



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

Caracterización y simulación del comportamiento viscoelástico de materiales plásticos mediante el Método de Elementos Finitos

MEMORIA PRESENTADA POR:

Javier Ponsoda Acedo

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA, PROCESADO Y
CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Convocatoria de defensa: julio de 2019

RESUMEN

“Caracterización y simulación del comportamiento viscoelástico de materiales plásticos mediante el Método de Elementos Finitos”

El empleo de algún tipo de programa de simulación y cálculo estructural basados en el método de elementos finitos está muy extendido en la industria de la ingeniería y el diseño de piezas en termoplásticos. Esto es debido a la facilidad con la que se puede averiguar el comportamiento del diseño a determinadas exigencias, sin embargo, con estos materiales no siempre es posible obtener simulaciones que se ajusten al comportamiento real de la pieza, hace falta realizar una correcta caracterización mecánica con la que poder obtener los datos de comportamiento necesarios para introducirlos en el programa y con ello poder definir correctamente el comportamiento del material.

El presente trabajo se centra en la caracterización mecánica y viscoelástico del ácido poliláctico, con el fin de estudiar su comportamiento mecánico. A partir de estas propiedades se estudiarán y comprobarán diferentes métodos de introducción de datos de materiales en el programa ANSYS Workbench y se validarán según su ajuste al comportamiento real del material obtenido en los ensayos mecánicos.

Palabras clave: polímeros, viscoelasticidad, MEF, ANSYS.

SUMMARY

“Characterization and simulation of the viscoelastic behavior of plastic materials using the Finite Element Method”

The use of some kind structural calculation and simulation software based on the finite element method is widespread in the engineering industry and the design of thermoplastic parts. This is due to the ease with which the design behavior can be determined, however, with these materials it's not always possible to obtain simulations that fit the actual behavior of the piece, it's necessary to do a correct mechanical characterization with which to obtain the necessary behavioral data to enter them in the program and thus be able to correctly define the behavior of the material.

This paper focuses on the mechanical and viscoelastic characterization of polylactic acid, in order to study it's mechanical behavior. Based on these properties, will be studied and checked different methods of entering materials data in the ANSYS Workbench software and will be validated according to their adjustment to the actual behavior of the material obtained in the mechanical tests.

Keywords: polymers, viscoelasticity, FEM, ANSYS.

RESUM

“Caracterització i simulació del comportament viscoelàstic de materials plàstics mitjançant el Mètode d’Elements Finites”

L’ús d’algún tipus de programa de simulació i càlcul estructural basats en el mètode d’elements finits està molt estès en la indústria de l’enginyeria i el disseny de peces en termoplàstics. Això és degut a la facilitat amb la que es pot averiguar el comportament del disseny a determinades exigències, no obstant això, amb aquest materials no sempre és possible obtenir simulacions que s’ajusten al comportament real de la peça, fa falta realitzar una correcta caracterització mecànica amb la que poder obtenir les dades de comportament necessaris per a introduir-los en el programa i amb això poder definir correctament el comportament del material.

El present treball es centra en la caracterització mecànica i viscoelàstica de l’àcid polilàctic, amb la finalitat d’estudiar el seu comportament mecànic. A partir d’aquestes propietats s’estudiaran i comprovaran diferents mètodes d’introducció de dades de materials en el programa ANSYS Workbench i es validaran segons el seu ajust al comportament real del material obtingut en els assajos mecànics.

Paraules clau: polímers, viscoelasticitat, MEF, ANSYS

Tabla de contenido

RESUMEN	1
SUMMARY	2
RESUM.....	3
ABREVIATURAS Y TÉRMINOS.....	6
LISTADO DE FIGURAS	8
LISTADO DE TABLAS	12
LISTADO DE ECUACIONES.....	14
I. ANTECEDENTES	17
1. INTRODUCCIÓN.....	17
2. FORMACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS	18
2.1 Naturaleza de los materiales poliméricos:.....	18
2.2 Clasificación de los materiales poliméricos:	18
3. POLÍMEROS BIODEGRADABLES.....	21
3.1 Clasificación de los polímeros biodegradables de origen natural:.....	22
4. ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA)	24
4.1 Obtención del PLA:	24
4.2 Propiedades y aplicaciones:.....	25
5. VISCOELASTICIDAD.....	27
5.1 Cálculo y modelización del comportamiento viscoelástico:	30
II. OBJETIVOS Y PROCESO DE INVESTIGACIÓN	32
1. OBJETIVO GENERAL.....	32
2. OBJETIVO PARTICULAR.....	33
3. PROCESO DE INVESTIGACIÓN	34
3.1 Búsqueda de información [18]:.....	34
3.2 Etapas del proceso de búsqueda:.....	34
3.3 Proceso de búsqueda de información:	35
3.4 Conclusiones alcanzadas tras los procesos de búsqueda:	39
III. EXPERIMENTAL	42
1. MATERIALES.....	42
1.1 Ácido Poliláctico (PLA):	42
2. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.....	43
3. TÉCNICAS Y ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN	44
3.1 Ensayo de tracción:.....	44
3.2 Ensayo de tracción a fluencia:.....	46

3.3 Modelos de cálculo de comportamiento viscoelástico para polímeros:	49
4. ANSYS® WORKBENCH	60
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	62
1. ENSAYOS DE TRACCIÓN	62
1.1 Ensayo de 10 mm/min:	62
1.2 Ensayo a 2 mm/min:	64
1.3 Ensayo a 0,25 mm/min:	66
1.4 Conclusiones parciales	67
2. ENSAYOS DE VISCOELASTICIDAD	68
2.1 Ensayo de fluencia:	68
2.2 Ensayos de relajación de tensiones:	72
2.3 Conclusiones parciales	77
3. OTROS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICAS:	78
3.1 Ensayo con galgas extensométricas:	78
4.1 ANSYS WORKBENCH	79
4.1 Engineering Data:	79
4.2 Caso 1. Validación de los datos de tracción:	81
4.3 Caso 2. Validación de los resultados de fluencia:	94
4.4 Caso 3. Validación de los resultados de relajación:	98
4.5 Caso 4: Contrastación de los resultados:	101
V. CONCLUSIONES	105
1. CONCLUSIONES	105
IV. REFERENCIAS	107
1. REFERENCIAS	107

ABREVIATURAS Y TÉRMINOS

σ	Tensión aplicada.
ξ	Constante de proporcionalidad del componente elástico.
η	Constante de proporcionalidad de viscosidad.
ε	Elongación, alargamiento que se produce.
σ_1	Tensión que soporta el muelle o resorte del sistema.
ε_1	Deformación que se produce en el muelle o resorte al aplicar σ_1 .
ξ_M	Constante del muelle.
σ_2	Tensión que soporta el émbolo del sistema.
ε_2	Deformación que se produce en el émbolo del sistema al aplicar σ_2 .
η_M	Constante del muelle o resorte.
ξ_M	Constante elástica del muelle en el modelo de Maxwell.
η_M	Constante de viscosidad en el modelo de Maxwell.
K	Constante de integración.
t	Variable tiempo.
σ_0	Tensión inmediata para representar el comportamiento de fluencia en el modelo de Maxwell.
ξ_{KV}	Constante elástica del muelle en el modelo de Kelvin-Voigt.
η_{KV}	Constante de viscosidad en el modelo de Kelvin-Voigt.
E_i	Constante de proporcionalidad elástica del muelle en el modelo generalizado de Maxwell.
σ_i	Tensión aplicada en el modelo generalizado de Maxwell.
η_i	Constante de viscosidad en el modelo generalizado de Maxwell.
M	Módulo de relajación en el modelo de las Series Prony.
M_e	Módulo de relajación a tiempo inicial en el modelo de las Series Prony.
M_i	Coeficiente de módulo de relajación en el modelo de las Series Prony.
τ_i	Representa la constante de tiempo. Se puede considerar como el tiempo de relajación al que está sometido el material.
n	Número de términos en serie o modelos matemáticos en el modelo de las Series Prony.
C	Módulo de fluencia o <i>creep</i> en las Series Prony.
C_g	Módulo de fluencia para un tiempo inicial en las Series Prony.

C_i	Coefficiente del módulo de fluencia en las Series Prony.
λ_i	Tiempo de retardo en las Series Prony.
σ_t	Tensión de Cauchy.
ϵ_t	Deformación logarítmica o de Henky.
ϵ_e	Deformación verdadera. Obtenida de un ensayo real.
x_1	Deformación en un determinado punto de un gráfico Tensión-Deformación.
x_y	Deformación registrada hasta el límite elástico en un gráfico Tensión-Deformación.
E_t	Módulo tangente en la ecuación de Ramberg-Osgood.
σ_{ys}	Límite elástico al 0,2% en la ecuación de Ramberg-Osgood.
E	Módulo elástico.
N	Parámetro de Ramberg-Osgood, el cual es una medida de la no-linealidad de la curva de tensión-deformación y se haya con la siguiente ecuación:
kN	Kilonewton, unidad de medida de fuerza.
MPa	Megapascal, unidad de presión.
GPa	Gigapascal, unidad de presión.
L_e	Límite elástico.
b	Espesor de la probeta.
h	Ancho de la probeta.
A	Sección de la probeta.
T_g	Temperatura de transición vítrea.
MFR	Índice de fluidez en masa.
PLA	Ácido poliláctico.
PVC	Policloruro de vinilo.
PVA	Poliacetato de vinilo.
ROP	Ring Opening Polymerization.
MEF	Método de Elementos Finitos.
FEM	Finite Element Method.
DMA	Análisis Térmico Dinámico Mecánico.
MISO	Multilinear Isotropic Hardening.
BISO	Bilinear Isotropic Hardening.

LISTADO DE FIGURAS

Apartado I:

Figura I. 1. Representación 2D de una estructura polimérica. La unidad monomérica básica es de etileno (C ₂ H ₄).	18
Figura I. 2. Proceso de activación del monómero y posterior polimerización para la obtención del polímero lineal.	19
Figura I. 3. Proceso de activación del monómero y posterior polimerización para la obtención de la red tridimensional de un polímero reticular.....	19
Figura I. 4. Representación gráfica de 2 macromoléculas de butadieno, que en presencia de azufre (S) y altas temperaturas, se vulcaniza rompiéndose los dobles enlaces y las moléculas se enlazan con átomos de azufre.....	20
Figura I. 5. Gráfico de la producción total de bioplásticos y la predicción de su futura producción [10].....	21
Figura I. 6. Gráfico de la producción total de bioplásticos en 2018, dividido por tipos de materiales plásticos [10].	22
Figura I. 7. Fórmula estructural del ácido láctico. (Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81cido_l%C3%A1ctico)	24
Figura I. 8. Explicación gráfica de los dos métodos de obtención del PLA [11].	25
Figura I. 9. Gráfico con número de publicaciones por año de artículos con el tema de Acid Polylactic OR PLA. (Fuente: Web of Science).....	26
Figura I. 10. Representación gráfica de la Ley de Hooke.	27
Figura I. 11. Representación gráfica de la Ley de Newton.	28
Figura I. 12. Gráfico representativo de un comportamiento a fluencia con 3 tensiones diferentes [30].	28
Figura I. 13. Gráfico representativo de un comportamiento a relajación de tensiones con 3 deformaciones diferentes [30].	29
Figura I. 14. Representación gráfica de tres curvas isocronas. La variable tiempo se fija y se estudian las variaciones de las deformaciones con respecto a la tensión [30].....	29

Apartado II:

Figura II. 1. Logo de Web of Science.	34
--	----

Apartado III:

Figura III. 1. Muestras obtenidas del proceso de inyección. En la imagen se puede observar una probeta para tracción y otro para impacto y flexión.	43
Figura III. 2. Velocidades de ensayos recomendadas en la norma ISO 527-1:2012 [21].	44

Figura III. 3. Plano de las dimensiones de la probeta empleada para los ensayos. La probeta es el tipo 1B según la norma ISO 527-2:2012 [22].	45
Figura III. 4. Colocación del extensómetro y el captado MFQ	46
Figura III. 5. Gráficos representativos del comportamiento que se produce durante el ensayo a fluencia y a relajación [30].	46
Figura III. 6. Preparación de unos de los ensayos de tracción en la máquina universal de ensayos ELIB 50.	48
Figura III. 7. Representación gráfica del sistema que se emplea en el Modelo de Maxwell.	49
Figura III. 8. Representación gráfica del comportamiento de deformación cuando se aplica una tensión constante. Representación según el Modelo viscoelástico de Maxwell [30].	51
Figura III. 9. Representación gráfica del fenómeno de relajación de tensiones. Este suceso se da cuando se aplica una deformación constante [30].	52
Figura III. 10. Representación gráfica del proceso de recuperación del material, donde se ve que en el momento que la tensión se anula, se produce una recuperación de forma parcial e invariable en el tiempo [30].	52
Figura III. 11. Representación gráfica del conjunto que emplea el Modelo de Kelvin.Voigt.	53
Figura III. 12. Representación gráfica del comportamiento de deformación cuando se aplica una tensión constante. Representación según el Modelo viscoelástico de Kelvin-Voigt [30].	54
Figura III. 13. Representación gráfica del fenómeno de relajación según el modelo de cálculo viscoelástico de Kelvin-Voigt [30].	55
Figura III. 14. Representación gráfica del comportamiento del material cuando se anulan las tensiones aplicadas [30].	56
Figura III. 15. Representación gráfica de un sistema con “i” elementos para el Modelo Generalizado de Maxwell [29].	57
Figura III. 16. Logo del software de ingeniería ANSY.	60

Apartado IV:

Figura IV. 1. Probeta fracturada tras el ensayo a 10 mm/min.	63
Figura IV. 2. Probeta fracturada tras el ensayo a 2 mm/min.	65
Figura IV. 3. Probeta fracturada tras el ensayo a 2 mm/min.	67
Figura IV. 4. Probeta ensayada al 10% de tensión.	69
Figura IV. 5. Probeta ensayada al 30% de tensión.	71
Figura IV. 6. Probeta ensayada al 60% de tensión.	72
Figura IV. 7. Probeta ensayada al 10% de deformación.	74
Figura IV. 8. Probeta ensayada al 30% de deformación.	75
Figura IV. 9. Probeta ensayada al 60% de deformación.	77

Figura IV. 10. Gráfico Tensión – Deformación Transversal Longitudinal, obtenido del software controlados de la máquina universal de ensayos Elib 50. A partir de este gráfico se puede obtener el Módulo de Elasticidad de forma más precisa.....	78
Figura IV. 11. Tabla de menú con diferentes definidores de materiales.....	80
Figura IV. 12. Gráficos de las tensiones introducidas para definir el material. Estos gráficos pertenecen a la tensión original del material y a la tensión corregida respectivamente.....	84
Figura IV. 13. Representación gráfica del comportamiento del material según la propiedad BISO.....	84
Figura IV. 14. Modelo 3D de la probeta empleada para las simulaciones. El diseño del modelo ha sido realizado con Solidworks.....	85
Figura IV. 15. Paneles de análisis del módulo ANSYS Workbench.....	85
Figura IV. 16. Menú de asignación de material para el modelo de probeta.....	86
Figura IV. 17. Modelo de probeta con el mallado resultante.....	86
Figura IV. 18. Áreas de aplicación de las herramientas Fixed Support y Displacement.....	87
Figura IV. 19. Soluciones que se pretende obtener para comparar con los valores reales.....	87
Figura IV. 20. Simulación del comportamiento de deformación del material introducido.....	88
Figura IV. 21. Simulación de cómo se aplica el software la tensión determinada.....	88
Figura IV. 22. Simulación del comportamiento de deformación del material introducido.....	89
Figura IV. 23. Simulación de cómo se aplica el software la tensión determinada.....	89
Figura IV. 24. Simulación de cómo se aplica el software la tensión determinada.....	90
Figura IV. 25. Simulación del comportamiento de deformación del material introducido.....	90
Figura IV. 26. Simulación del comportamiento de deformación del material introducido.....	90
Figura IV. 27. Simulación del comportamiento de deformación del material introducido.....	91
Figura IV. 28. Resultado de la simulación de tracción a 10 mm/min. Como se puede observar, la zona de mayor tensión se encuentra en la parte estrecha del modelo. Este comportamiento es el adecuado y similar al de una probeta real.....	93
Figura IV. 29. Recorte de la tabla de datos donde especifica los tiempos empleados para casa paso. Para determinar estos pasos hay que introducirse en el menú de Analysis Settings e introducir los pasos y tiempos deseados en el submenú de Step Controls.....	94
Figura IV. 30. Zona y dirección de la aplicación de la fuerza y momentos en los que se aplica dicha fuerza.....	94
Figura IV. 31. Gráfico de ANSYS que muestra el comportamiento de las deformaciones con respecto al tiempo.....	95
Figura IV. 32. Gráfico de ANSYS que muestra el comportamiento de las tensiones con respecto al tiempo.....	95
Figura IV. 33. Gráfico de ANSYS que muestra el comportamiento de las deformaciones con respecto al tiempo.....	96

Figura IV. 34. Gráfico de ANSYS que muestra el comportamiento de las tensiones con respecto al tiempo.	96
Figura IV. 35. Recorte de la tabla de datos donde especifica los tiempos empleados para casa paso. Para determinar estos pasos hay que introducirse en el menú de Analysis Settings e introducir los pasos y tiempos deseados en el submenú de Step Controls.	98

LISTADO DE TABLAS

Apartado I:

Tabla I. 1. Tabla resumen de la variación de algunas propiedades para distintos hidrocarburos [6]:.....	18
---	----

Apartado II:

Tabla II. 1. Proceso de búsqueda:	35
Tabla II. 2. Resultados obtenidos de la búsqueda:	36
Tabla II. 3. Resultados obtenidos de la búsqueda:	36
Tabla II. 4. Resultados obtenidos de la búsqueda:	37
Tabla II. 5. Resultados obtenidos de la búsqueda:	37
Tabla II. 6. Resultados obtenidos de la búsqueda:	37
Tabla II. 7. Resultados obtenidos de la búsqueda:	37
Tabla II. 8. Resultados obtenidos de la búsqueda:	38
Tabla II. 9. Resultados obtenidos de la búsqueda:	38
Tabla II. 10. Resultados obtenidos de la búsqueda:	38
Tabla II. 11. Resultados obtenidos de la búsqueda:	38
Tabla II. 12. Resultados obtenidos de la búsqueda:	38
Tabla II. 13. Resultados obtenidos de la búsqueda:	39

Apartado III:

Tabla III. 1. Propiedades típicas del material. Estas no han de considerarse como específicas en base a las indicaciones de la hoja de datos técnicos [26]:	42
---	----

Apartado IV:

