elàstica de la corba obtinguda a partir del assaig i nomes tenir en compte aquelles dades per sota del límit elàstic, les quals haurien d'exhibir un comportament lineal. Per a obtenir una major preciso en el valor final del mòdul elàstic s'ha decidit utilitzar el mètode numèric, el qual permetrà trobar el pendent de la recta que millor s'ajusti a les dades de l'assaig mitjançant una regressió lineal per mínims quadrats. A continuació es mostra la fórmula utilitzada per al càlcul del mòdul elàstic mitjançant una regressió per mínims quadrats, aquesta es calcula a partir dels valors obtinguts en a realització dels assaigs un cop aplicat el filtre esmentat anteriorment.

$$\text{Young's modulus, } E = \frac{\sum(XY) - K\bar{X}\bar{Y}}{\sum X^2 - K\bar{X}^2} \quad (2)$$

where:

Y = applied axial stress, and

X = corresponding strain. = .

\bar{Y} = $\sum Y/K$ = average of Y values

\bar{X} = $\sum X/K$ = average of X value

K = number of X,Y data pairs and \sum = sum from 1 to K .

Equació 9.1 Càlcul del mòdul elàstic mitjançant una regressió lineal (13)

La equació anterior permet calcular el pendent de la recta que millor s'ajusta a les dades de l'assaig, el valor del pendent de la recta es a la vegada el valor del mòdul elàstic, o en aquest cas mòdul de Young del material en MPa si les dades introduïdes en l'equació pertanyen a la tensió (MPa) i a la deformació (mm/mm) assolides durant l'assaig. Per tal de saber si les dades de l'assaig realment segueixen una distribució lineal, existeix un paràmetre anomenat coeficient de determinació (r^2) que indica la bondat de l'ajust de la recta trobada a partir de la regressió per mínims quadrats, es a dir ajuda a determinar si realment la recta trobada s'ajusta a les dades o no.

$$r^2 = \frac{\left[\sum XY - \frac{\sum X \sum Y}{K} \right]^2}{\left[\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{K} \right] \left[\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{K} \right]}$$

Equació 9.2 Càlcul del coeficient de determinació (13)

Per tal d'assegurar que la recta trobada s'ajusta correctament a les dades obtingudes a partir de l'assaig el valor de r^2 hauria de ser al voltant de 1. Finalment, es determinara el coeficient de variació (V_1) del pendent de la recta trobada el qual permet conèixer la dispersió de les dades de la part lineal de la corba tensio-deformació provinents dels assaigs. (13)

$$V_1 = 100 \sqrt{\frac{\frac{1}{r^2} - 1}{K - 2}}$$

Equació 9.3 Càlcul del coeficient de variació del pendent de la recta (13)

Sota condicions normals el valor de coeficient de variació (V_1) hauria de no ser major que un 2%, fins i tot en alguns casos es podrien assolir valors de menys de 0,5%. (13)

;

No obstant, anteriorment s'ha comentat com el fet de tenir mes parells de dades augmenta la precisió dels calculs realitzats, per tant segons el nombre de parells de dades recollides durant els difrents assaigs s'obtindran uns valors de V_1 o uns altres. A continuació, es mostra una taula que dona uns valors de referencia per V_1 segons diferents valors de r^2 i el nombre de parells de dades (k) recollides en cada cas.

Data Pairs (K)	Sample Correlation Coefficients (r)				
	0.90000	0.99000	0.99900	0.99990	0.99999
3	±48.4	±14.2	±4.47	±1.41	±0.447
5	27.9	8.22	2.58	0.816	0.258
10	17.1	5.03	1.58	0.500	0.158
20	11.4	3.35	1.05	0.333	0.105
30	9.1	2.69	0.84	0.267	0.084
50	6.9	2.05	0.64	0.204	0.064
100	4.8	1.44	0.45	0.142	0.045

Taula 9.2 Valors de referencia de V_1 segons K (13)

Com es pot observar en la figura anterior, la variacio de les dades diminueix a mesura que s'augmenta el nombre de parells de dades recollits, tambe es pot observar el fort efecte que te el coeficient de determinació (r^2) sobre la variacio, per tant es un factor crucial realitzar un bon ajust per tal de reduir la variacio de les dades sobre el pendent de la recta trobada.

9.3. Codi de programació

Un cop definida l'estructura del software es procedirà a programar un codi basat en l'algorisme plantejat anteriorment tot i executant les ordres necessàries per realitzar els processos descrits en l'algorisme. El codi s'ha escrit amb el llenguatge de programació **Python**, ja que es tracta d'un llenguatge bastant senzill i fàcil de manipular, dins d'aquest llenguatge s'ha utilitzat la llibreria PANDAS (Panel of Data), la qual permet introduir paquets de dades en diferents formats com Excel o CSV i disposa d'una amplia varietat d'eines que permeten l'emmagatzemament i manipulació d'aquetes dades, per tant aquesta funcionalitat es ideal per a duu a terme el càlcul del mòdul elàstic a partir de les dades dels assaigs.

A continuació es mostra el codi de programació complet que ha estat implementat i executat a la llibreria de Google Drive Colaboratory.

```
!pip install pandas

!pip install matplotlib

!pip install math

import matplotlib.pyplot as plt

import pandas as pd

import math

def modul_elastic(dades):

    df=pd.read_excel(dades,index_col="Nsim")

    ta=df.at[1,"Assaig"]

    if ta == 'T':

        df1 = df[(df["Tensio"] > 2.5) & (df["Tensio"] < 30)]

        df1["defquad"] = df1["Deformacio"].apply(quadrat)

        df1["tensioxdef"] = df1.apply(tensioxdef,axis=1)

        df1["tensioquad"] = df1["Tensio"].apply(quadrat)

        Ym = df1["Tensio"].mean()

        Xm = df1["Deformacio"].mean()

        SXY = df1["tensioxdef"].sum()

        SXquad = df1["defquad"].sum()

        SX = df1["Deformacio"].sum()

        SY = df1["Tensio"].sum()

        SYquad = df1["tensioquad"].sum()

        k = df1.shape[0]

;
```

```

E = (SXY-k*Xm*Ym) / (SXquad-k*(Xm**2))

r2 = ((SXY-(SX*SY)/k)**2) / ((SXquad-((SX**2)/k))*(SYquad-((SY**2)/k)))

v1 = 100*(math.sqrt(((1/r2)-1)/(k-2)))

df.plot(kind='scatter', x='Deformacio', y='Tensio')

return ('Mòdul Elàstic a Tracció',E,r2,v1)

if ta == 'C':

df["Deformacio"] = df["Desplaçament"].apply(deformacio)

df1 = df[(df["Tensio"] > 2.5) & (df["Tensio"] < 35)]

df1["defquad"] = df1["Deformacio"].apply(quadrat)

df1["tensioxdef"] = df1.apply(tensioxdef,axis=1)

df1["tensioquad"] = df1["Tensio"].apply(quadrat)

Ym = df1["Tensio"].mean()

Xm = df1["Deformacio"].mean()

SXY = df1["tensioxdef"].sum()

SXquad = df1["defquad"].sum()

SY = df1["Tensio"].sum()

SX = df1["Deformacio"].sum()

SYquad = df1["tensioquad"].sum()

k = df1.shape[0]

E = (SXY-k*Xm*Ym) / (SXquad-k*(Xm**2))

r2 = ((SXY-(SX*SY)/k)**2) / ((SXquad-((SX**2)/k))*(SYquad-((SY**2)/k)))

v1 = 100*(math.sqrt(((1/r2)-1)/(k-2)))

df.plot(kind='scatter', x='Deformacio', y='Tensio')