Tabla IV. 1. Tabla comparativa 1 de las muestras ensayadas a 10 mm/min:.....	62
Tabla IV. 2. Tabla comparativa 2 de las muestras ensayadas a 10 mm/min:.....	62
Tabla IV. 3. Tabla comparativa 1 de las muestras ensayadas a 2 mm/min:.....	64
Tabla IV. 4. Tabla comparativa 2 de las muestras ensayadas a 2 mm/min:	64
Tabla IV. 5. Tabla comparativa 1 de las muestras ensayadas a 0,25 mm/min:.....	66
Tabla IV. 6. Tabla comparativa 2 de las muestras ensayadas a 0,25 mm/min:.....	66
Tabla IV. 7. Valores obtenidos a través del ensayo con las galgas extensométricas de Epsilon: 78	
Tabla IV. 8. Tabla de propiedades mecánicas principales de la muestra seleccionada:	81

Tabla IV. 9. Tabla comparativa de los valores originales de la muestra y los mismos tras aplicarles las correcciones de tensiones de Cauchy:	82
Tabla IV. 10. Datos introducidos para definir la propiedad.	83
Tabla IV. 11. Tabla comparativa de los resultados obtenidos con respecto a los valores obtenidos del cálculo con la tensión Cauchy:	88
Tabla IV. 12. Tabla comparativa del valor obtenido en la simulación con el valor real:.....	89
Tabla IV. 13. Tabla comparativa del valor obtenido en la simulación con el valor real:.....	89
Tabla IV. 14. Tabla comparativa de los resultados obtenidos con respecto a los valores obtenidos del cálculo con la tensión Cauchy:	90
Tabla IV. 15. Tabla comparativa de todos los valores obtenidos de las simulaciones con respecto a los valores reales obtenidos en los ensayos.....	91
Tabla IV. 16. Tabla comparativa de los valores obtenidos con la propiedad MISO y los valores de tensión Cauchy, con respecto a los valores reales del material:	95
Tabla IV. 17. Tabla comparativa de los valores obtenidos con la propiedad MISO y los valores de tensión originales del ensayo de tracción, con respecto a los valores reales del material:...	95
Tabla IV. 18. Tabla comparativa de los valores obtenidos con la propiedad BISO y los valores de tensión Cauchy con respecto a los valores reales del material:	96
Tabla IV. 19. Tabla comparativa de los valores obtenidos con la propiedad BISO y los valores de tensión originales del ensayo de tracción, con respecto a los valores reales del material:	96
Tabla IV. 20. Tabla comparativa de todos los valores obtenidos de las simulaciones con respecto a los valores obtenidos en los ensayos de tracción a fluencia:.....	97
Tabla IV. 21. Tabla comparativa de los resultados obtenidos aplicando las tensiones de Cauchy con respecto a los resultados originales:	99
Tabla IV. 22. Tabla comparativa de los resultados obtenidos aplicando las tensiones de originales con respecto a los resultados originales de tracción:	99
Tabla IV. 23. Tabla comparativa de los resultados obtenidos aplicando las tensiones de Cauchy con respecto a los resultados originales:	99
Tabla IV. 24. Tabla comparativa de los resultados obtenidos aplicando las tensiones de originales con respecto a los resultados originales de tracción:	100
Tabla IV. 25. Tabla comparativa de todos los valores obtenidos de las simulaciones con respecto a los valores obtenidos en los ensayos de tracción a fluencia:.....	100
Tabla IV. 26. Tabla comparativa de los resultados obtenidos aplicando las tensiones de originales con respecto a los resultados originales de tracción:	101
Tabla IV. 27. Tabla comparativa de los resultados obtenidos aplicando las tensiones de originales con respecto a los resultados originales de tracción:	102
Tabla IV. 28. Tabla comparativa de todos los valores obtenidos de las simulaciones con respecto a los valores reales obtenidos en los ensayos.....	102

LISTADO DE ECUACIONES

Apartado I:

Ecuación I. 1.....	27
Ecuación I. 2.....	27

Apartado III:

Ecuación III. 1.....	50
Ecuación III. 2.....	50
Ecuación III. 3.....	50
Ecuación III. 4.....	50
Ecuación III. 5.....	51
Ecuación III. 6.....	51
Ecuación III. 7.....	51
Ecuación III. 8.....	51
Ecuación III. 9.....	52
Ecuación III. 10.....	52
Ecuación III. 11.....	54
Ecuación III. 12.....	54
Ecuación III. 13.....	54
Ecuación III. 14.....	54
Ecuación III. 15.....	55
Ecuación III. 16.....	55
Ecuación III. 17.....	55
Ecuación III. 18.....	57
Ecuación III. 19.....	57
Ecuación III. 20.....	57
Ecuación III. 21.....	58
Ecuación III. 22.....	58
Ecuación III. 23.....	58
Ecuación III. 24.....	58
Ecuación III. 25.....	59
Ecuación III. 26.....	59
Ecuación III. 27.....	59

Ecuación III. 28.....	59
-----------------------	----

Apartado IV:

Ecuación IV. 1	82
Ecuación IV. 2	82
Ecuación IV. 3	83
Ecuación IV. 4	84
Ecuación IV. 5	84

I. ANTECEDENTES

I. ANTECEDENTES

1. INTRODUCCIÓN

Aunque normalmente se considera que el plástico es un invento moderno, hay datos de civilizaciones y científicos que desarrollaron materiales poliméricos a partir de resinar y cauchos naturales, sin embargo, se tiene que la industria del plástico se desarrolló a finales de la primera década de 1900 cuando el químico belga, Leo Baekeland, produjo y patentó el primer plástico sintético. Este primer polímero se conoce como baquelita en honor a su descubridor y se forma a partir de la síntesis de moléculas de fenol y formaldehído.

Este hecho incentivó a otros investigadores a buscar y desarrollar otros polímeros a partir de otras moléculas sencillas. A los pocos años de desarrollarse la baquelita, también se inventa el celofán y se desarrolla la producción de Policloruro de Vinilo (PVC) y Poliacetato de Vinilo (PVA).

En la década de 1930 ocurren otros dos hechos que impulsaron la investigación de los polímeros y su producción masiva en la industria. Se aprende a desarrollar plásticos a partir del petróleo y a finales de esta década, se mejora el moldeo por inyección, logrando automatizarlo con la consecuente reducción de precio, posibilitando que llegue a más sectores.

Durante la 2ª Guerra Mundial, la necesidad de aumentar la producción incentiva la expansión del plástico mejorando y buscando nuevas soluciones para su producción por parte de la industria y tratando de desarrollar nuevos materiales por parte de los investigadores. Alrededor de 1950, numerosos grupos de investigadores se centran en el desarrollo de la polimerización de las olefinas (o alquenos), principalmente etileno y propileno.

La investigación y el desarrollo de los plásticos han ido aumentando década a década llegando cada vez a más sectores de la industria motivados por su precio y su fácil producción y haciéndose cada vez más presente en el día a día de los consumidores [1] [2].

Centrándose en cifras de producción, según datos proporcionados por Greenpeace en 2016, a nivel mundial se alcanzaron los 335 millones de toneladas, sumándole a esta cifra los cerca de 61 millones de toneladas que provienen de la producción de fibras sintéticas. De esta cifra, unos 60 millones de toneladas tienen origen europeo, lo que representa el 19% de la producción global. En cuanto a demanda/consumismo de este tipo de materiales, se tienen datos de que a nivel mundial se consumen alrededor de 35 kilogramos por persona. Esta cifra sube hasta los 92 kilogramos per cápita si nos centramos solo en la parte occidental de Europa. Si se cierra más el marco de estudio y se centra a nivel nacional, en España se consume el 7,7% del plástico producido, que lo destina principalmente al sector del envase y embalaje (35%) y al sector de la construcción (23%). Este dato pasa a ser preocupante cuando se observa que en España solo se recicla el 30% de los plásticos consumidos [3] [4] [5].

2. FORMACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS

2.1 Naturaleza de los materiales poliméricos:

Los plásticos o polímeros son materiales de estructura orgánica que se forman a partir del encadenamiento de la unidad básica o monómero. Este hecho se realiza para aumentar el peso molecular del material y es que, el peso molecular depende de la cantidad de monómeros y, por ende, de la longitud de la cadena polimérica.

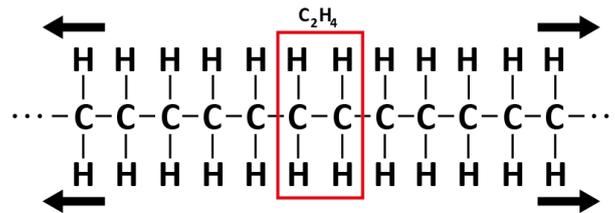


Figura I. 1. Representación 2D de una estructura polimérica. La unidad monomérica básica es de etileno (C_2H_4).

Como se puede observar en la Tabla 1, los materiales poliméricos tienen estructuras basadas en el carbono y a medida que esta estructura aumenta, aumenta la longitud de su cadena polimérica, la densidad del material aumenta. A pesar de este aumento, los plásticos son considerados materiales de elevada ligereza debido a que, generalmente la densidad de estos materiales ronda entre los 1 y $1,5 \text{ g/cm}^3$.

Tabla I. 1. Tabla resumen de la variación de algunas propiedades para distintos hidrocarburos [6]:

Nombre	Fórmula	Peso Molecular ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)	Densidad ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Punto de fusión ($^{\circ}\text{C}$)	Punto de ebullición ($^{\circ}\text{C}$)
Metano	CH_4	16	0,00066	-182	-161
Etano	C_2H_6	30	0,00128	-183	-89
Propano	C_3H_8	44	0,0018	-190	-44
Butano	C_4H_{10}	52	0,0024	-138	-1
Polietileno	$\text{C}_{50.000}\text{H}_{100.002}$	700.002	0,995	120	-

Estos materiales se han hecho muy populares en el ámbito de la ingeniería debido a su amplio rango de propiedades mecánicas, eléctricas, ópticas, térmicas, etc. Se pueden encontrar desde polímeros muy blandos a otros de gran dureza y resistencia, tanto física como química. Además, también se pueden encontrar polímeros con diferentes grados de transparencia, con buenas propiedades eléctricas, pudiendo encontrar tanto polímeros aislantes como conductores [6].

2.2 Clasificación de los materiales poliméricos:

Los materiales poliméricos se pueden clasificar de diversas maneras, pero es bastante habitual clasificarlos según su estructura, debido a que esta afecta al comportamiento del propio polímero. En este caso se pueden clasificar en 2 grandes grupos:

1- Polímeros lineales (Figura 1.2), también conocidos como **termoplásticos**, son polímeros que, durante el proceso de obtención o polimerización, muestran una funcionalidad igual a 2 ($f = 2$), es decir, solo pueden crecer por dos lados y por tanto únicamente se pueden obtener polímeros lineales, polímeros con cadenas lineales.



Figura 1. 2. Proceso de activación del monómero y posterior polimerización para la obtención del polímero lineal.

Dentro de este grupo de polímeros se pueden encontrar plásticos como: Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS), Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Poliestireno (PS), etc.

La estructura lineal de estos polímeros termoplásticos es la responsable de las deformaciones elásticas y plásticas que sufren ante exigencias físicas y también es responsable de que estos materiales se puedan fundir con la aplicación de calor. Esto ocurre debido a que no existe ningún tipo de enlace entre las diferentes cadenas [7]. Esta posibilidad también hace que los termoplásticos sean considerados plásticos que se pueden reciclar.

2- Polímeros reticulares (Figura 1.3), que también se conocen como **termoestables**. Este grupo de polímeros obtienen una funcionalidad mayor que 2 ($f > 2$) durante los procesos de obtención, por lo que los polímeros obtenidos presentan una estructura tridimensional similar a una red.



Figura 1. 3. Proceso de activación del monómero y posterior polimerización para la obtención de la red tridimensional de un polímero reticular.

Dentro de este grupo de polímeros se pueden encontrar plásticos termoestables como: Epoxi (EP), Fenol-Formaldehídos (PF), Poliuretano (PUR), etc.

Los termoestables son característicos por presentar unas propiedades mecánicas de elevada resistencia y dureza, pero a su vez, ser frágiles. Este es debido a que la red tridimensional que se forma dificulta o impide el deslizamiento entre las cadenas [7].

Industrialmente también existe un **tercer grupo estructural** de polímeros que destacan por tener una gran elasticidad y que conocidos como **polímeros entrecruzados** o **elastómeros**. Este tipo de material se trata en realidad de polímeros lineales, pero que, debido a unas características mecánicas pobres, se les aplica un proceso de entrecruzamiento o reticulación para mejorar dichas propiedades. En algunos polímeros, principalmente en cauchos, este proceso se conoce como vulcanización [7].

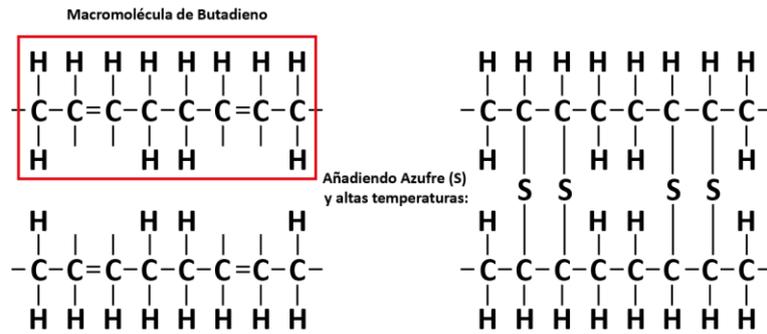


Figura I. 4. Representación gráfica de 2 macromoléculas de butadieno, que en presencia de azufre (S) y altas temperaturas, se vulcaniza rompiéndose los dobles enlaces y las moléculas se enlazan con átomos de azufre.

Dentro de este grupo de polímeros se pueden encontrar elastómeros como: Estirénicos (SBC), Vulcanizados termoplásticos (TPV), Poliuretano termoplástico (TPU), etc.

3. POLÍMEROS BIODEGRADABLES

Como ya se ha indicado en el apartado 1 de introducción, el uso de materiales plásticos va en aumento y se tienen previsiones de que sigan aumentando, lo que ha desencadenado que esta producción masiva se haya convertido en un problema medioambiental por el bajo grado de reutilización que tienen estos materiales y la difícil eliminación de los residuos que generan. Este hecho también ha llevado a que, desde sectores de producción de materiales plásticos, principalmente los que desarrollan y/o trabajan con polímeros termoplásticos, se hayan centrado en la investigación y desarrollo de nuevos materiales que sean respetuosos con el medioambiente. Según fuentes de la *European Bioplastics* [10], asociación impulsora de la industria de los bioplásticos en Europa, a nivel mundial, en 2018 se produjeron 2,11 millones de toneladas de bioplásticos, de los cuales 1,20 millones fueron de plásticos con base biológico y/o no-biodegradables (Figura I.5).

Global production capacities of bioplastics

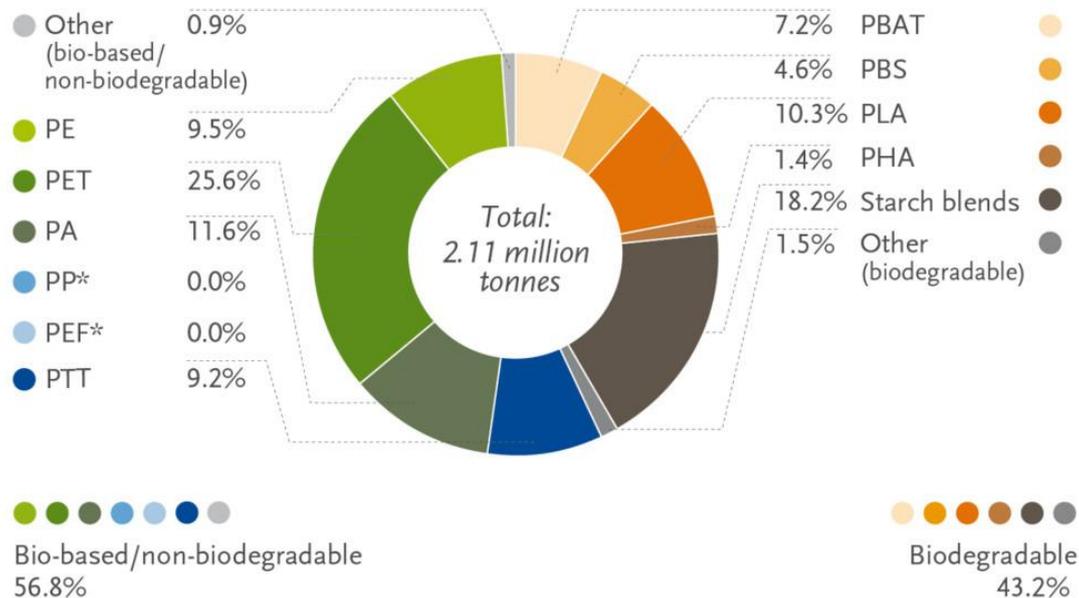


Source: European Bioplastics, nova-Institute (2018)
More information: www.european-bioplastics.org/market and www.bio-based.eu/markets

Figura I. 5. Gráfico de la producción total de bioplásticos y la predicción de su futura producción [10].

De estos 2,11 millones de toneladas, el 25,6% de la producción es de PET, uno material no biodegradable. Esta cifra supone más del doble de producción que de PLA, que es el polímero biodegradable más producido con un 10,3% de la cantidad total (Figura I.6).

Global production capacities of bioplastics 2018 (by material type)



*Bio-based PP and PEF are currently in development and predicted to be available at commercial scale in 2023

Source: European Bioplastics, nova-Institute (2018)

More information: www.european-bioplastics.org/market and www.bio-based.eu/markets

Figura I. 6. Gráfico de la producción total de bioplásticos en 2018, dividido por tipos de materiales plásticos [10].

En cuanto a polímeros biodegradables, se pueden encontrar de dos tipos, de origen natural y por tanto proveniente de fuentes renovables; y polímeros biodegradables sintéticos o de origen petroquímico y no renovable.

3.1 Clasificación de los polímeros biodegradables de origen natural:

Este tipo de polímeros, o biopolímeros, se podrían dividir en 3 grupos que se diferencian por su estructura [8][31]:

1. **Biopolímeros con estructuras de polisacáridos.** Estos biopolímeros surgen a partir de la unión de un elevado número de monosacáridos, o lo que es lo mismo, surge por la unión de una gran cantidad de azúcares simples. A partir de estos polisacáridos se puede obtener almidón, celulosa, quitina y sus derivados [9]. Este grupo a su vez se puede dividir en otros dos subgrupos:
 - a. En homopolisacáridos,
 - b. Y en heteropolisacáridos.
2. **Biopolímeros con estructuras proteicas.** Este grupo de polímeros no destaca por su aplicación industrial para la obtención de materiales compuestos, su aplicación principal se encuentra dentro de sectores como el de alimentación, farmacia, medicina o membranas entre otros [9].