```

```

    return ('Mòdul Elàstic a Compressió',E,r2,v1)

if ta == 'F':

    df["Tensio"] = df["Força"].apply(tensioflex)

    df["Deformacio"] = df["Desplaçament"].apply(defoflex)

    df1 = df[(df["Tensio"] > 2.5) & (df["Tensio"] < 45)]

    df1["despquad"] = df1["Desplaçament"].apply(quadrat)

    df1["forçaquad"] = df1["Força"].apply(quadrat)

    df1["forçaxdesp"] = df1.apply(frçaxdesp,axis=1)

    Ym = df1["Força"].mean()

    Xm = df1["Desplaçament"].mean()

    SXY = df1["forçaxdesp"].sum()

    SXquad = df1["despquad"].sum()

    SY = df1["Força"].sum()

    SX = df1["Desplaçament"].sum()

    SYquad = df1["forçaquad"].sum()

    k = df1.shape[0]

    m = (SXY-k*Xm*Ym) / (SXquad-k*(Xm**2))

    r2 = ((SXY-(SX*SY)/k)**2) / ((SXquad-((SX**2)/k))*(SYquad-
    ((SY**2)/k)))

    v1 = 100*(math.sqrt(((1/r2)-1)/(k-2)))

    E = ((250**3)*m) / (4*19*(7**3))

    df.plot(kind='scatter', x='Deformacio', y='Tensio')

    return ('Mòdul Elàstic a Flexió',E,r2,v1)

else:

    return "Identificador d'assaig incorrecte"

;

```

Com es pot observar, primer s'han importat les llibreries necessàries per executar el codi, s'ha importat PANDAS que serveix per tractar les dades, després s'ha importat matplotlib per a dibuixar les gràfiques dels assaigs i finalment la llibreria math per realitzar operacions matemàtiques durant el càlcul del mòdul elàstic.

El software es compon d'una funció principal anomenada 'modul_elastic' que conté una sèrie d'instruccions per a executar els processos de l'algorisme, aquesta funció té una única entrada que són les dades d'un dels 3 assaigs en format Excel, ja que sinó no reconeixera el fitxer.



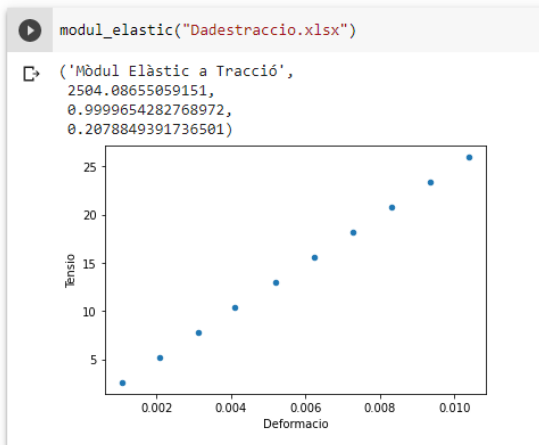
```
modul_elastic("Dadesflexio.xlsx")
```

Figura 9.3 'Input' de les dades de l'assaig a flexió

Un cop introduïdes les dades en el format correcte, el software les ordena per columnes i les guarda en un banc de dades bidimensional o 'Dataframe', on la primera columna es utilitzada per indexar les files de cada fila. A continuació, el software accedeix al identificador d'assaig i el compara amb els 3 possibles identificadors per comparar si coincideix amb algun, si és així s'executen les línies de codi corresponents al condicional d'aquell assaig en concret, en el cas de no coincidir amb cap dels 3 condicionals el software retorna 'Identificador d'assaig incorrecte'.

Un cop identificat l'assaig, el software realitza el filtrat de dades segons els seus valors de tensió i les emmagatzema en un nou 'Dataframe', a partir d'aquí es generen noves columnes a partir de les ja existents mitjançant diferents transformacions com elevar al quadrat els valors de tensió i deformació, multiplicar els valors de tensió i deformació i algunes altres, algunes d'aquestes transformacions també inclouen generar els valors propis de tensió i/o deformació ja que en alguns casos aquests no s'obtenen directament de l'assaig, sinó que es generen amb càlculs posteriors com succeeix en els assaigs a compressió i a flexió. Posteriorment es calculen els valors necessaris per duu a terme la regressió per mínims quadrats mitjançant l'equació comentada anteriorment, alguns d'aquests són la mitjana dels valors de tensió i deformació, la suma dels valors de la columna generada a partir de multiplicar els valors de tensió i deformació i altres valors necessaris. Finalment, el software calcula els valors del mòdul elàstic (E), el coeficient de determinació (r^2) i el coeficient de variació del pendent de la recta (V_1).

Un cop el software ha calculat el valors dels paràmetres mencionats anteriorment, els emmagatzema en diferents variables i els retorna com a 'outputs' del sistema juntament amb la gràfica de punts tensió-deformació. A continuació, es mostren el 'outputs' que dona el software per a cada un dels assaigs realitzats a partir de les dades introduïdes obtingudes en cada un d'aquests.

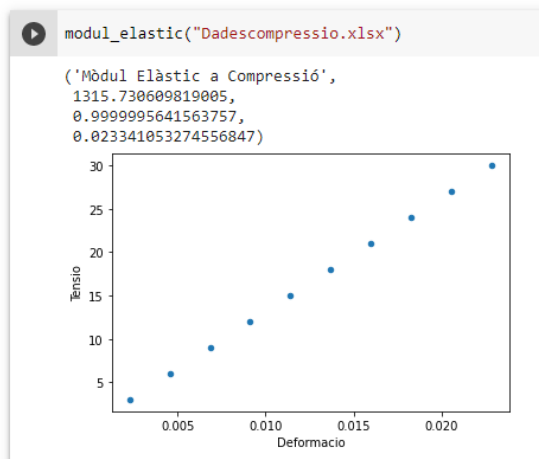


Assaig a tracció

$$E = 2504,86 \text{ MPa}$$

$$r^2 = 0,99996$$

$$V_1 = 0,207885 \%$$

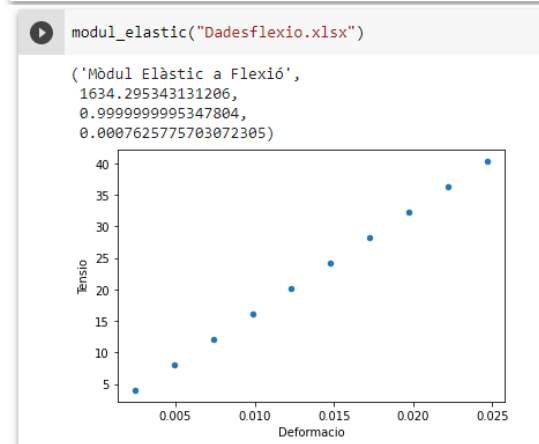


Assaig a compressió

$$E = 1315,73 \text{ MPa}$$

$$r^2 = 0,99999956$$

$$V_1 = 0,023341 \%$$



Assaig a flexió

$$E = 1634,29 \text{ MPa}$$

$$r^2 = 0,999999995$$

$$V_1 = 0,0007625 \%$$

Figura 9.4, 9.5 i 9.6 'Outputs' dels assaigs a tracció, compressió i flexió

;

Com es pot observar, les dades obtingudes a partir dels 3 assaigs presenten un comportament lineal i no presenten una alta variació, per aquest motiu ha estat fàcil trobar una recta que s'ajusti a la distribució d'aquestes dades ja que els coeficients de determinació de cada una d'aquestes presenten valors correctes, molt propers a 1.

Com s'ha comentat anteriorment, el software realitza diferents transformacions necessàries per al càlcul del mòdul elàstic o simplement per a obtenir els valors de tensió i/o deformació d'un assaig a partir de valors de desplaçament o força obtinguts en el propi assaig. Per tal de realitzar aquestes transformacions, el software crida a altres funcions secundàries dins de la funció principal 'modul_elastic' les quals s'encarreguen de realitzar aquestes transformacions fila per fila. A continuació, es mostra el codi de programació d'aquestes funcions secundàries com per exemple la funció 'quadrat', que es tracta d'una funció amb un 'input' en forma de nombre enter o decimal la qual retorna aquest mateix nombre elevat al quadrat.

```
def quadrat(defo):  
  
    defquad = defo**2  
  
    return defquad  
  
def tensioxdef(fila):  
  
    tensioxdef = fila["Tensio"]*fila["Deformacio"]  
  
    return tensioxdef  
  
def deformacio(desp):  
  
    defo = desp/30  
  
    return defo  
  
def frçaxdesp(fila):  
  
    frçaxdesp = fila["Força"]*fila["Desplaçament"]  
  
    return frçaxdesp  
  
def tensioflex(P):  
  
    tensio = (3*P*250)/(2*19*(7**2))  
  
    return tensio
```

```
def defoflex(desp):  
  
    defo = (6*desp*7)/(250**2)  
  
    return defo
```

;

10. Anàlisi de resultats

Després de simular els assaigs i haver obtingut les dades pertinents de cada un d'ells, s'han introduït aquestes dades al software dissenyat per a obtenir el valors dels mòduls elàstic a tensió, compressió i flexió a partir de cada un dels assaigs.