- 3. Biopolímeros con estructuras de poliésteres** (Polímeros bacterianos), que se pueden clasificar como, biopolímeros naturales, al poder ser producidos a partir de microorganismo como los polihidroxicanoatos (PHA), que se produce a partir de la fermentación del azúcar, o a partir de monómeros biológicos como el ácido poliláctico (PLA).

También hay poliésteres de origen petroquímico y por tanto de fuente no renovables. Esta división de biopolímero, mediante ciertos procesos químicos, se puede conseguir que sean fácilmente biodegradables. Esta clase de poliésteres se puede dividir en dos subgrupos: poliésteres alifáticos y poliésteres aromáticos.

A esta clasificación se le podría añadir un cuarto grupo con los polímeros conocidos como *biocomposites*, que son el resultado de la combinación de diversos polímeros de origen natural [8] [31].

4. ÁCIDO POLILÁCTICO (PLA)

Como se ha podido observar en las figuras I.5 y I.6, el ácido poliláctico, conocido más comúnmente como PLA, es uno de los biopolímeros más producido y el más empleado en cuanto a polímeros biodegradables. Según datos proporcionados por la asociación *European Bioplastics*, en 2018 se produjeron alrededor de 210.000 toneladas en todo el mundo [10].

4.1 Obtención del PLA:

El ácido láctico fue elaborado por primera vez en 1932 por Wallace Carothers [11] y como ya se ha indicado, pertenece a la familia de los biopolímeros con estructura de poliéster alifático. Su monómero proviene del ácido láctico, cuyo nombre por la IUPAC es *Ácido 2-hidroxipropáico* cuya fórmula semidesarrollada es $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}(\text{OH})-\text{COOH}$ y su estructura molecular (Figura I.7).

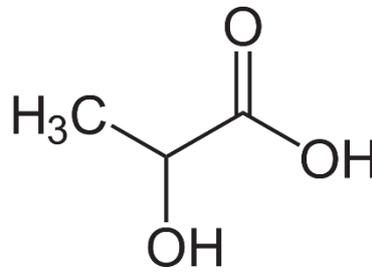


Figura I. 7. Fórmula estructural del ácido láctico. (Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81cido_%C3%A1ctico)

La obtención de este biopolímero puede variar según el país productor, aunque su principal fuente de producción es a partir del almidón de maíz, materia prima a partir de la cual, mediante una síntesis química o mediante fermentación, se obtiene el monómero. Para la obtención del ácido poliláctico, se emplean principalmente dos métodos que se muestran en la Figura I.8. El primer método, se basa en la polimerización directa por condensación, producida a partir de la fermentación de los azúcares; y que requiere de la aplicación de disolventes, altas temperaturas y vacío y, además, de la eliminación del agua que se produce. El segundo método, es una forma de obtención indirecta que se realiza con la apertura del anillo. Este último método también es conocido como ROP, que significa *Ring Opening Polymerization* [9] [11] [12].

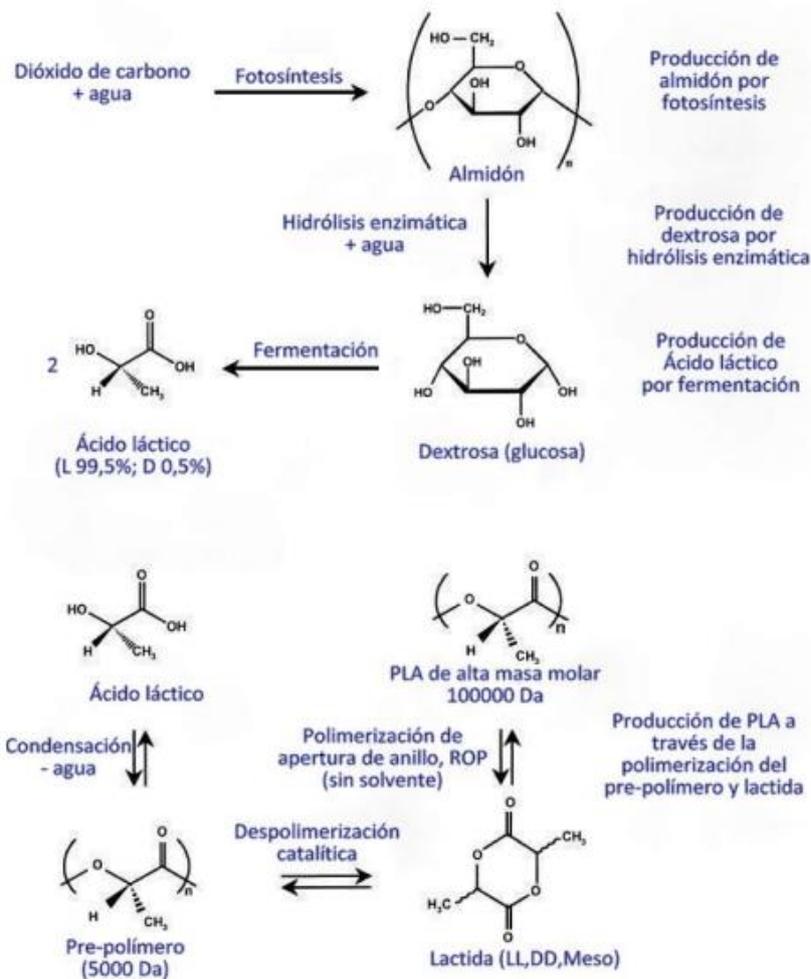


Figura I. 8. Explicación gráfica de los dos métodos de obtención del PLA [11].

4.2 Propiedades y aplicaciones:

Las propiedades físicas y las propiedades mecánicas del ácido poliláctico dependen en gran medida de su peso molecular, de la cristalinidad que presente, de las temperaturas que se hayan empelado durante su procesado y el método de enfriamiento utilizado. La cristalinidad del PLA puede variar desde el 0% hasta el 40%, aunque este factor depende de la estructura de la cadena polimérica del material y la relación de mesoformas D- y L- que presente. Tomando un material con un 100% de L-PLA, el resultado sería un polímero con un punto de fusión alto y una cristalinidad elevada. Sin embargo, si se realiza una combinación de D- y L-, el resultado es un polímero amorfo. Por ejemplo, con un 37% de cristalinidad, el PLA obtenido presenta una temperatura de transición vítrea (Tg), entre los 60 y 65 °C y una temperatura de fusión entorno a los 175 °C.

Este polímero, de la familia de los termoplásticos, por lo general se presenta de forma transparente e incoloro. En cuanto a sus propiedades mecánicas, presenta un rango similar al que se puede obtener con los polímeros de origen petroquímico, pero con una elongación baja, no suele superar el 6%. Su módulo de Young se encuentra entre los 2,7 y los 16 GPa, su

resistencia a tracción o límite elástico se sitúa sobre los 53 MPa y el módulo de flexión puede ir desde los 350 MPa hasta los 450 MPa, aunque como ya se ha indicado, su elongación es baja, por lo que su comportamiento se caracteriza como frágil [9] [13].

Todas estas características, unidas a un precio competitivo y a que es un polímero biodegradable, renovable y que se considera inerte para el ser humano, ha hecho que resulte un material altamente atractivo para el sector industrial y para los investigadores, como bien se puede constatar en la Figura I.9, donde se muestra un histograma del número de publicaciones por año de artículos que tengan relación con el PLA.

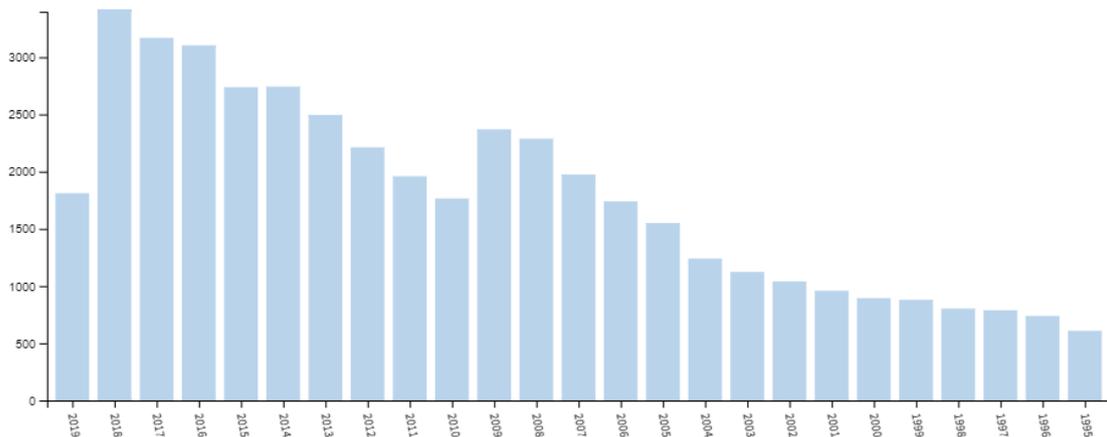


Figura I. 9. Gráfico con número de publicaciones por año de artículos con el tema de Acid Poly(lactic acid) OR PLA. (Fuente: Web of Science).

En cuanto a aplicaciones prácticas del ácido poliláctico, su principal sector de aplicación se encuentra dentro de la industria alimentaria, en forma de envases y embalajes de los alimentos. Actualmente también tiene una aplicación interesante en el sector médico como material de sutura capaz de ser reabsorbido por el paciente.

5. VISCOELASTICIDAD

Para un ingeniero es necesario conocer el comportamiento mecánico real de los materiales para adecuar y optimizar los diseños y los cálculos de resistencia de las piezas. El comportamiento mecánico de los materiales se podría agrupar en dos grandes divisiones [14]:

- 1- Comportamiento a corto plazo, el cual, es independiente de la variable tiempo.
- 2- Comportamiento a largo plazo, que es dependiente del tiempo.

Para muchos materiales, el factor del tiempo carece de importancia, sin embargo, en el caso de los materiales plásticos, este factor sí que hay que tenerlo en cuenta y es que, en el caso de estos materiales, su comportamiento es viscoelástico o, dicho de otra forma, presenta un comportamiento dual, se puede comportar como un sólido elástico y como un fluido viscoso [15] [16].

- 1- **Comportamiento elástico.** Este comportamiento es habitual verlo representado gráficamente como un muelle o resorte (Figura I.10) y viene definido por la Ley de Hooke (Ecuación I.1), que define la proporcionalidad entre las tensiones y las deformaciones que se producen. La respuesta elástica de un material se considera que es instantánea e independiente del tiempo.

$$\sigma = \xi \cdot \varepsilon$$

Ecuación I. 1

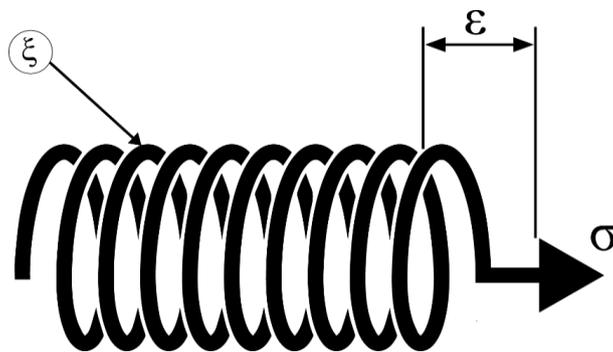


Figura I. 10. Representación gráfica de la Ley de Hooke.

- 2- **Comportamiento viscoso.** Este fenómeno se representa habitualmente como un émbolo o pistón (Figura I.11) y su comportamiento se rige bajo la Ley de Newton (Ecuación I.2), que establece la proporcionalidad entre las tensiones que se aplican y la velocidad a la que ocurren las deformaciones.

$$\sigma = \eta \cdot \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)$$

Ecuación I. 2

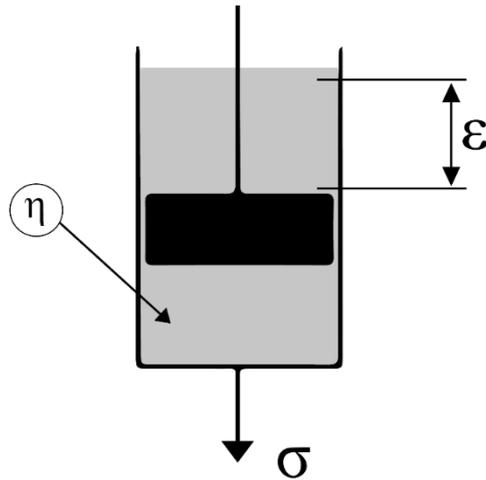


Figura I. 11. Representación gráfica de la Ley de Newton.

Es necesario conocer los fenómenos o sucesos que se producen en los materiales poliméricos a lo largo del tiempo, ya que esta variable condicionará en cierta medida las posibles aplicaciones del material. Para los polímeros, la influencia del tiempo se estudia a partir de los fenómenos de fluencia y de relajación de tensiones [14].

- 1- **Fenómeno de fluencia.** Este fenómeno o tipo de comportamiento se da cuando el material plástico trabaja con unas tensiones constantes ($\sigma = \text{cte.}$), lo que provoca que en un polímero la deformación aumento con respecto al tiempo (Figura I.12).

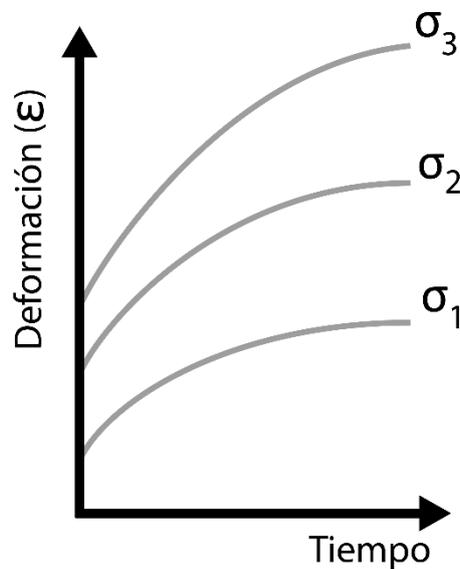


Figura I. 12. Gráfico representativo de un comportamiento a fluencia con 3 tensiones diferentes [30].

- 2- **Fenómeno de relajación.** Este tipo de comportamiento se da cuando el material trabaja o se ve sometido a una deformación constante ($\epsilon = \text{cte.}$). En este caso, las tensiones disminuyen con respecto al tiempo produciéndose lo que se conoce como liberación de tensiones (Figura I.13).

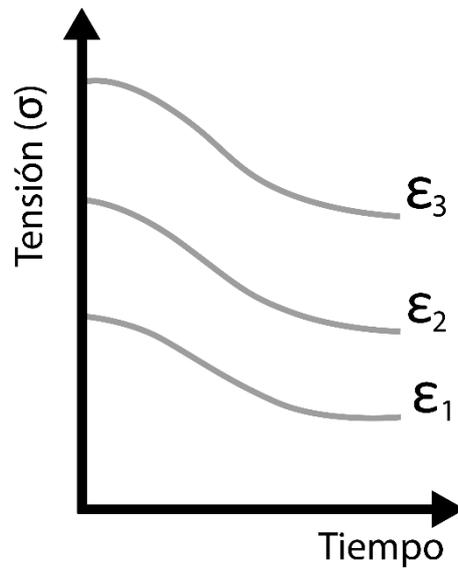


Figura I. 13. Gráfico representativo de un comportamiento a relajación de tensiones con 3 deformaciones diferentes [30].

Además de estos dos fenómenos o tipos de comportamiento, en ingeniería es importante estudiar el Comportamiento Isocrono [14]. Este comportamiento o tipo de análisis mantiene constante la variable tiempo y por tanto gráficamente se representan las variaciones de las deformaciones que sufre el material, en función de las tensiones que se aplican (Figura I.14). Este comportamiento establece las bases para el cálculo en ingeniería pudiendo obtener las propiedades mecánicas del material para distintos niveles de trabajo.

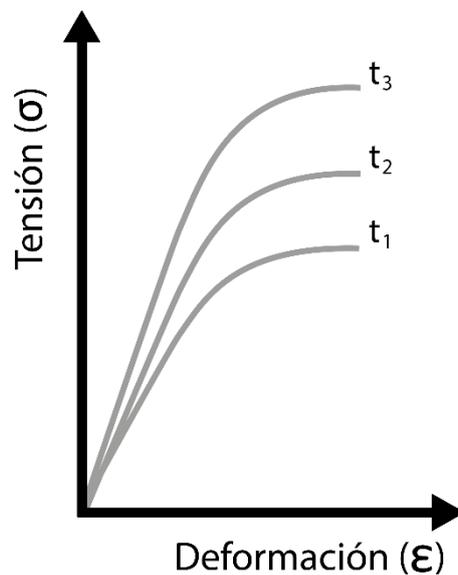


Figura I. 14. Representación gráfica de tres curvas isocronas. La variable tiempo se fija y se estudian las variaciones de las deformaciones con respecto a la tensión [30].

5.1 Cálculo y modelización del comportamiento viscoelástico:

Obtener las curvas del comportamiento del material a fluencia, a relajación y/o a través de las curvas isócronas, no es suficiente para entender y poder aplicar correctamente el material polimérico de manera correcta. Este es debido al ya mencionado comportamiento viscoelástico de los polímeros, este comportamiento hace que los métodos tradicionales de cálculo no se ajusten a la realidad debido a que estos no suelen tener en cuenta las variables de tiempo y temperatura que influyen en la respuesta final del material [14] [15] [16] [17].

A lo largo de los años se han desarrollado diversos métodos o modelos de cálculo, tanto físicos como matemáticos, que tratan de simular el comportamiento y la respuesta del plástico de forma real mediante el uso de muelles o émbolos o mediante la aplicación de complejas funciones matemáticas. Estos modelos de cálculo son además lo que emplean los softwares de cálculo de elementos finitos para tratar de ajustar a la realidad el tipo de comportamiento simulado.

II. OBJETIVOS Y PROCESO DE INVESTIGACIÓN

II. OBJETIVOS Y PROCESO DE INVESTIGACIÓN

1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal del presente proyecto es estudiar e investigar el comportamiento viscoelástico del ácido poliláctico (PLA), para ello, se hará uso de las técnicas de caracterización que se crean necesarias con tal de conocer las propiedades mecánicas y viscoelásticas del polímero y poder obtener datos experimentales del comportamiento de este. Estos datos se analizarán y trabajarán con tal de que sean los apropiados para emplearlos en el software de simulación ANSYS y poder obtener unos resultados de los esfuerzos representados que sean fieles al comportamiento real del material.

2. OBJETIVO PARTICULAR

Para alcanzar el objetivo general definido en el apartado anterior, se han planteado los siguientes objetivos particulares:

- Realizar una revisión bibliográfica sobre procesos de caracterización y simulación del comportamiento viscoelástico de los polímeros, prestando especial atención a toda información que trate del ácido poliláctico o polímeros de comportamiento similar.
- Estudiar el comportamiento del PLA mediante la caracterización mecánicas de probetas del material de estudio.
- Analizar y corregir los resultados obtenidos aplicando modelos matemáticos existentes de comportamiento viscoelástico.
- Estudiar métodos de implementación de datos experimentales en el programa ANSYS.
- Simular los esfuerzos ensayados y contrastar los resultados obtenidos de la simulación con los valores reales de la caracterización.

3. PROCESO DE INVESTIGACIÓN

Para alcanzar los objetivos marcados en el presente proyecto, se ha tenido que realizar previamente un proceso de búsqueda de información con el objetivo de conocer que han realizado otras y otros investigadores y con ello poder trazar un proceso de investigación y desarrollo del proyecto.

3.1 Búsqueda de información [18]:

Como punto de partida de cualquier trabajo o proyecto en el ámbito de la investigación, es de gran importancia realizar una documentación previa del tema de investigación con el objeto de establecer una línea base de que se ha realizado y que se está investigando en la actualidad al tema referente, poder establecer unas vías o guías a seguir para el desempeño del trabajo y, además, poder cubrir las lagunas y/o falta de conocimientos cuando uno se inicia en un campo de investigación y trabajo.

No existe una única metodología para realizar una búsqueda de información y que se pueda mejor o ideal. Para la realización del proceso de investigación se van a seguir una serie de pasos que van a ayudar a definir los problemas y las necesidades de información y acotar que tipo de información se pretende obtener y poder gestionar los resultados obtenidos.

Para realizar una búsqueda lo más completa posible, se va a emplear la base de datos de *Web of Science* (WOS) y la búsqueda se realizará en castellano y en inglés para obtener un mayor alcance en cuanto a resultados posibles.

La *Web of Science* es una plataforma web que recoge multitud de publicaciones de diferentes ramas de investigación desde 1945.



Figura II. 1. Logo de Web of Science.

3.2 Etapas del proceso de búsqueda:

Los objetivos de realizar este proceso de búsqueda y su finalidad es obtener información acerca del comportamiento viscoelástico de los polímeros, en concreto para este trabajo, del ácido poliláctico, también conocido como PLA; las diferentes técnicas de caracterización de plásticos en viscoelasticidad, los modelos físicos y matemáticos empleados para la simulación de su comportamiento real y su modelización para el Método de Elementos Finitos (FEM, MEF en inglés), en este caso para ANSYS.

Una vez establecidos los problemas de los que se requiere información, es necesario también acotar esta información en un espacio temporal por posible obsolescencia de los resultados

obtenidos. Para este caso, únicamente se acotará o al menos se priorizarán los resultados más recientes para el caso de la modelización de datos para FEM, principalmente por los cambios que sufren los softwares de simulación y cálculo. En el resto de los casos no se tendrá en cuenta la fecha de publicación por encima del grado de similitud de resultados.

Como ya se ha indicado anteriormente, la fuente de información será WOS, del que hay que destacar que funciona con los operadores lógicos *AND* (Y), *OR* (O) y *NOT* (NO). Estos operadores son los que permiten crear relaciones entre diferentes conceptos y su correcta utilización pueden acotar la búsqueda y hacerla más precisa.

3.3 Proceso de búsqueda de información:

A partir de estos operadores y una vez establecidos los objetivos de búsqueda, se considera útil escribir frases acerca de lo que se pretende buscar e intentar identificar los conceptos clave o *keywords*. Debido a la pluralidad del lenguaje y en este caso, al emplear también dos idiomas diferentes para el proceso de búsqueda, es necesario e importante tener en cuenta posibles sinónimos o términos similares, que se puedan emplear en el ámbito de la ingeniería para definir un mismo concepto.

Una frase que resume el proyecto y que cuenta con un número considerable de conceptos clave para el desarrollo del trabajo podría ser:

- **Caracterización mecánica y caracterización viscoelástica de ácido poliláctico (PLA)** para conocer sus propiedades y su **comportamiento viscoelástico** y empleo de **modelos numéricos** para su simulación mediante programas **FEM**, en concreto, **ANSYS**.

Una vez establecidos los conceptos clave, es importante buscar sinónimos y términos que tengan relación con el significado del proyecto y/o que se emplean en el ámbito de la ingeniería e investigación científica. Esto es de obligada aplicación a los dos idiomas de búsqueda.

Tabla II. 1. Proceso de búsqueda:

PROCESO DE BÚSQUEDA			
Castellano		Inglés	
Concepto		Concepto	
Caracterización	Aternativas	Characterization	Aternativas
	Ensayo de tracción		Tensile test
Mecánica	Aternativas	Mechanical	Aternativas
			-
Viscoelasticidad	Aternativas	Viscoelasticity	Aternativas
	Viscoelástica/o		Viscoelastic
Ácido poliláctico	Aternativas	Acid polylactic	Aternativas
	PLA		Acid Poly(lactic)
	Polímero		Polymer
	Termoplástico		PLA
	-		Thermoplastic
Comportamiento	Aternativas	Behaviour	Aternativas
	Propiedades		Properties

Continúa en la siguiente página.

Viscoso	Aternativas	Viscous	Aternativas
	Viscosidad		Viscosity
Fluencia	Aternativas	Creep	Aternativas
			Tensile creep
Relajación	Aternativas	Relaxation	Aternativas
	-		-
MEF	Aternativas	FEM	Aternativas
	ANSYS		FEA
	Elementos Finitos		ANSYS
	Método de elementos finitos		Finite Element
	-		Finite Elemento Method

De los presentes términos se podrían dividir en dos procesos de búsqueda, uno centrado en la caracterización del PLA y su comportamiento viscoelástico; y el otro en cómo simular el comportamiento viscoelástico de manera real en ANSYS.

De la combinación de conceptos Caracterización + Mecánica, únicamente se tendrán en cuenta las técnicas empleadas, para el resto de información se atenderá a su respectiva normativa, en caso de que la haya.

De las búsquedas realizadas, únicamente se tendrán en cuenta los resultados que tengan acceso abierto, que se marcarán entre paréntesis en las siguientes tablas.

Búsquedas:

1.a- (Caracterización **OR** Ensayo tracción) **AND** (Viscoelasticidad **OR** Viscoelástico)

1.b- (Characterization **OR** Tensile test) **AND** (Viscoelasticity **OR** Viscoelastic)

Tabla II. 2. Resultados obtenidos de la búsqueda:

NÚMERO DE RESULTADOS		
BUSCADOR	CASTELLANO	INGLÉS
WOS	9 (8)	10.049 (1.171)

2.a- (Caracterización **OR** Ensayo tracción) **AND** (Viscoelasticidad **OR** Viscoelástico) **AND** (Ácido Poliláctico **OR** PLA **OR** Polímero **OR** Termoplástico)

2.b- (Characterization **OR** Tensile test) **AND** (Viscoelasticity **OR** Viscoelastic) **AND** (Acid polylactic **OR** Acid Poly(lactic) **OR** Polymer **OR** PLA **OR** Thermoplastic)

Tabla II. 3. Resultados obtenidos de la búsqueda:

NÚMERO DE RESULTADOS		
BUSCADOR	CASTELLANO	INGLÉS
WOS	0	4.010 (363)

3.a- (Caracterización **OR** Ensayo tracción) **AND** (Viscoelasticidad **OR** Viscoelástico) **AND** (Ácido Poliláctico **OR** PLA **OR** Polímero **OR** Termoplástico) **AND** (MEF **OR** ANSYS **OR** Elementos Finitos **OR** Método de elementos finitos)

3.b- (Characterization **OR** Tensile test) **AND** (Viscoelasticity **OR** Viscoelastic) **AND** (Acid polylactic **OR** Acid Poly(lactic) **OR** Polymer **OR** PLA **OR** Thermoplastic) **AND** (FEM **OR** FEA **OR** ANSYS **OR** Finite Element **OR** Finite Element Method)

Tabla II. 4. Resultados obtenidos de la búsqueda:

NÚMERO DE RESULTADOS		
BUSCADOR	CASTELLANO	INGLÉS
WOS	0	282 (25)

4.a- (Comportamiento **OR** Propiedades) **AND** (Viscoelasticidad **OR** Viscoelástico)

4.b- (Behaviour **OR** Properties) **AND** (Viscoelasticity **OR** Viscoelastic)

Tabla II. 5. Resultados obtenidos de la búsqueda:

NÚMERO DE RESULTADOS		
BUSCADOR	CASTELLANO	INGLÉS
WOS	47 (33)	78.398 (8.715)

5.a- (Comportamiento **OR** Propiedades) **AND** (Viscoelasticidad **OR** Viscoelástico) **AND** (Ácido Poliláctico **OR** PLA **OR** Polímero **OR** Termoplástico)

5.b- (Behaviour **OR** Properties) **AND** (Viscoelasticity **OR** Viscoelastic) **AND** (Acid polylactic **OR** Acid Poly(lactic) **OR** Polymer **OR** PLA **OR** Thermoplastic)

Tabla II. 6. Resultados obtenidos de la búsqueda:

NÚMERO DE RESULTADOS		
BUSCADOR	CASTELLANO	INGLÉS
WOS	3 (2)	25.537 (2.203)

6.a- (Comportamiento **OR** Propiedades) **AND** (Viscoelasticidad **OR** Viscoelástico) **AND** (Ácido Poliláctico **OR** PLA **OR** Polímero **OR** Termoplástico) **AND** (MEF **OR** ANSYS **OR** Elementos Finitos **OR** Método de elementos finitos)

6.b- (Behaviour **OR** Properties) **AND** (Viscoelasticity **OR** Viscoelastic) **AND** (Acid polylactic **OR** Acid Poly(lactic) **OR** Polymer **OR** PLA **OR** Thermoplastic) **AND** (FEM **OR** FEA **OR** ANSYS **OR** Finite Element **OR** Finite Element Method)

Tabla II. 7. Resultados obtenidos de la búsqueda:

NÚMERO DE RESULTADOS		
BUSCADOR	CASTELLANO	INGLÉS
WOS	0	1.454 (125)

7.a- Fluencia **AND** (Ácido Poliláctico **OR** PLA **OR** Polímero **OR** Termoplástico)

7.b- (Creep **OR** Tensile creep) **AND** (Acid polylactic **OR** Acid Poly(lactic) **OR** Polymer **OR** PLA **OR** Thermoplastic)

Tabla II. 8. Resultados obtenidos de la búsqueda:

NÚMERO DE RESULTADOS		
BUSCADOR	CASTELLANO	INGLÉS
WOS	6 (4)	61.071 (5.264)

8.a- Fluencia **AND** (Ácido Poliláctico **OR** PLA **OR** Polímero **OR** Termoplástico) **AND** (MEF **OR** ANSYS **OR** Elementos Finitos **OR** Método de elementos finitos)

8.b- (Creep **OR** Tensile creep) **AND** (Acid polylactic **OR** Acid Poly(lactic) **OR** Polymer **OR** PLA **OR** Thermoplastic) **AND** (FEM **OR** FEA **OR** ANSYS **OR** Finite Element **OR** Finite Element Method)

Tabla II. 9. Resultados obtenidos de la búsqueda:

NÚMERO DE RESULTADOS		
BUSCADOR	CASTELLANO	INGLÉS
WOS	1	4.030 (434)

9.a- (Comportamiento **OR** Propiedades) **AND** Fluencia **AND** (MEF **OR** ANSYS **OR** Elementos Finitos **OR** Método de elementos finitos)

9.b- (Behaviour **OR** Properties) **AND** (Creep **OR** Tensile creep) **AND** (FEM **OR** FEA **OR** ANSYS **OR** Finite Element **OR** Finite Element Method)

Tabla II. 10. Resultados obtenidos de la búsqueda:

NÚMERO DE RESULTADOS		
BUSCADOR	CASTELLANO	INGLÉS
WOS	6 (3)	26.199 (2.608)

10.a- Relajación **AND** (Ácido Poliláctico **OR** PLA **OR** Polímero **OR** Termoplástico)

10.b- Relaxation **AND** (Acid polylactic **OR** Acid Poly(lactic) **OR** Polymer **OR** PLA **OR** Thermoplastic)

Tabla II. 11. Resultados obtenidos de la búsqueda:

NÚMERO DE RESULTADOS		
BUSCADOR	CASTELLANO	INGLÉS
WOS	12 (6)	67.542 (4.727)

11.a- Relajación **AND** (Ácido Poliláctico **OR** PLA **OR** Polímero **OR** Termoplástico) **AND** (MEF **OR** ANSYS **OR** Elementos Finitos **OR** Método de elementos finitos)

11.b- Relaxation **AND** (Acid polylactic **OR** Acid Poly(lactic) **OR** Polymer **OR** PLA **OR** Thermoplastic) **AND** (FEM **OR** FEA **OR** ANSYS **OR** Finite Element **OR** Finite Element Method)

Tabla II. 12. Resultados obtenidos de la búsqueda:

NÚMERO DE RESULTADOS		
BUSCADOR	CASTELLANO	INGLÉS
WOS	0	980 (83)

Tras el presente proceso de búsqueda se han encontrado algunos resultados interesantes y que pueden ser útiles para trazar un camino a seguir. A pesar de esto, dado que de algunos resultados ha sido imposible obtener resultados positivos por la cantidad de publicaciones mostradas o por la falta de estas, se ha optado por también por realizar una búsqueda de información a partir de las referencias de los artículos destacados.

Tabla II. 13. Resultados obtenidos de la búsqueda:

NÚMERO DE RESULTADOS TOTALES		
BÚSQUEDA	CASTELLANO	INGLÉS
1	9 (8)	10.049 (1.171)
2	0	4.010 (363)
3	0	282 (25)
4	47 (33)	78.398 (8.715)
5	3 (2)	25.537 (2.203)
6	0	1.454 (125)
7	6 (4)	61.071 (5.264)
8	1	4.030 (434)
9	6 (3)	26.199 (2.608)
10	12 (6)	67.542 (4.727)
11	0	980 (83)

Como se puede observar en los resultados mostrados en la Tabla II.2, los resultados obtenidos en la mayoría de los casos son demasiado numerosos como para poderlos considerar útiles o apropiados, por lo que habría que seguir afinando el sistema de búsqueda y revisar las palabras clave empleadas.

Como alternativa a realizar un nuevo proceso de búsqueda, se van a estudiar varios artículos encontrados que se han considerado útiles y se realizará una segunda búsqueda a partir de las referencias que ahí muestran.

3.4 Conclusiones alcanzadas tras los procesos de búsqueda:

A partir de los artículos estudiados, se ha podido comprobar que los dos métodos más empleados para la caracterización del comportamiento viscoelástico de un polímero es mediante el uso de un DMA, aplicando diversos métodos como frecuencias o tracción con temperatura; y con el uso de una máquina universal de ensayos (MUE), empleando tanto técnicas convencionales de tracción a velocidad constante, como variaciones para realizar ensayos de fluencia o relajación de tensiones. También se ha podido comprobar que es bastante habitual realizar los ensayos con la aplicación de diversas temperaturas, aunque no es imperativo su aplicación debido a que hay modelos de cálculo capaces de simular su efecto.

En cuanto al apartado de la simulación mediante software, se ha constatado que el método más usual es mediante la aplicación de la curva de tensiones-deformaciones obtenidas en los ensayos reales. En este aspecto se podría resaltar el artículo de A. Arriaga et al. titulado como *Finite-elemento analysis of quasi-static characterisation test in thermoplastic materials: Experimental and numerical analysis results correlation with ANSYS* (octubre 2006) [19] o el informe de Wolfgang Brocks et al. titulado *Computational Fracture Mechanics* (mayo 2015) [20]

que aportan información sobre la caracterización y el tratamiento de los datos experimentales para su utilización en softwares de elementos finitos.

III. EXPERIMENTAL

III. EXPERIMENTAL

1. MATERIALES

1.1 Ácido Poliláctico (PLA):

El material empleado para el desarrollo del apartado experimental del presente proyecto es el ácido poliláctico, o PLA, suministrado en forma de granza por la empresa *NatureWorks LLC* (Minnesota, USA), denominado como *Ingeo™ Biopolymer 2003D*.

Tabla III. 1. Propiedades típicas del material. Estas no han de considerarse como específicas en base a las indicaciones de la hoja de datos técnicos [26]:

PROPIEDADES TÍPICAS DEL MATERIAL		
Propiedades físicas	Ingeo 20031D	Método ASTM
Densidad (g/cm ³)	1,24	D792
MFR, g/10 min (210°C, 2,16 kg)	6,00	D1238
Tensión de rotura (MPa)	53,0	D882
Resistencia a tracción (MPa)	60,0	D882
Módulo elástico (GPa)	3,50	D882
Elongación (%)	6,00	D882
Impacto Izod con entalla (J/m)	16,0	D256

Según la hoja de datos técnicos [26], se recomienda que el proceso de extrusión se realice con usillos de uso general con relación (L/D) de 24:1 a 30:1 y 3:1 y un rango de compresión de 2,5:1 a 3:1.

Este PLA se suministra con un contenido de humedad inferior al 0,025% (250 ppm). El contenido en humedad recomendado para evitar que el polímero se degrade y no se vea afectada su viscosidad, con lo que afectaría también a sus propiedades físicas, es de 0,005% (50 ppm), es por ello por lo que especifican que las condiciones típicas de secado han de ser de 2 horas a 90°C o hasta el punto de condensación de -40°C aplicando una tasa de flujo de aire superior a 31,2 L/min por cada kilogramo de material. Una vez secado, el material no ha de exponerse a condiciones atmosféricas para evitar que recupere la humedad [26] [9].

2. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Al estar empleando únicamente un material en estado virgen, sin ningún tipo de aditivo, tras el proceso de secado siguiendo las recomendaciones marcadas en la hoja de datos técnicos del PLA suministrado [26] y que se han detallado en el apartado anterior, el siguiente paso es inyectar las probetas necesarias. Para ello, se ha empleado la máquina de inyección *Meteor 270/75 de Mateu & Solé* (Barcelona, España). El programa de temperaturas empleado para la inyección ha sido de 175°C en la tolva, 180°C y 185°C en los pasos intermedios y de 190°C en la boquilla de inyección. El tiempo de inyección empleado es de 1 segundo y el tiempo de enfriamiento de 10 segundos. De este proceso se obtiene una probeta de tracción, con unas dimensiones aproximadas de 150 mm x 10 mm x 4 mm; y otra para flexión e impacto, con unas dimensiones aproximadas de 80 mm x 10 mm x 4 mm; las dimensiones de ambas probetas vienen definidas por sus respectivas normativas.