Com ja s'ha comentat anteriorment, les dades utilitzades per al càlcul dels diferents mòduls elàstics obtingudes a partir de les simulacions estan fortament influenciades per els valors inicials del mòdul elàstic i coeficient de Poisson que cal introduir en el software de simulació, per tal de minimitzar aquest efecte s'ha seguit un procés iteratiu que consisteix repetir els assaigs amb el mateix procediment seguit per trobar els diferents valors del mòdul elàstic, però aquest cop introduint en el software de simulació els valors trobats dels diferents mòduls elàstics per a cada un dels assaigs, d'aquesta manera les dades obtingudes a partir dels assaigs seran diferents i amb aquestes noves dades es calcularan els nous valors dels mòduls elàstics mitjançant el software que s'ha desenvolupat, aleshores un cop es tenen els nous valors s'introdueixen de nou en el software de simulació i es repeteix el procés. Es realitzaran un total de 2 iteracions.

Amb els resultats de les simulacions dels assaigs mostrats en l'apartat 8, s'ha obtingut els valors del mòdul elàstic a tracció, compressió i flexió corresponents a la primera iteració, els quals es mostren a continuació.

Iteració 1

Mòdul elàstic a tracció	2504,86 MPa
Mòdul elàstic a compressió	1315,73 MPa
Mòdul elàstic a flexió	1634,29 MPa

Taula 10.1 Valors dels mòduls elàstics a tracció, compressió i flexió de la iteració 1

Com es pot observar, els valors obtinguts son semblants als valors de referencia que s'han introduït inicialment per cada mòdul elàstic, per tant es pot observar la forta influencia que aquests valors inicials exerceixen sobre els valors finals.

Iteració 2**Dades obtingudes a partir dels assaigs****Assaig a tracció**

N Sim	Tensió	Deformació
1	2,59889	0,001038
2	5,19776	0,002076
3	7,79664	0,003114
4	10,3956	0,004152
5	12,9944	0,00519
6	15,5933	0,006227
7	18,1922	0,007265
8	20,791	0,008303
9	23,59	0,009341
10	25,9889	0,010379

Taula 10.2 Dades de l'assaig a tracció de la iteració 2

;

Assaig a compressió

N Sim	Tensió	Desplaçament
1	3	0,06761
2	6	0,135221
3	9	0,202831
4	12	0,270442
5	15	0,338052
6	18	0,405663
7	21	0,473273
8	24	0,540883
9	27	0,608494
10	30	0,676104

Taula 10.3 Dades de l'assaig a compressió de la iteració 2

Assaig a flexió

N Sim	Força	Desplaçament
1	10	3,6332
2	20	7,266
3	30	10,8996
4	40	14,5328
5	50	18,1666
6	60	21,7992
7	70	25,432
8	80	29,065
9	90	32,699
10	100	36,332

Taula 10.4 Dades de l'assaig a flexió de la iteració 2

Valors dels mòduls elàstics obtinguts

Mòdul elàstic a tracció	2512,28 MPa
Mòdul elàstic a compressió	1331,155 MPa
Mòdul elàstic a flexió	1649,77 MPa

Taula 10.5 Valors dels mòduls elàstics a tracció, compressió i flexió de la iteració 2

;

Un cop realitzat el procés iteratiu s'ha obtingut el valors finals dels diferents mòduls elàstics segons el tipus d'esforç, es pot observar com els valors definitius no varien molt del valors inicials de referència per al mòdul elàstic a tracció i compressió que es van introduir en el software de simulació en un principi, per tant es pot veure com els valors obtinguts venen influenciat pels valors de referència que es van escollir. No obstant, després del procés iteratiu s'aconsegueixen resultats molts semblants als introduïts al software, això vol dir que les simulacions i el software desenvolupat per determinar el mòdul elàstic funcionen prou be, ja que després de 2 iteracions es tornen obtenir valors semblants als inicials per tant els resultats finals son validats.