Figura III. 1. Muestras obtenidas del proceso de inyección. En la imagen se puede observar una probeta para tracción y otro para impacto y flexión.

3. TÉCNICAS Y ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

Como ya se ha indicado en el apartado *II. Objetivos y proceso de investigación*, existen diversas técnicas de caracterización con las que poder analizar las propiedades mecánicas y viscoelásticas de los polímeros. A partir de la investigación y revisión de diversos artículos y trabajos, se llegó a la conclusión de que los métodos más empleados y útiles para el análisis de las propiedades viscoelásticas son, la caracterización mecánica mediante el método de tracción uniaxial a velocidad constante y el método de tracción a fluencia, pudiendo realizarse ambos tipos de ensayos tanto a temperatura de laboratorio como con variación térmica; y el análisis mecánico dinámico (DMA), empleando tanto pequeñas tensiones con temperatura o frecuencias para conocer determinados módulos de los materiales.

Para el presente proyecto se han desarrollado únicamente las técnicas de análisis mecánico de tracción y tracción a fluencia y relajación de tensiones.

3.1 Ensayo de tracción:

Los ensayos de tracción se han realizado bajo los criterios expuestos en las normas UNE-EN ISO 527-1:2012. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales [21] y UNE-EN ISO 527-2:2012. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión [22].

Para la realización del ensayo se ha hecho uso de la máquina universal de ensayos (MUE) modelo ELIB 50 (S.A.E. Ibertest, España), equipada con una celda de carga de 5 kN. Para la caracterización del material se emplearon 3 velocidades diferentes, todas ellas estipuladas en la norma ISO 527-1:2012 (Figura III.2) [21]. Para el desarrollo del ensayo de tracción a velocidad continua, se trató de emular el artículo de *A.D. Drozdov et al. (2010), Viscoelasticity and viscoplasticity of polypropylene/polyethylene blends* (p. 2499) [23], pero se descartó la velocidad de 100 mm/min debido a que el ensayo duró un tiempo inferior a los 3 segundos y por tanto no se consideraron dichos resultados.

Velocidad de ensayo v mm/min	Tolerancia %
0,125	± 20
0,25	
0,5	
1	
2	
5	
10	± 10
20	
50	
100	
200	
300	
500	

Figura III. 2. Velocidades de ensayos recomendadas en la norma ISO 527-1:2012 [21].

Las probetas empleadas para el ensayo son, según la norma ISO 527-2:2012, el tipo B con forma de halterio, con unas dimensiones aproximadas de 150 mm x 10 mm x 4 mm. El número de probetas empleadas para cada velocidad de ensayo no ha sido inferior a 5, acorde a lo estipulado en la norma ISO.

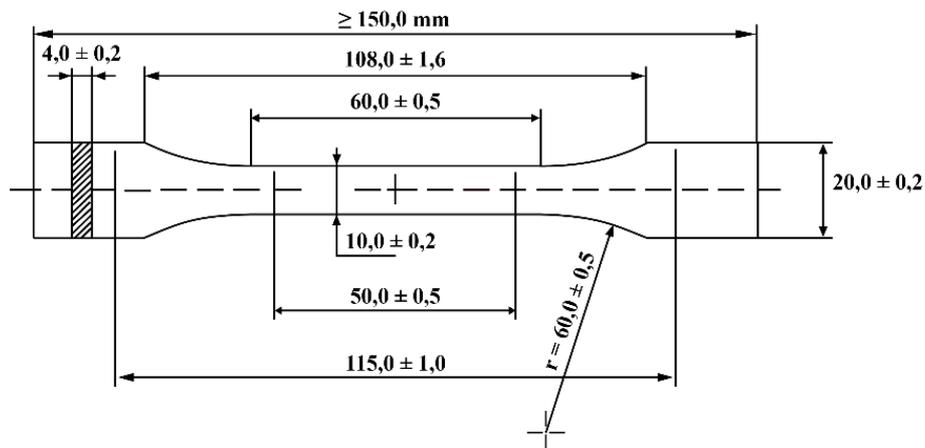


Figura III. 3. Plano de las dimensiones de la probeta empleada para los ensayos. La probeta es el tipo 1B según la norma ISO 527-2:2012 [22].

El ensayo de tracción a velocidad constante se realiza para conocer ciertas propiedades mecánicas que son necesarias para definir el material en el software de simulación y para definir los parámetros a los que poder realizar los ensayos de fluencia y relajación.

3.1.1 Galgas extensométricas:

Debido a que, para la transcripción de los datos experimentales al software de simulación, es recomendable una gran precisión en la toma de datos y dada la importancia que tiene para estos programas los valores de *Módulo de Young* y *Coficiente de Poisson*, también se realizó una medición las galgas extensométricas axiales de Epsilon, modelo 3542 (Epsilon Technology Corporation, EE. UU.) y calibradas acorde al apartado 5.1.5 de a la norma ISO 527-1:2012 [21].



Figura III. 4. Colocación del extensómetro y el captado MFQ.

3.2 Ensayo de tracción a fluencia:

El ensayo de tracción a fluencia se ha realizado bajo los criterios de las normas *UNE-EN ISO 899-1:2018. Plásticos. Determinación del comportamiento en fluencia. Parte 1: Fluencia en tracción* [24] y debido a la carencia de información en algunos parámetros para el desarrollo de los ensayos, también se ha utilizado la norma *ASTM D2990-17. Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics* [25].

Los ensayos se realizaron con la misma máquina universal de ensayos que en el apartado 3.1 cambiando el tipo de ensayo de tracción a velocidad constante a ciclos de tracción. Para obtener un modelo de comportamiento más completo, se han realizado tanto ensayos de fluencia como de relajación de tensiones.

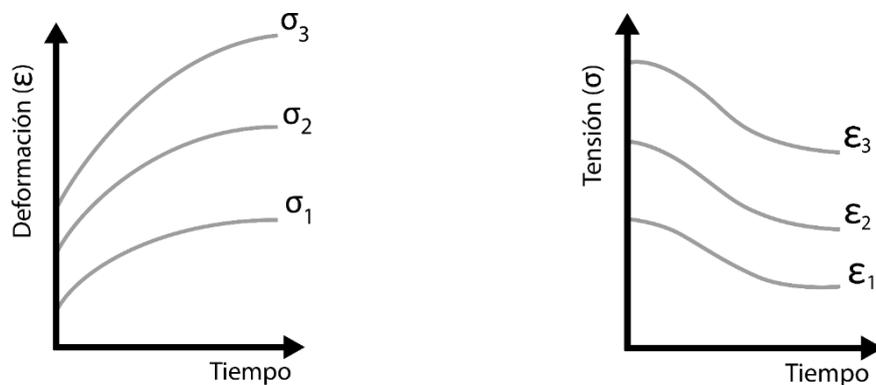


Figura III. 5. Gráficos representativos del comportamiento que se produce durante el ensayo a fluencia y a relajación [30].

Según la norma ASTM D2990-17, para los ensayos a fluencia sin variación de temperatura, se han de ensayar un mínimo de 2 probetas, si se emplean 4 o más tensiones diferentes o un mínimo de 3 probetas, si se ensayan menos de 4 tensiones. En cuanto a los requisitos de los ensayos de fluencia por rotura, se exige que se ensayen un mínimo de 2 probetas por tensión. Para el presente estudio, se han estudiado 3 tensiones diferentes en fluencia o tres deformaciones diferentes en relajación, por tanto, se ensayarán un mínimo de 3 probetas por ensayo.

Debido a que ni en la norma ISO ni en la norma ASTM hay ninguna indicación sobre las tensiones que se puede o deben aplicar, las tensiones escogidas están basadas en lo expuesto en el artículo de Jutima Simsiriwong et al. (2015), *A statistical approach to characterize the viscoelastic creep compliances of a vinyl ester polymer* [33] y a lo expuesto en la tesis doctoral de Albert Serra, *Propuesta de nuevos modelos constitutivos para caracterización viscoelástica de materiales termoplásticos* [27].



Figura III. 6. Preparación de unos de los ensayos de tracción en la máquina universal de ensayos ELIB 50.

Los ensayos de fluencia se realizan para conocer el comportamiento del material a largo plazo. A partir de los datos experimentales se pretende validar un modelo de cálculo del comportamiento viscoelástico del material y poder definir los parámetros que son necesarios para simular con éxito el comportamiento del material aplicado a cualquier objeto.

3.3 Modelos de cálculo de comportamiento viscoelástico para polímeros:

Como ya se ha indicado en el punto 5 del apartado *I. Antecedentes*, el comportamiento mecánico de los polímeros no es constante, se define por presentar una respuesta elástica y una respuesta viscosa. Este suceso, conocido como viscoelasticidad, provoca que no sea sencillo caracterizar de forma precisa el comportamiento de los plásticos y más con vistas al comportamiento a largo plazo. Recordando lo que ya se ha indicado en apartados anteriores, generalmente este fenómeno se compara con el comportamiento de un muelle, definido con la Ley de Hooke ($\sigma = \xi \cdot \varepsilon$ (Ecuación I.1)), para la parte elástica y con el comportamiento de un émbolo, definido con la Ley de Newton ($\sigma = \eta \cdot \left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)$ (Ecuación I.2)), atribuido a la parte viscosa el material.

A partir de estos dos elementos se han definido diversos modelos de cálculo de comportamiento viscoelástico que representan con mayor o menor exactitud el comportamiento real del material.

3.3.1 Modelos de cálculo:

Existen dos modelos de cálculo, el **Modelo de viscoelasticidad de Maxwell** y el **Modelo de viscoelasticidad de Kelvin-Voigt**, que se podrían considerar como modelos de cálculo base y básicos, debido a su exactitud parcial y a que han sido la referencia para realizar otros modelos más completos y exactos.

a. Modelo de viscoelasticidad de Maxwell:

El modelo de Maxwell es una representación sencilla del comportamiento de un material viscoelástico y como ya se ha indicado, sirve de base para otros modelos de mayor complejidad. Este modelo considera que el material en cuestión trabaja como la unión en serie de un muelle (Ley de Hooke) y un émbolo (Ley de Newton) (Figura III.7).

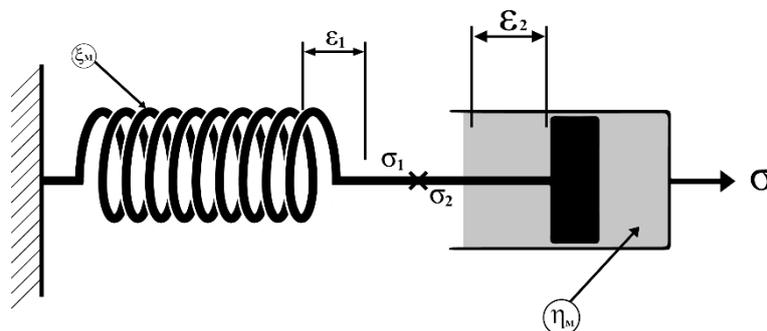


Figura III. 7. Representación gráfica del sistema que se emplea en el Modelo de Maxwell.

De esta figura (Figura III.7), hay que tener en cuenta los siguientes elementos:

Elementos que pertenecen a la parte elástica (Muelle):

- $\sigma_1 \rightarrow$ tensión que soporta el muelle.
- $\varepsilon_1 \rightarrow$ deformación que se produce en el resorte al aplicar σ_1 .

- $\xi_M \rightarrow$ constante del muelle.

Elementos que pertenecen a la parte viscosa (Émbolo):

- $\sigma_2 \rightarrow$ tensión que soporta el émbolo.
- $\varepsilon_2 \rightarrow$ deformación que se produce en el émbolo al aplicar σ_2 .
- $\eta_M \rightarrow$ constante del muelle.

A partir de esta representación gráfica, se puede establecer que las tensiones que se registran serían iguales en ambos elementos ($\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$) y que la elongación o deformación total del polímero resultaría de la suma de la deformación producida en el muelle y de la producida en el émbolo ($\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$). Esta expresión de deformación se puede representar con respecto al tiempo de la siguiente manera:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_1}{dt} + \frac{d\varepsilon_2}{dt} \quad \text{Ecuación III. 1}$$

En este modelo de cálculo, a partir del componente elástico del material cuya expresión básica se rige por la Ley de Hooke ($\sigma = \xi \cdot \varepsilon$) (Ecuación I.1), si se despeja la deformación, se obtiene su variación con respecto al tiempo:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{\xi_M} \rightarrow \frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{1}{\xi_M} \cdot \frac{d\sigma_1}{dt} \quad \text{Ecuación III. 2}$$

En cuanto a la parte del componente viscoso, cuya expresión parte de la ecuación de la Ley de Newton ($\sigma = \eta \cdot \left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)$) (Ecuación I.2), si se despeja la variación de la deformación con respecto al tiempo, se obtiene que:

$$\sigma_2 = \eta_M \cdot \frac{d\varepsilon_2}{dt} \rightarrow \frac{d\varepsilon_2}{dt} = \frac{1}{\eta_M} \cdot \sigma_2 \quad \text{Ecuación III. 3}$$

Con estas ecuaciones (III.2 y III.3), se define el comportamiento de deformación o elongación tanto en la parte elástica como en la parte viscosa del material. Si se sustituyen estas dos expresiones en la ecuación inicial de suma de deformaciones (Ecuación III.1), se obtiene una expresión que permite modelizar el comportamiento del modelo de Maxwell a partir de la siguiente ecuación general:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{\xi_M} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta_M} \cdot \sigma \quad \text{Ecuación III. 4}$$

(Expresión General del Modelo de Maxwell)

A partir de la Expresión General del Modelo de Maxwell (Ecuación III.4), se pueden definir expresiones que explican distintos fenómenos de comportamiento a largo plazo en los materiales poliméricos.

i. Comportamiento de fluencia por el modelo viscoelástico de Maxwell:

El fenómeno físico de fluencia, también conocido como *creep*, ocurre cuando las tensiones son constantes (K), es decir, $\sigma = 0$ y, por tanto, la variable del tiempo deja de influir, o

lo que es lo mismo, se anula y sustituyendo en la expresión general (Ecuación III.4), esta queda como:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = 0 \rightarrow \frac{d\sigma}{dt} = \frac{1}{\eta_M} \cdot \sigma \quad \text{Ecuación III. 5}$$

Si se mantiene que σ es constante y que η_M es un valor constante, integrando esta expresión (Ecuación III.5), se obtiene una expresión que es de tipo lineal:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{\eta_M} \cdot \sigma \cdot t + K \quad \text{Ecuación III. 6}$$

La constante de integración K , está relacionada con la respuesta inmediata del elemento elástico, esta constante se represente como:

$$K = \frac{\sigma_0}{\xi} = \frac{\sigma_0}{\eta} \cdot t \quad \text{Ecuación III. 7}$$

Que si sustituimos con la Ecuación III.6, esta quedaría como:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{\eta_M} \cdot \sigma \cdot t + \frac{\sigma_0}{\xi} = \frac{\sigma_0}{\eta} \cdot t \quad \text{Ecuación III. 8}$$

(Ecuación de fluencia del modelo de Maxwell)

Si se representa gráficamente este comportamiento a fluencia, se puede observar que cuando el material trabaja bajo una tensión constante, la deformación resultante presenta una respuesta inicial debido al componente elástico del material y una respuesta lineal que crece con respecto al tiempo provocada por el comportamiento viscoso (Figura III.8)

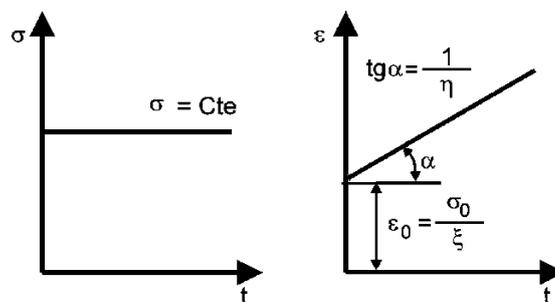


Figura III. 8. Representación gráfica del comportamiento de deformación cuando se aplica una tensión constante. Representación según el Modelo viscoelástico de Maxwell [30].

ii. Liberación de tensiones o fenómeno de relajación por el modelo viscoelástico de Maxwell:

El modelo de Maxwell también es capaz de explicar el comportamiento a relajación del plástico. La relajación del material, o también conocida como liberación de tensiones, se produce cuando el material es sometido a condiciones de deformación constante y, por tanto, su variación con respecto al tiempo es nula. Si se atiende a la Ecuación III.4 y se hace una sustitución en la que $d\varepsilon/dt = 0$, esta queda como:

$$0 = \frac{1}{\xi_M} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta_M} \cdot \sigma \quad \text{Ecuación III. 9}$$

Y la resolución de esta ecuación queda como:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-\left(\frac{\xi_M}{\eta_M}\right) \cdot t} \quad \text{Ecuación III. 10}$$

Si representamos esta expresión de forma gráfica, se puede observar que la liberación de tensiones se produce según una exponencial decreciente con el paso del tiempo (Figura III.9)

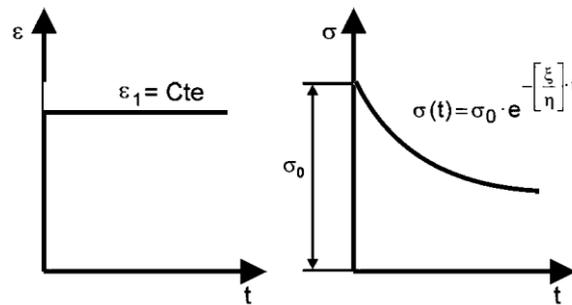


Figura III. 9. Representación gráfica del fenómeno de relajación de tensiones. Este suceso se da cuando se aplica una deformación constante [30].

iii. Proceso de recuperación por el modelo viscoelástico de Maxwell:

El último fenómeno que trata de explicar el modelo de Maxwell es el comportamiento de recuperación. Este proceso ocurre cuando se eliminan las tensiones, es decir, $\sigma = 0$. Aplicando esta anulación de valores de la tensión a la Ecuación III.4, esta quedaría como $\frac{d\varepsilon}{dt} = 0$, cuya integración resulta como $\varepsilon(t) = K$, lo que indica que la recuperación es constante e invariable en el tiempo.

Este fenómeno se puede observar en la siguiente figura (Figura III.9), donde se puede observar que cuando un material está sometido a una tensión que se anula en un momento determinado, se produce una recuperación parcial de forma instantánea, pero con el paso del tiempo, ya no se produce ninguna recuperación más en el material.