Es pot apreciar la diferencia significativa entre el mòdul elàstic a tracció i a compressió, per tant els resultats obtinguts a partir de les simulacions confirmen que el material es mes resistent a ser deformat quan es sotmès a esforços de tracció que a compressió, aquest comportament es esperat ja que es va imposar d'aquesta manera al imposar els valors dels mòduls elàstic a tracció i a compressió de 2500 i 1300 respectivament. Si s'analitza el valor obtingut per al mòdul elàstic a flexió es pot apreciar com aquest assoleix un valor entre el mòdul elàstic a tracció i a compressió, això es un bon indicador i fa pensar que el procediment seguit per trobar aquest valor es correcte, ja que en l'assaig a flexió el material es sotmès a esforços de tracció i compressió simultàniament, per tant es d'esperar que el material es deformi menys que si nomes estigues sotmès a esforços de compressió però alhora es deformi mes que si nomes ho estigues a esforços de tracció. A mes a mes, es pot apreciar com el valor obtingut per al mòdul elàstic a flexió es mes proper al valor del mòdul elàstic a compressió que al de tracció, aquest comportament es lògic ja que com s'ha comentat anteriorment, l'eix neutre de tensions esta situat mes a prop de la base que de la superfície superior i per tant hi ha mes quantitat del material treballant a compressió que a tracció.

Cal comentar, que l'equació utilitzada per a determinar el mòdul elàstic a flexió a partir de la força aplicada i el desplaçament vertical no es del tot correcte, aquesta equació es basa sobre la hipòtesi que l'eix neutre de la proveta es troba en el centre de la secció, no obstant en aquest cas ja s'ha vist que l'eix neutre esta lleugerament desplaçat cap avall, això provoca que s'estigui cometent un error al calcular el mòdul elàstic a flexió utilitzant aquesta equació. (11)

$$E_T = \frac{P \cdot L^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \delta}$$

Equació 10.1 Càlcul del mòdul elàstic a flexió amb el mètode tradicional (9)

El mòdul elàstic a flexió es la resistència que el material presenta a flectar per a una determinada força, però com un esforç a flexió no deixa de ser una combinació d'un esforç a tracció i un a compressió es pot esperar que el mòdul elàstic a flexió sigui simplement una combinació dels mòduls elàstic a tracció i compressió quan aquests tenen valors diferents. Si s'assumeix que el mòdul elàstic a flexió pot ser calculat com a combinació lineal dels mòduls elàstic a tracció i compressió en funció de la seva extensió al llarg del gruix de la proveta, es pot trobar una aproximació del mòdul elàstic a flexió amb la següent equació. (11)

$$E_F \approx \frac{1}{h}(h_b E_T + h_t E_C) = \frac{h_b E_T}{h} \left(1 + \frac{h_t}{h_b} \frac{E_C}{E_T} \right)$$

Equació 10.2 Càlcul del mòdul elàstic a flexió mitjançant una aproximació (11)

Si es realitza una simplificació mitjançant una simple relació entre els mòduls elàstics a tracció i compressió i les distàncies des de l'eix neutre de la proveta fins a les superfícies superior i inferior, s'obté l'expressió que es mostra a continuació.

$$E_F \approx \left(\frac{h_b}{h_t} \right) E_T = \sqrt{E_T E_C}$$

Equació 10.3 Simplificació de l'equació 10.2 (11)

A partir d'aquesta expressió es pot calcular el valor aproximat del mòdul elàstic a flexió si es coneixen els valors dels mòduls elàstics a tracció i a compressió en materials asimètric com el PLA. Tot i ser una aproximació, si la relació entre el mòdul elàstic a tracció i a compressió (E_T/E_C) esta entre 0,75 i 2 l'error obtingut d'utilitzar aquesta expressió serà de menys del 5%. En aquest cas, amb els valors obtinguts del mòdul elàstic a tracció i a compressió presentats anteriorment es té una relació E_T/E_C de **1,887**. Per tant es coherent fer servir aquesta expressió per a calcular el valor del mòdul elàstic a flexió. (11)

;

Si es calcula el valor del mòdul elàstic a flexió amb l'expressió anterior s'obté un resultat de **1828,72 MPa**.

Com es pot apreciar, el valor obtingut presenta un certa diferència respecte el valor que s'ha determinat fent servir la fórmula clàssica, a continuació es mostra el càlcul de l'error que s'obté si es calcula el valor del mòdul elàstic a flexió amb la forma tradicional, prenent com a hipòtesi que l'eix neutre està situat al centre de la secció.

$$\frac{1828,72 - 1649,77}{1649,77} \times 100 = 10,847 \%$$

Equació 10.4 Càlcul de l'error comes en el càlcul del mòdul elàstic a flexió

En aquest cas s'ha obtingut un error al voltant del 10%, no pot semblar un error tant gran però si la diferència entre els valors dels mòduls elàstics a compressió i tracció fos major l'error augmentaria, ja que l'eix neutre estaria encara més desplaçat de seva posició natural.

11. Impacte mediambiental

L'impacte mediambiental que ha suposat la realització d'aquest projecte es insignificant o gaire be nul, ja que pe dur-lo a terme no ha estat necessari mes que la utilització de diferents softwares com pugin ser SolidWorks o ANSYS Mechanical que no consumeixen cap recurs a part de la electricitat de l'ordinador on son desenvolupats, la qual cosa produeix un impacte mínim sobre el medi ambient.

En el cas que la metodologia desenvolupada en aquest projecte es portes a la practica, seria necessària la fabricació de les provetes d'assaig seguint els paràmetres especificats en la metodologia. Aquesta procés de fabricació podria tenir un cert impacte sobre el medi ambient, però al tractar-se de objectes de dimensions reduïdes i al nomes tenir que fabricar un nombre reduït de provetes aquest impacte seria mínim.

També cal comentar, que en cas de fabricar les provetes d'assaig al estar fetes de PLA no haurien de tenir cap impacte negatiu sobre el medi ambient, un cop s'assaja les provetes el tractament posterior es molt senzill ja que el PLA es un material 100% biodegradable i no presenta cap perill per al medi ambient a llarg termini. Tot i que les provetes no son aptes per a ser reciclades ni reutilitzades després de ser assajades, si es segueix el procediment adequat i es posen sota unes certes condicions es pot accelerar el seu procés de eliminació. Aquest procés consisteix en una desintegració del material gracies a uns microorganismes que sota unes certes condicions es situen a la superfície del material i generen uns enzims que destrueixen el polímer. Les condicions ideals perquè es produeixi aquesta desintegració natural son oxigen, humitat, nutrients mineral i una temperatura entre 20 i 60 graus Celsius, la velocitat de desintegració dependrà del grau de cristalinitat i pes molecular del material. (1)

;

12. Pressupost

Concepte		Cost Unitari	Quantitat	Total (€)
Personal	Enginyer Junior	15 €/h	340 h	5100
	Director	50 €/h	15 h	750
	Subtotal			5850
Software	Solid Works	500 €		500
	ANSYS	1000€		1000
	Subtotal			1500
Hardware	PC	700 €		700
	Subtotal			700
Costos		20%	1600	1600
Indirectes	Subtotal			1600
Total				9600

;

Conclusions

A partir dels valors finals que s'han obtingut per als diferents mòduls elàstics es poden extreure diferents conclusions. S'ha aconseguit desenvolupar una metodologia que a partir de certs assaigs determini els diferents valors del mòdul elàstic segons el tipus d'esforç aplicat, això es pot afirmar ja que al realitzar un procés iteratiu s'han validat els valors del mòduls, es a dir, al introduir uns valors al software de simulació i després de tornar a realitzar tot el procediment es tornen a obtenir els mateixos valors semblants. No obstant, aquests valors no tenen perquè reflectir el comportament real del material, ja que per a realitzar la primera iteració es van introduir uns valors de referència que poden no ser iguals als que realment reflecteixen el comportament del PLA, aleshores per tal de trobar el mòdul elàstic del material caldria posar en practica la metodologia desenvolupada i construir les provetes per a realitzar els assaigs, sense la necessitat de realitzar les simulacions tot i que aquestes un cop conegudes les constants reals del material podrien fer de suport comparant-les amb les dades dels assaigs.