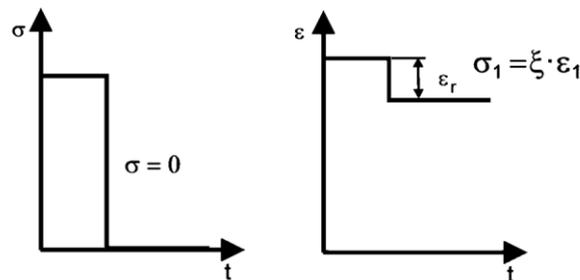


Figura III. 10. Representación gráfica del proceso de recuperación del material, donde se ve que en el momento que la tensión se anula, se produce una recuperación de forma parcial e invariable en el tiempo [30].

b. Modelo de viscoelasticidad de Kelvin-Voigt:

Otro modelo que permite estudiar el comportamiento viscoelástico de un polímero es el desarrollado por Kelvin-Voigt, y como Maxwell, es un modelo sencillo que sirve de base para otros modelos de cálculo de mayor complejidad y está también combina un muelle, parte elástica (Ley de Hooke); y un émbolo, que representar el comportamiento elástico y el comportamiento viscoso (Ley de Newton), aunque en este modelo, estos elementos están configurados en paralelo (Figura III.11).

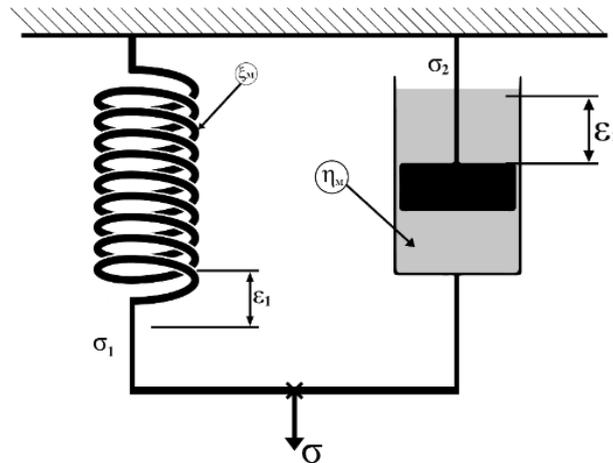


Figura III. 11. Representación gráfica del conjunto que emplea el Modelo de Kelvin.Voigt.

De esta figura (Figura III.11), hay que tener en cuenta los siguientes elementos:

Elementos que pertenecen a la parte elástica (Muelle):

- $\sigma_1 \rightarrow$ tensión que soporta el muelle.
- $\epsilon_1 \rightarrow$ deformación que se produce en el muelle al aplicar σ_1 .
- $\xi_{KV} \rightarrow$ constante del muelle.

Elementos que pertenecen a la parte viscosa (Émbolo):

- $\sigma_2 \rightarrow$ tensión que soporta el émbolo.
- $\epsilon_2 \rightarrow$ deformación que se produce en el émbolo al aplicar σ_2 .
- $\eta_{KV} \rightarrow$ constante del émbolo.

A partir de la representación gráfica del modelo de cálculo de Kelvin-Voigt, se puede deducir que la tensión total que se aplica al sistema es la resultante de la suma de la tensión que soporta el muelle con la tensión que se encuentra en el émbolo ($\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$). En cuanto a la deformación total resultante, esta es igual a la deformación que se produce en el muelle y en el émbolo ($\epsilon = \epsilon_1 = \epsilon_2$).

Para estudiar cómo se comportan las tensiones en este sistema con los elementos en paralelo, hace falta despejar σ_1 , para analizar el comportamiento del muelle que se comporta como un sólido elástico (Ley de Hooke); y σ_2 , para analizar las tensiones en el émbolo que representa la parte viscosa del sistema (Ley de Newton).

A partir de la expresión que define la Ley de Hooke (Ecuación I.1), se obtiene que:

$$\sigma_1 = \xi_{KV} \cdot \varepsilon_1 \quad \text{Ecuación III. 11}$$

Y sustituyendo σ_2 por la ecuación que define la Ley de Newton (Ecuación I.2), esta queda como:

$$\sigma_2 = \eta_{KV} \cdot (d\varepsilon_2/dt) \quad \text{Ecuación III. 12}$$

Con esto, la adición de tensiones queda como:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \rightarrow \sigma = \xi_{KV} \cdot \varepsilon_1 + \eta_{KV} \cdot \frac{d\varepsilon_2}{dt} \quad \text{Ecuación III. 13}$$

(Expresión General del Modelo de Kelvin-Voigt)

Y teniendo en cuenta que las deformaciones en el elemento elástico, en el elemento viscoso y a nivel global del sistema, son las mismas, se obtiene la Expresión General que define el Modelo Kelvin-Voigt.

A partir de la Expresión General del Modelo de Kelvin-Voigt (Ecuación III.13), se pueden definir expresiones que explican distintos fenómenos de comportamiento a largo plazo en los materiales poliméricos.

i. Comportamiento de fluencia por el modelo Kelvin-Voigt:

Como ya se ha explicado, este fenómeno ocurre cuando las tensiones que se aplican son constantes ($\sigma = K$). En este caso, con la tensión constante no se anula ningún término en la ecuación general de modelo y su resolución, se trata de una ecuación diferencial, queda como:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\xi_{KV}} \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{\xi_{KV}}{\eta_{KV}}\right) \cdot t} \right] \quad \text{Ecuación III. 14}$$

Si se representa gráficamente este comportamiento a fluencia, se puede observar que cuando el material trabaja bajo una tensión constante, la deformación resultante presenta un crecimiento exponencial con el paso del tiempo (Figura III.12). En este caso, la deformación inicial para $\sigma = 0$, es también nula.

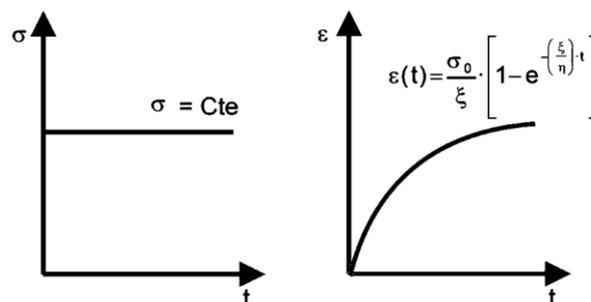


Figura III. 12. Representación gráfica del comportamiento de deformación cuando se aplica una tensión constante. Representación según el Modelo viscoelástico de Kelvin-Voigt [30].

ii. Liberación de tensiones o fenómeno de relajación por el modelo viscoelástico de Kelvin-Voigt:

Este modelo también trata de explicar el comportamiento de relajación o liberación de tensiones. Como ya se ha indicado, para que se dé este fenómeno hace falta someter al material a una deformación constante, por lo que la deformación queda como $\varepsilon = K$ y, por tanto, la variable del tiempo deja de influir y la derivada de la deformación con respecto al tiempo se anula ($d\varepsilon/dt = 0$). Con ello, la Expresión General del Modelo de Kelvin-Voigt queda como:

$$\sigma = \xi_{KV} \cdot \varepsilon_0 \qquad \text{Ecuación III. 15}$$

(Modelo de cálculo de fluencia)

Esta expresión (Ecuación III.15) indica que cuando el material trabaja en condiciones de deformación constantes, no se produce la relajación o liberación de tensiones, mantiene las tensiones. Gráficamente, este comportamiento se representa de la siguiente manera (Figura III.13):

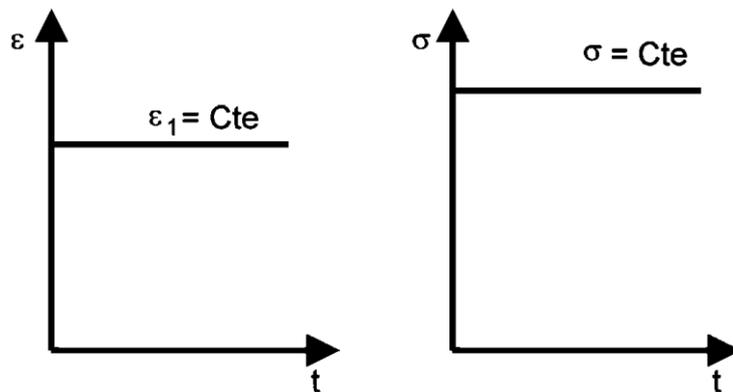


Figura III. 13. Representación gráfica del fenómeno de relajación según el modelo de cálculo viscoelástico de Kelvin-Voigt [30].

iii. Proceso de recuperación por el modelo viscoelástico de Kelvin-Voigt:

Este modelo de cálculo también pretende darle explicación al fenómeno de recuperación que se produce cuando se eliminan las tensiones, es decir, $\sigma = 0$. Si se aplica esta condición a la expresión general del modelo de cálculo de Kelvin-Voigt (Ecuación III.13), esta queda como:

$$\xi_{KV} \cdot \varepsilon + \eta_{KV} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} = 0 \qquad \text{Ecuación III. 16}$$

Resolviendo esta ecuación diferencial, se obtiene que:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot e^{-\left(\frac{\xi_{KV}}{\eta_{KV}}\right) \cdot t} \qquad \text{Ecuación III. 17}$$

(Modelo de cálculo del fenómeno de recuperación)

Gráficamente, este comportamiento se puede representar de la siguiente forma:

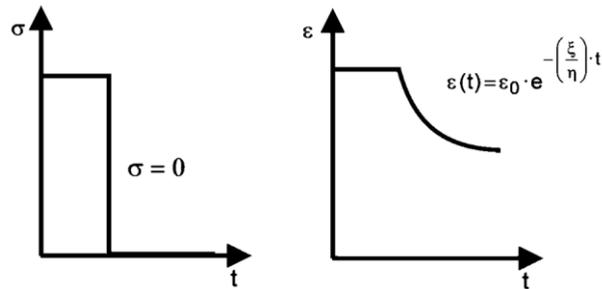


Figura III. 14. Representación gráfica del comportamiento del material cuando se anulan las tensiones aplicadas [30].

Como se puede observar en la Figura III.14, se ve claramente que cuando se elimina la tensión, el material experimental cierta recuperación con el paso del tiempo. Esta recuperación se expresa de forma exponencial decreciente.

c. Otros modelos de cálculo:

A parte del Modelo Viscoelástico de Maxwell y el Modelo Viscoelástico de Kelvin-Voigt, existen otros modelos de cálculo que han surgido a partir de estos dos como el Modelo combinado de Burgers o el Modelo formado por "i" elementos. También existen otros modelos de cálculo, tanto físicos como matemáticos, que también tratan de explicar el fenómeno de comportamiento viscoelásticos. Entre estos modelos, se puede destacar el Principio de Superposición de Boltzman, el Método (o Series) Prony, el Modelo de sólido lineal estándar, el Modelo generalizado tanto de Maxwell (Maxwell-Wiechert), el Modelo de Findley o el Modelo de Bailey-Norton entre otros.

A pesar de la cantidad de modelos existentes, únicamente se van a tener en cuenta los modelos que se emplean en ANSYS o de los que se tiene información de su empleo.

i. Modelo Generalizado de Maxwell (Maxwell-Wiechert):

El Modelo Generalizado de Maxwell, o Modelo Generalizado de Maxwell-Wiechert, es uno de los modelos de cálculo de comportamiento viscoelástico más empleados en programas de simulación por elementos finitos para simular el comportamiento de viscoelasticidad lineal. Este método es una extensión del Modelo Viscoelástico de Maxwell (Apartado 3.4.1 – a) en que se combinan un número determinado de sistemas de Maxwell en paralelo (Figura III.15).

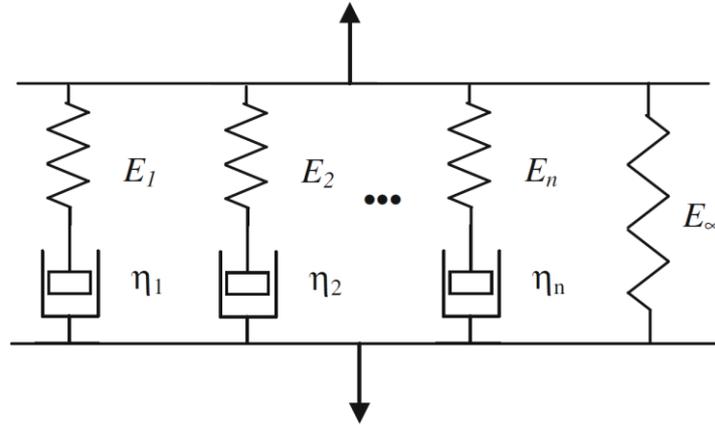


Figura III. 15. Representación gráfica de un sistema con “n” elementos para el Modelo Generalizado de Maxwell [29].

Partiendo de la siguiente ecuación básica, que representa un sistema genérico de Maxwell:

$$(E_i + \eta_i \partial_t) \sigma_i = (E_i \eta_i \partial_t) \varepsilon_i \quad \text{Ecuación III. 18}$$

(Ecuación genérica de Maxwell)

Y teniendo en cuenta que un muelle aislado se define como: $\sigma_0 = (E_\infty) \varepsilon_0$.

Como el sistema general presente una disposición en paralelo de todos los elementos, la ecuación se presente en forma de tensión-deformación:

$$\sigma_i = \frac{(E_i \eta_i \partial_t)}{(E_i + \eta_i \partial_t)} \varepsilon_i \quad \text{Ecuación III. 19}$$

Se agregan las relaciones de todos los elementos y se usa $\varepsilon_i = \varepsilon$.

$$\sigma = \sum \sigma_i = \left[E_\infty + \sum_{i=1}^n \frac{(E_i \eta_i \partial_t)}{(E_i + \eta_i \partial_t)} \right] \varepsilon \quad \text{Ecuación III. 20}$$

A partir de esta expresión (Ecuación III.20), se puede decir que:

- a) Como se indica en el libro *Engineering Viscoelasticity* “el orden del derivado de orden más elevado de la tensión sería el mismo que el de la deformación” (Gutierrez-Lemini, Danton, 2014, p.83) [29]. Este es independiente a que en el sistema haya o no un muelle libre y significa que el este modelo siempre presentaría una respuesta instantánea.
- b) Si hay al menos un muelle aislado, el operador Q ($P \cdot \sigma = Q \cdot \varepsilon$) será diferente de 0 y el modelo reológico estaría representado por un sólido. Y si, por el contrario, Q es 0, el modelo representaría un fluido.

Como ya se ha mostrado en la Figura III.15, el modelo generalizado de Maxwell es un conjunto de sistemas de Maxwell ensamblados en paralelo, es por eso por lo que el fenómeno de relajación equivale a la suma de la relajación de cada uno de los sistemas unitario de Maxwell (muelle y émbolo).

A partir de la Ecuación III.20 y teniendo en cuenta que $M(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0}$, se obtiene:

$$\begin{aligned}
 M(t) &= E_{\infty} + \sum M_i(t) = \\
 &= E_{\infty} + \sum E_i e^{-t/\tau_i}
 \end{aligned}$$

Ecuación III. 21

Donde $\tau_{r_i} \equiv \frac{\eta_i}{E_i}$.

Esta suma es conocida como *Espectro de relajación discreta*. Y a medida que el número de sistemas unitarios de Maxwell se incrementa el conjunto global, la suma pasa a ser una integral, lo que da lugar a la *relajación continua*.

$$M(t) = E_{\infty} + \int_0^{\infty} E(\tau) e^{-t/\tau} d\tau$$

Ecuación III. 22

ii. Método de Prony (Series de Prony):

El Método de Prony, también conocido como Series de Prony, es un modelo de cálculo que, aunque desarrollado en 1795 por Gaspard Riche de Prony, no fue hasta la introducción de los sistemas de cálculo informáticos que se empezó a aplicar de forma práctica debido a su complejidad operacional y el número de variables.

Este método trata de describir el comportamiento de polímeros y *composites* a través de la suma de un número finito de muelles y émbolos situados en paralelo o en serie, lo que significa que los términos que emplea este modelo son físicos. También es un modelo lo bastante flexible como para poder dar explicación a un rango interesante en el comportamiento del material. [27].

Las Series de Prony presentan la siguiente ecuación con respecto al dominio del tiempo [27]:

$$\sum_{i=1}^n p_i \cdot e^{-\frac{t}{\tau_i}}$$

Ecuación III. 23

Una dificultad para el empleo de este método es que en muchos materiales suelen presentar entre dos y tres términos exponenciales conllevando a que haya entre cuatro y seis coeficientes. Estas dificultades se pueden solventar mediante programas de cálculo.

La serie de Dirichlet-Prony, representa el módulo de relajación que se suele emplear para sólidos viscoelásticos. El módulo de relajación se puede encontrar representado tanto con M como con Y [27] [29]:

$$M(t) = M_e - \sum_{i=1}^n M_i \cdot e^{-\frac{t}{\tau_i}}$$

Ecuación III. 24

- M : Módulo de relajación.
- M_e : Módulo de relajación a tiempo inicial. Este coeficiente es una constante real y tiene que ser positiva.
- M_i : Coeficiente de módulo de relajación. Este coeficiente es una constante real y tiene que ser positiva.

- τ_i : representa la constante de tiempo. Se puede considerar como el tiempo de relajación al que está sometido el material.
- n : Número de términos en serie o modelos matemáticos.

La Ecuación III.24, implica que:

$$M(0) = M_e + \sum_{i=1}^n M_i \equiv M_g \quad \text{Ecuación III. 25}$$

Hay que tener en cuenta que:

$$M_e \equiv M_\infty = \begin{cases} \neq 0 & \rightarrow \text{para sólidos viscoelásticos} \\ = 0 & \rightarrow \text{para fluidos viscoelásticos} \end{cases}$$

Además de la forma de cálculo aquí expuesta, hay otros métodos que permiten describir el comportamiento de relajación mediante las Series Prony. Si se pretende describir este fenómeno en función del módulo vítreo (M_g), que corresponde a la temperatura de transición vítrea (T_g), empleando la Ecuación III.25 para expresar el coeficiente M_e en forma de M_g , y aplicando el resultado en la Ecuación III.24, se obtiene que:

$$M(t) = M_g - \sum_{i=1}^n M_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}\right) \quad \text{Ecuación III. 26}$$

Por el contrario, el fenómeno de fluencia (C_g), correspondiente al término inglés *creep*, aumenta a medida que aumenta la T_g . Inversamente a este suceso, el módulo de fluencia a largo plazo, C_e , disminuye como $t \rightarrow 0$. A partir de las ecuaciones III.24 y III.26, ambos comportamientos de fluencia para un elemento sólido se definen como:

$$C(t) = C_e - \sum_{i=1}^n C_i \cdot e^{-\frac{t}{\lambda_i}} \quad \text{Ecuación III. 27}$$

$$C(t) = C_g + \sum_{i=1}^n C_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}\right) \quad \text{Ecuación III. 28}$$

Donde:

- C : Módulo de fluencia o *creep*.
- C_g : Módulo de fluencia para un tiempo inicial.
- C_i : Coeficiente del módulo de fluencia. Este coeficiente es una constante real y tiene que ser positiva.
- λ_i : Tiempo de retardo.

Para representar fluidos viscoelásticos correspondientes a la Ley de Newton, es común añadir los términos t/η .

Finalmente, como se indica en el libro *Engineering Vicoelasticity* [29], como las tensiones con influencia térmica, se representan a través de una integral similar a la expuesta para fluencia, las funciones correspondientes para expresar el fenómeno de fluencia en condiciones de expansión térmica son del mismo tipo a las ecuaciones III.27 y III.28.

4. ANSYS® WORKBENCH

Para el desarrollo de la parte de simulación por el Método de Elementos Finitos, se empleará el software ANSYS® (Figura III.16) que, desde que se desarrolló en 1970, ha servido de apoyo para el diseño y desarrollo de productos y sistemas gracias a que, gracias a sus numerosos módulos o plataformas que abarcan casi cualquier campo de simulación para ingeniería.



Figura III. 16. Logo del software de ingeniería ANSY.

Por las características del presente proyecto, se hará uso del módulo de diseño y simulación denominado como ANSYS® Workbench. El motivo por el cual se emplea este módulo de simulación es por las posibilidades que aporta de diseño 3D, creación y ajuste de materiales y simulación de diferentes esfuerzos, tanto en estáticos como dinámicos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. ENSAYOS DE TRACCIÓN

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en los diferentes ensayos de tracción realizados. Como ya se ha indicado en el apartado anterior correspondiente a la explicación del procedimiento experimental, se han realizado 3 ensayos a diferentes velocidades y se ha primado el empleo de velocidades bajas para tratar de obtener el máximo número de datos de entrada posibles para la creación de las curvas de tensión-deformación.

1.1 Ensayo de 10 mm/min:

Tabla IV. 1. Tabla comparativa 1 de las muestras ensayadas a 10 mm/min:

Muestra	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Carrera (mm)	L (mm)	L _f (mm)
1	4,00	10,10	40,40	4,40	115,00	119,40
2	4,20	10,20	42,84	4,60	115,00	119,60
3	4,00	10,10	40,40	3,85	115,00	118,85
4	4,10	10,00	41,00	3,90	115,00	118,90
5	4,10	10,10	41,41	3,58	115,00	118,58
PROMEDIO	4,08	10,10	41,21	4,07	115,00	119,07
DESVIACIÓN	0,08	0,07	1,01	0,42	0,00	0,42

b; es el espesor de la probeta.
h; es el ancho de la probeta.
A; equivale a la sección de la probeta.
L; es la longitud entre mordazas empleada.
L_f; es la longitud final sumando la carrera del ensayo.

Tabla IV. 2. Tabla comparativa 2 de las muestras ensayadas a 10 mm/min:

Muestra	Fuerza (kN)	σ (MPa)	σ_m (MPa)	E _t (GPa)	ϵ (%)	L _e (MPa)
1	2,29	56,7	55,1	2,76	3,83	54,8
2	2,37	55,3	55,6	2,97	4,00	55,4
3	2,37	58,6	55,6	2,74	3,35	55,4
4	2,37	57,8	55,5	2,89	3,39	55,2
5	2,33	56,2	54,6	2,84	3,11	53,3
PROMEDIO	2,34	56,9	55,3	2,84	3,54	54,8
DESVIACIÓN	0,04	1,30	0,44	0,10	0,37	0,88

σ ; es la fuerza perpendicular por la sección inicial de la muestra.
 σ_m ; es el esfuerzo máximo que soporta la muestra.
E_t; es el módulo de elasticidad.
 ϵ ; es la deformación o alargamiento que se produce en la muestra.
L_e; es el límite elástico de la muestra.

1.1.1 Gráfico comparativo del comportamiento de las diferentes muestras:

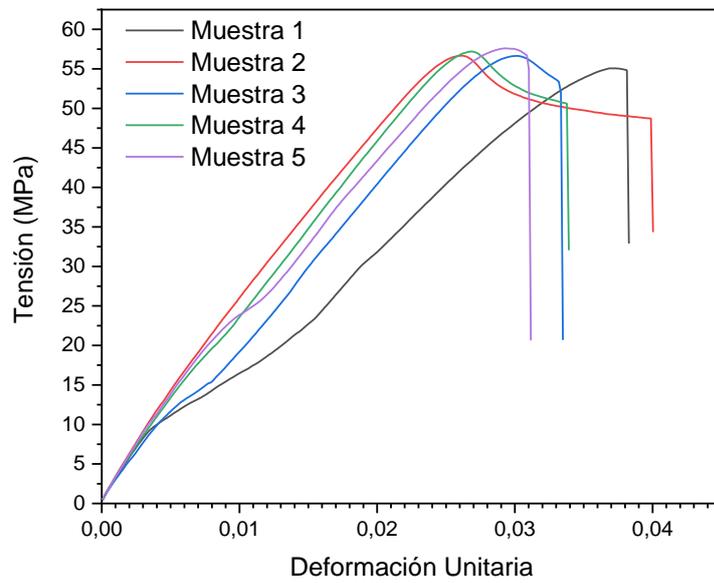


Gráfico IV. 1. Representación gráfica de las curvas de Tensión vs. Deformación de las muestras ensayadas a 10 mm/min.



Figura IV. 1. Probeta fracturada tras el ensayo a 10 mm/min.

A partir de la Figura IV.1 se puede contrastar el bajo alargamiento mostrado en los datos de la Tabla IV. 1 y Gráfico IV. 1.

1.2 Ensayo a 2 mm/min:

Tabla IV. 3. Tabla comparativa 1 de las muestras ensayadas a 2 mm/min:

Muestra	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Carrera (mm)	L (mm)	L _f (mm)
1	4,00	10,00	40,00	4,66	115,00	119,66
2	4,00	10,10	40,40	3,84	115,00	118,84
3	4,10	10,10	41,41	4,48	115,00	119,48
4	4,10	10,10	41,41	3,90	115,00	118,90
5	4,00	10,00	40,00	4,09	115,00	119,09
PROMEDIO	4,04	10,06	40,64	4,19	115,00	119,19
DESVIACIÓN	0,05	0,05	0,72	0,36	0,00	0,36

b; es el espesor de la probeta.
h; es el ancho de la probeta.
A; equivale a la sección de la probeta.
L; es la longitud entre mordazas empleada.
L_f; es la longitud final sumando la carrera del ensayo.

Tabla IV. 4. Tabla comparativa 2 de las muestras ensayadas a 2 mm/min:

Muestra	Fuerza (kN)	σ (MPa)	σ_m (MPa)	E _t (GPa)	ϵ (%)	L _e (MPa)
1	2,18	54,5	52,2	2,92	4,05	51,2
2	2,18	53,8	53,8	2,71	3,34	52,9
3	2,25	54,2	53,7	2,99	3,90	53,7
4	2,25	54,4	53,4	2,80	3,39	53,0
5	2,24	56,1	53,7	2,94	3,55	53,6
PROMEDIO	2,22	54,6	53,3	2,87	3,65	52,9
DESVIACIÓN	0,04	0,87	0,69	0,12	0,31	1,02

σ ; es la fuerza perpendicular por la sección inicial de la muestra.
 σ_m ; esfuerzo máximo que soporta la muestra.
E_t; es el módulo de elasticidad.
 ϵ ; es la deformación o alargamiento que se produce en la muestra.
L_e; es el límite elástico de la muestra.

1.2.1 Gráfico comparativo del comportamiento de las diferentes muestras:

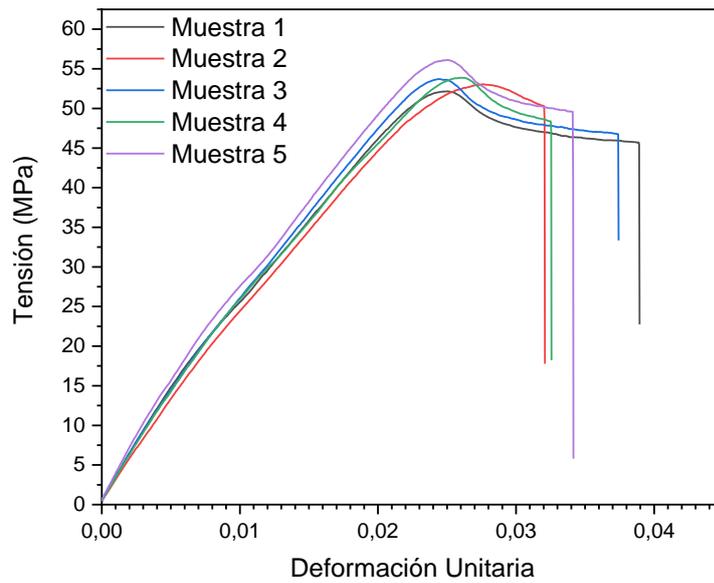


Gráfico IV. 2. Representación gráfica de las curvas de Tensión vs. Deformación de las muestras ensayadas a 2 mm/min.



Figura IV. 2. Probeta fracturada tras el ensayo a 2 mm/min.

A partir de la Figura IV.2 se puede contrastar el bajo alargamiento mostrado en los datos de la Tabla IV. 3 y Gráfico IV. 2.

1.3 Ensayo a 0,25 mm/min:

Tabla IV. 5. Tabla comparativa 1 de las muestras ensayadas a 0,25 mm/min:

Muestra	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	Carrera (mm)	L (mm)	L _f (mm)
1	4,10	10,20	41,82	2,70	115,00	117,70
2	4,20	10,00	42,00	3,19	115,00	118,19
3	4,00	10,00	40,00	2,62	115,00	117,62
4	4,00	10,10	40,40	2,78	115,00	117,78
5	4,10	10,00	41,00	2,79	115,00	117,79
PROMEDIO	4,08	10,06	41,04	2,82	115,00	117,82
DESVIACIÓN	0,08	0,09	0,87	0,22	0,00	0,22

b; es el espesor de la probeta.
h; es el ancho de la probeta.
A; equivale a la sección de la probeta.
L; es la longitud entre mordazas empleada.
L_f; es la longitud final sumando la carrera del ensayo.

Tabla IV. 6. Tabla comparativa 2 de las muestras ensayadas a 0,25 mm/min:

Muestra	Fuerza (kN)	σ (MPa)	σ_m (MPa)	E _t (GPa)	ϵ (%)	L _e (MPa)
1	1,96	47,0	46,1	2,30	2,35	43,1
2	1,87	44,5	43,8	2,22	2,77	43,4
3	1,86	46,4	43,5	2,84	2,28	42,7
4	1,86	46,1	43,7	2,81	2,42	41,8
5	1,95	47,4	46,8	2,87	2,43	45,9
PROMEDIO	1,90	46,3	44,8	2,61	2,45	43,4
DESVIACIÓN	0,05	1,13	1,53	0,32	0,19	1,54

σ ; es la fuerza perpendicular por la sección inicial de la muestra.
 σ_m ; esfuerzo máximo que soporta la muestra.
E_t; es el módulo de elasticidad.
 ϵ ; es la deformación o alargamiento que se produce en la muestra.
L_e; es el límite elástico de la muestra.

1.3.1 Gráfico comparativo del comportamiento de las diferentes muestras:

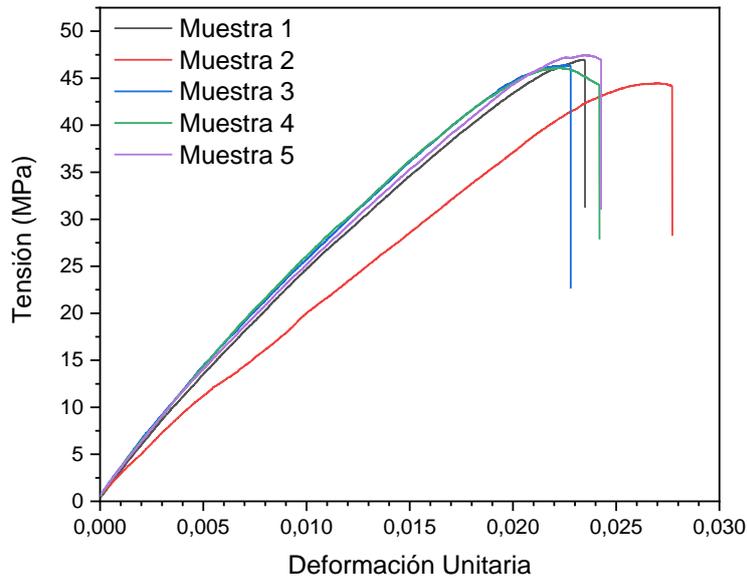


Gráfico IV. 3. Representación gráfica de las curvas de Tensión vs. Deformación de las muestras ensayadas a 0,25 mm/min.



Figura IV. 3. Probeta fracturada tras el ensayo a 2 mm/min.

A partir de la Figura IV.3 se puede contrastar el bajo alargamiento mostrado en los datos de la Tabla IV. 5 y Gráfico IV. 3.

1.4 Conclusiones parciales

A partir de los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos de tracción a velocidad constante se ha podido comprobar que el ácido poliláctico muestra un comportamiento frágil por la baja elongación que muestra y la poca diferencia que hay entre el límite elástico y el punto de resistencia máxima a rotura. En cuanto a sus propiedades de resistencia, estas son similares a las que podemos encontrar en otros polímeros como el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) o el PET (Tereftalato de Polietileno) y ligeramente inferiores al PC (Policarbonato).

2. ENSAYOS DE VISCOELASTICIDAD

En el presente apartado se van a mostrar los resultados obtenidos en los ensayos de fluencia y relajación.

2.1 Ensayo de fluencia:

En los siguientes subapartados se van a mostrar los datos obtenidos de los diferentes ensayos a fluencia realizados. Como ya se ha indicado en el apartado de experimental, se han realizado 3 ensayos de fluencia y los porcentajes de tensión empleados son respecto al valor definido por el Límite Elástico de las probetas ensayadas a 10 mm/min.

2.1.1 Ensayos de fluencia al 10% de tensión:

En estos ensayos se aplicó de forma incremental una tensión de 219 N en un espacio de 5 segundos y se mantuvo constante durante 10 minutos más.

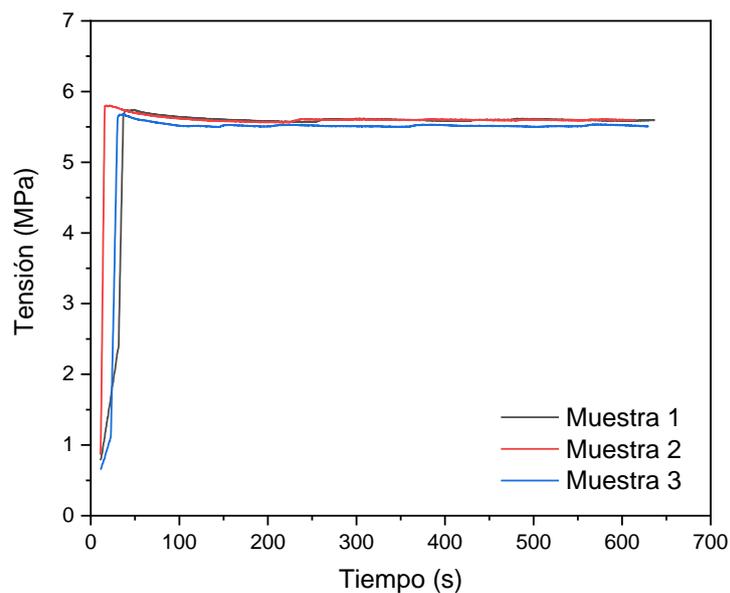


Gráfico IV. 4. Representación gráfica de las curvas de Tensión (MPa) con respecto al Tiempo (s) de las muestras ensayadas a un 10% de la tensión del límite elástico.

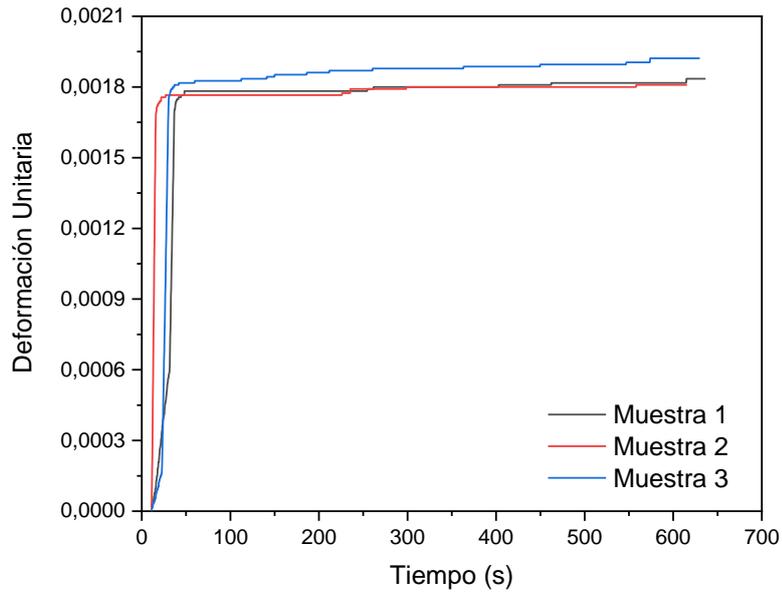


Gráfico IV. 5. Representación gráfica de las curvas de Deformación Unitaria con respecto al Tiempo (s) de las muestras ensayadas a un 10% de la tensión del límite elástico.



Figura IV. 4. Probeta ensayada al 10% de tensión.

A partir de la Figura IV.4 se puede contrastar la baja deformación que se muestra en el Gráfico IV. 5.

2.1.2 Ensayos de fluencia al 30% de tensión:

En estos ensayos se aplicó de forma incremental una tensión de 658 N en un espacio de 5 segundos y se mantuvo constante durante 10 minutos más.

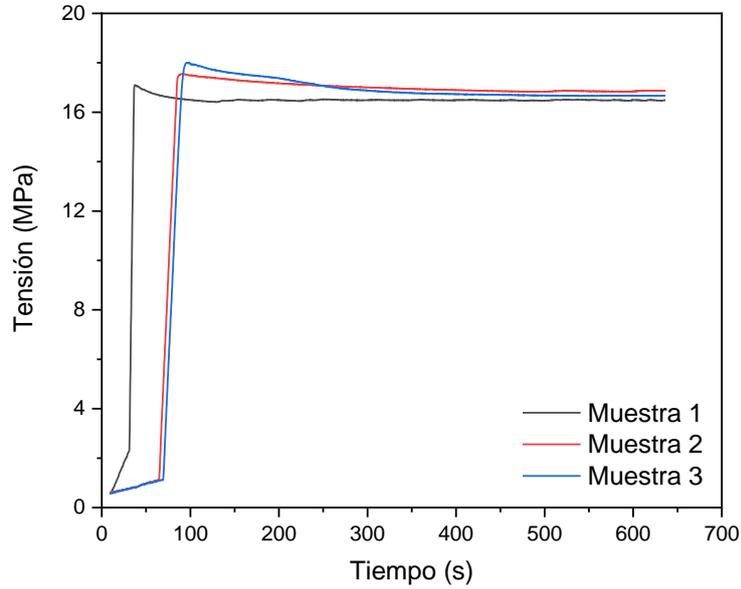


Gráfico IV. 6. Representación gráfica de las curvas de Tensión (MPa) con respecto al Tiempo (s) de las muestras ensayadas a un 30% de la tensión del límite elástico.