Pel que fa a la geometria de les provetes, s'ha pogut trobar una configuració geomètrica comuna per als 3 dissenys respectant les restriccions de cada assaig, aquest era un objectiu primordial per al desenvolupament de la metodologia ja que sense una geometria definida no hagués estat possible duu a terme les simulacions i per conseqüència no s'haurien obtingut les dades amb les que el software treballa, per tant no s'hauria pogut determinar si aquest funciona correctament.

Pel que fa al software que s'ha desenvolupat per al tractament de les dades dels assaigs, es pot concloure que aquest es capaç de procedir de la maner correcte, a partir de un 'input' es capaç de retornar un 'output' amb coherència tot i identificant de quin assaig es tracta i retornant el valor del mòdul en conseqüència. No obstant, el software te molt marge de millora ja que es podrien incorporar processos mes complexos sobretot pel que fa la mètode per a calcular el mòdul elàstic, ja que es possible incorporar un mètode mes complet que permeti obtindrè uns resultats mes precisos.

Agraïments

M'agradaria agrair al Departament de Resistència de Materials la ajuda prestada en el desenvolupament de la metodologia, tant en la determinació de la geometria de les provetes com en la utilització del software de simulació.

També m'agradaria agrair el meu tutor, el Xavier Ayneto Gubert, el seu ajut i suport durant tot el projecte ja que m'ha orientat i m'ha donat consell en molts aspectes del treball.

Bibliografia

1. Serna C., L. S., Rodríguez de S., A., & Albán A., F. (2003, octubre). Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones . <https://doi.org/10.25100/iyc.v5i1.2301>
2. Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016, julio). *Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review.* <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>
3. . Kwon Oh, J. (2014, julio). *Biocompatibility of Advanced Manufactured Titanium Implants—A Review.* https://www.researchgate.net/publication/269836411_Biocompatibility_of_Advanced_Manufactured_Titanium_Implants-A_Review
4. Blasco Sierra, M. (2019, junio). *Determinació de les propietats mecàniques del PLA obtingut per fabricació additiva.*
5. Innofil 3D. Fitxa tècnica del PLA. [En línia] 10 / Juliol / 2017. <https://www.innofil3d.com/product-category/pla/>
6. MakerBot. PLA and ABS Strength Data. MakerBot. [En línia] https://downloads.makerbot.com/legal/MakerBot_R__PLA_and_ABS_Strength_Data.pdf
7. ASTM D638-02a. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM International. West Conshohocken, PA : s.n., 2002.
8. ASTM D695-02a. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. ASTM International. West Conshohocken, PA : s.n., 2002.

9. ASTM, D790-02. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. ASTM International. West Conshohocken, PA : s.n., 2002.

10. *Home / BME-MM..* BME-MM. <https://www.mm.bme.hu>

11. National Aeronautics and Space Administration (NASA), & Chamis, C. C. (1974, marzo). *ANALYSIS OF THE THREE-POINT-BEND TEST FOR MATERIALS WITH UNEQUAL TENSION AND COMPRESSION PROPERTIES*. NASA.

12. . National Physical Laboratory (NPL), Lord, J. D., & Morrell, R. (2006, septiembre). *Measurement Good Practice Guide No. 98*.

13. ASTM E11-17. Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus. ASTM International. West Conshohocken, PA : s.n., 2002.

14. . Henton, D. E., Gruber, P., Lunt, J., & Randall, J. (2005, noviembre). *Polylactic Acid Technology*. http://www.jimluntllc.com/pdfs/polylactic_acid_technology.pdf

15. ANSYS, Inc. ANSYS® Academic Research Mechanical,