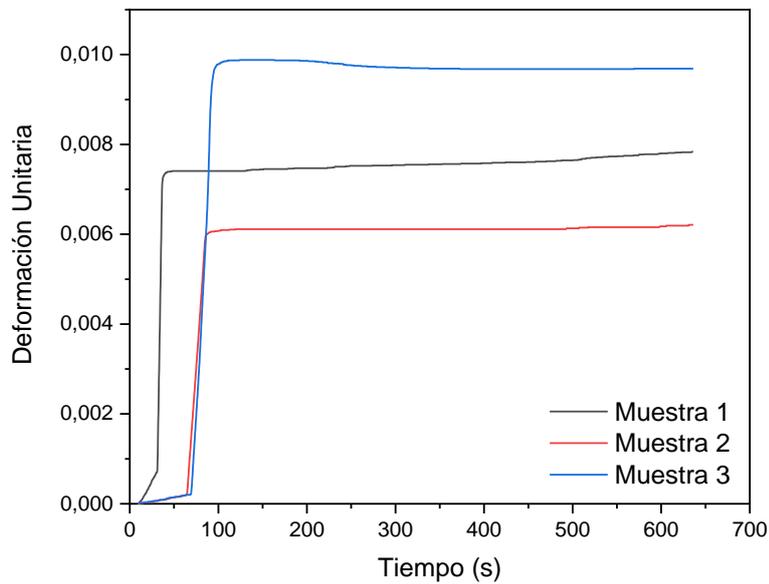


Gráfico IV. 7. Representación gráfica de las curvas de Deformación Unitaria con respecto al Tiempo (s) de las muestras ensayadas a un 30% de la tensión del límite elástico.



Figura IV. 5. Probeta ensayada al 30% de tensión.

A partir de la Figura IV.5 se puede contrastar la baja deformación que se muestra en el Gráfico IV. 7, donde se muestra una línea casi recta.

2.1.3 Ensayos de fluencia al 60% de tensión. Ensayo a rotura:

En estos ensayos se aplicó de forma incremental una tensión de 1315 N en un espacio de 5 segundos y se mantuvo constante durante 10 minutos más.

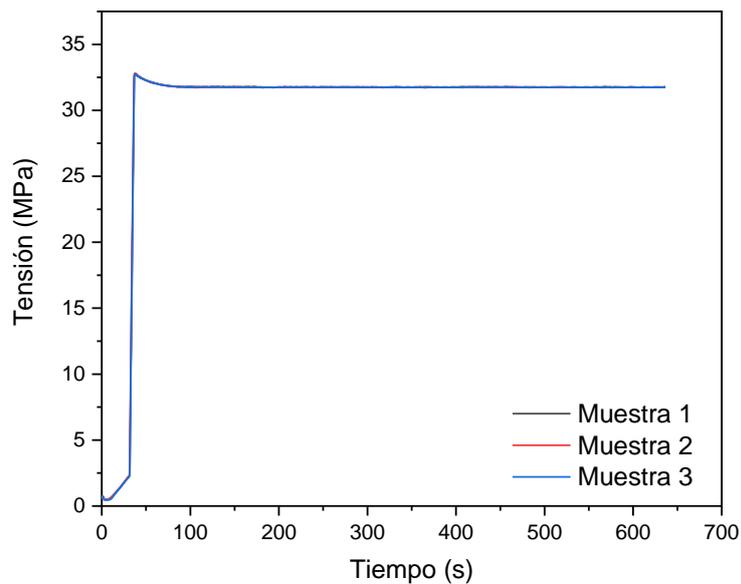


Gráfico IV. 8. Representación gráfica de las curvas de Tensión (MPa) con respecto al Tiempo (s) de las muestras ensayadas a un 60% de la tensión del límite elástico.

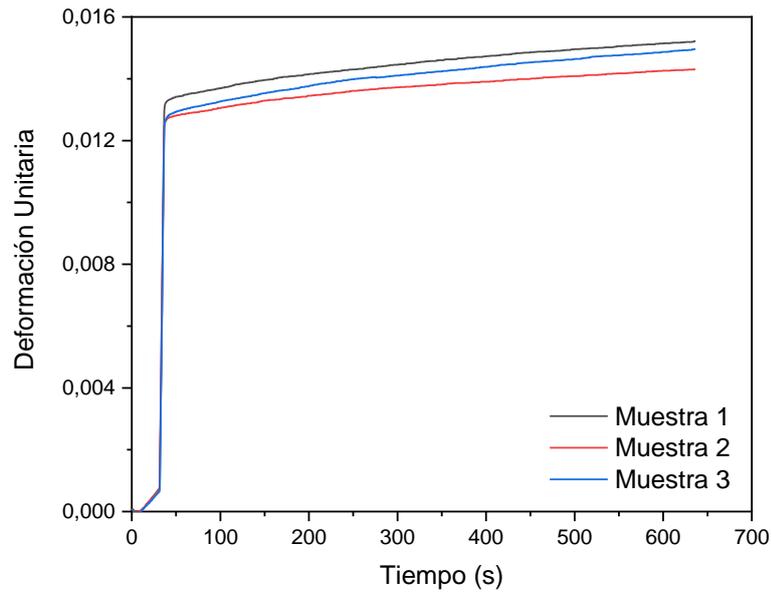


Gráfico IV. 9. Representación gráfica de las curvas de Deformación Unitaria con respecto al Tiempo (s) de las muestras ensayadas a un 60% de la tensión del límite elástico.



Figura IV. 6. Probeta ensayada al 60% de tensión.

A partir de la Figura IV.6 se puede contrastar la baja deformación que se muestra en el Gráfico IV. 9.

2.2 Ensayos de relajación de tensiones:

En los siguientes subapartados se van a mostrar los datos obtenidos de los diferentes ensayos de relajación realizados. Como ya se ha indicado en el apartado de experimental, se han realizado 3 ensayos de fluencia y los porcentajes de deformación empleados son respecto al valor definido por la carrera o deformación de la probeta.

2.2.1 Ensayos de relajación al 10% de deformación:

En estos ensayos se aplicó una deformación de 0,41 mm en 5 segundos y se mantuvo constante durante 10 minutos más.

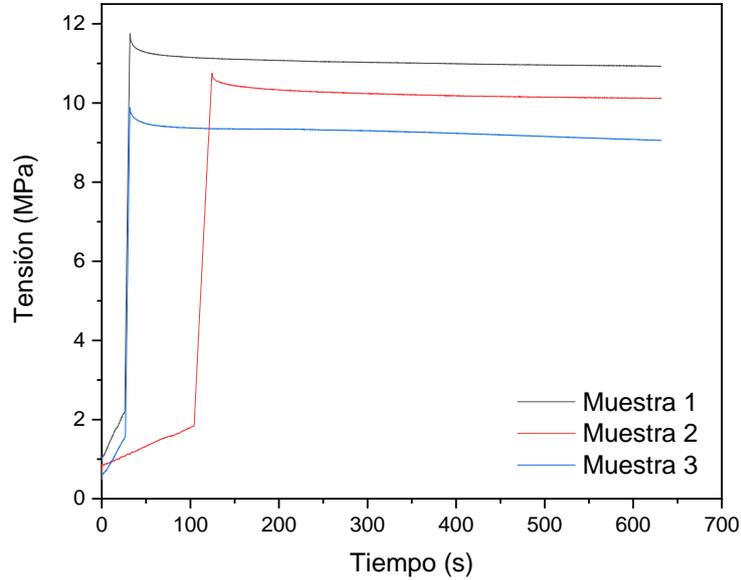


Gráfico IV. 10. Representación gráfica de las curvas de Tensión (MPa) con respecto al Tiempo (s) de las muestras ensayadas a un 10% de la deformación total de la probeta.

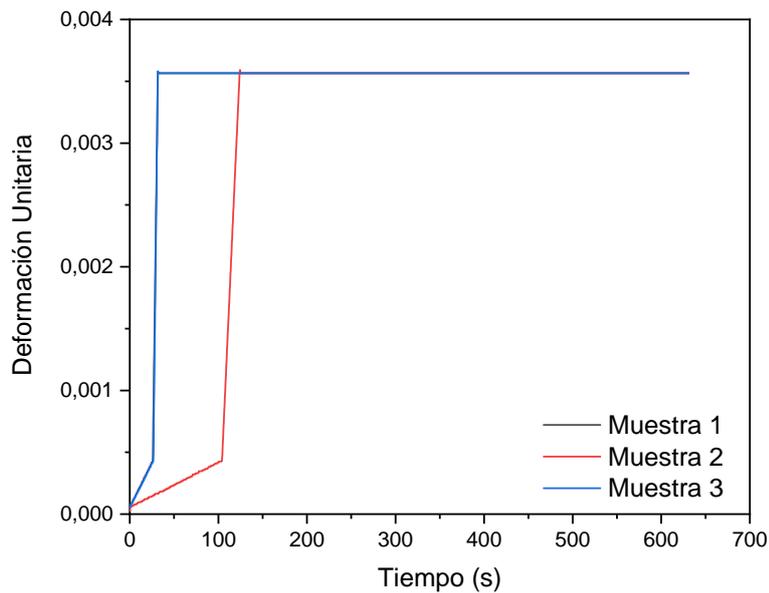


Gráfico IV. 11. Representación gráfica de las curvas de Deformación Unitaria con respecto al Tiempo (s) de las muestras ensayadas a un 10% de la deformación total de la probeta.



Figura IV. 7. Probeta ensayada al 10% de deformación.

A partir de la Figura IV.7 se puede contrastar la baja deformación que se muestra en el Gráfico IV. 11, donde se muestra que la deformación unitaria se mantiene constante con respecto.

2.2.2 Ensayos de relajación al 30% de deformación:

En estos ensayos se aplicó una deformación de 1,22 mm en 5 segundos y se mantuvo constante durante 10 minutos más.

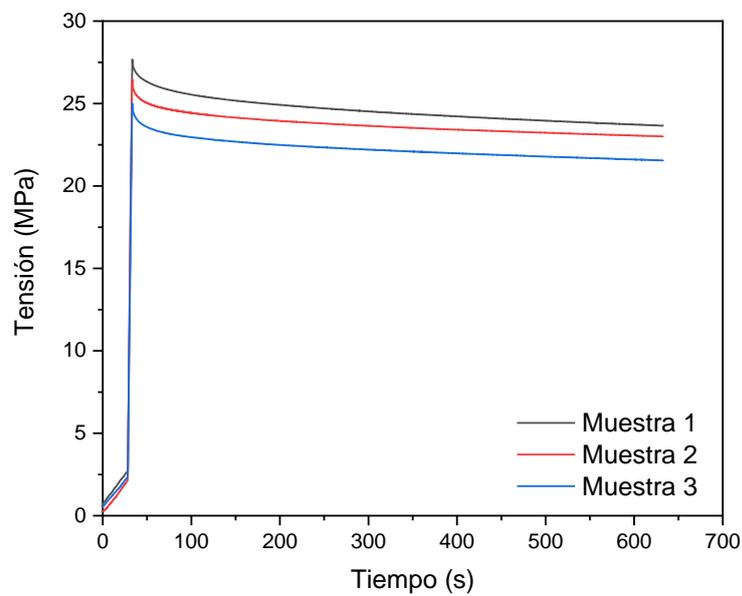


Gráfico IV. 12. Representación gráfica de las curvas de Tensión (MPa) con respecto al Tiempo (s) de las muestras ensayadas a un 30% de la deformación total de la probeta.

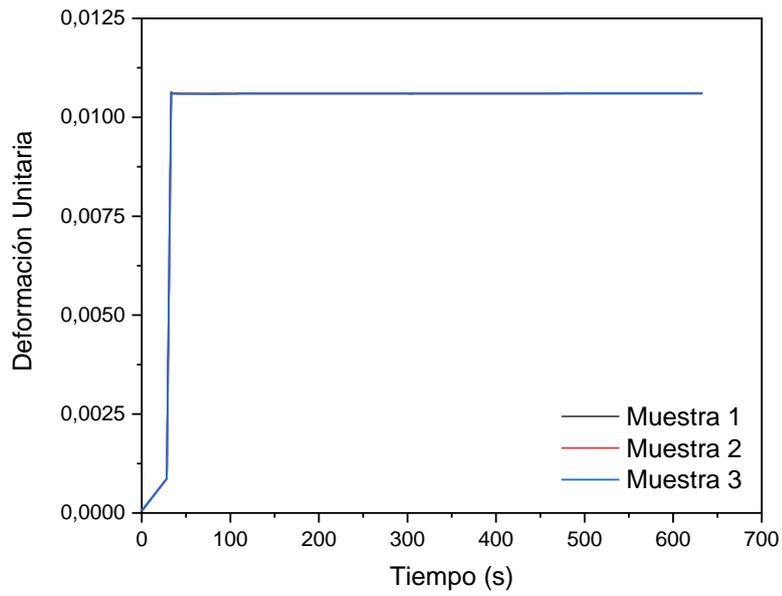


Gráfico IV. 13. Representación gráfica de las curvas de Deformación Unitaria con respecto al Tiempo (s) de las muestras ensayadas a un 30% de la deformación total de la probeta.



Figura IV. 8. Probeta ensayada al 30% de deformación.

A partir de la Figura IV.8 se puede contrastar la baja deformación que se muestra en el Gráfico IV. 13.

2.2.3 Ensayos de relajación al 60% de deformación:

En estos ensayos se aplicó una deformación de 2,45 mm en 5 segundos y se mantuvo constante durante 10 minutos más.

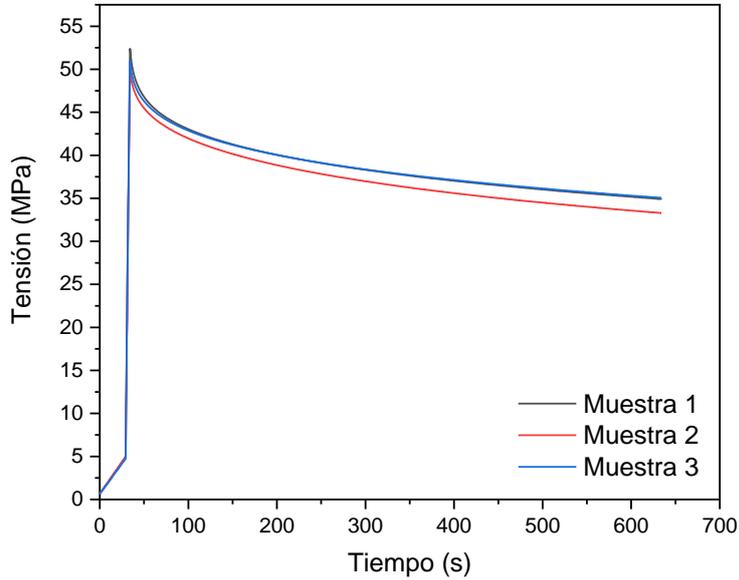


Gráfico IV. 14. Representación gráfica de las curvas de Tensión (MPa) con respecto al Tiempo (s) de las muestras ensayadas a un 60% de la deformación total de la probeta.

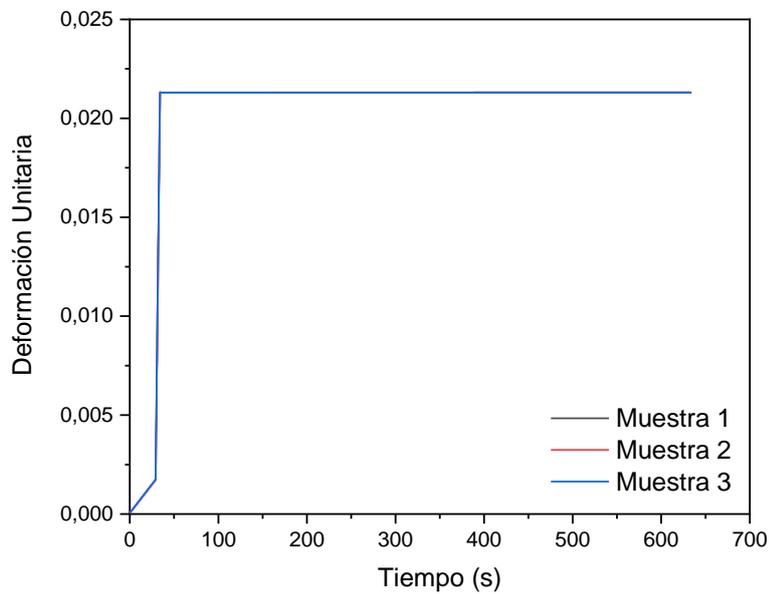


Gráfico IV. 15. Representación gráfica de las curvas de Deformación Unitaria con respecto al Tiempo (s) de las muestras ensayadas a un 60% de la deformación total de la probeta.



Figura IV. 9. Probeta ensayada al 60% de deformación.

A partir de la Figura IV.9 se puede contrastar la baja deformación que se muestra en el Gráfico IV. 15.

2.3 Conclusiones parciales

A partir de los resultados mostrados tanto en los ensayos de fluencia como en los de relajación, se ha podido comprobar que el PLA es un polímero con una baja fluencia. Esta conclusión se observa con claridad en los diferentes gráficos de Deformación Unitaria – Tiempo, donde en ninguno de los casos se ha podido constatar que haya habido una deformación notable durante el tiempo que ha durado el ensayo, aunque convendría realizar ensayos con una duración mayor para poder afirmar esta hipótesis de comportamiento. Aun así, este resultado era de esperar tras lo visto en la parte de caracterización mediante tracción a velocidad continua (1. Ensayos de tracción), donde se ha visto que la deformación del polímero empleado es baja.

3. OTROS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICAS:

3.1 Ensayo con galgas extensométricas:

Debido a que, para el desarrollo y cumplimiento del objetivo principal del presente proyecto, se requiere una precisión considerable en los resultados obtenidos y, tal y como ya se ha indicado en el apartado III. Experimental, se ha realizado un ensayo de tracción con unas galgas extensométricas, con el fin de obtener un Módulo de Young y un Coeficiente de Poisson lo más exactos posibles.

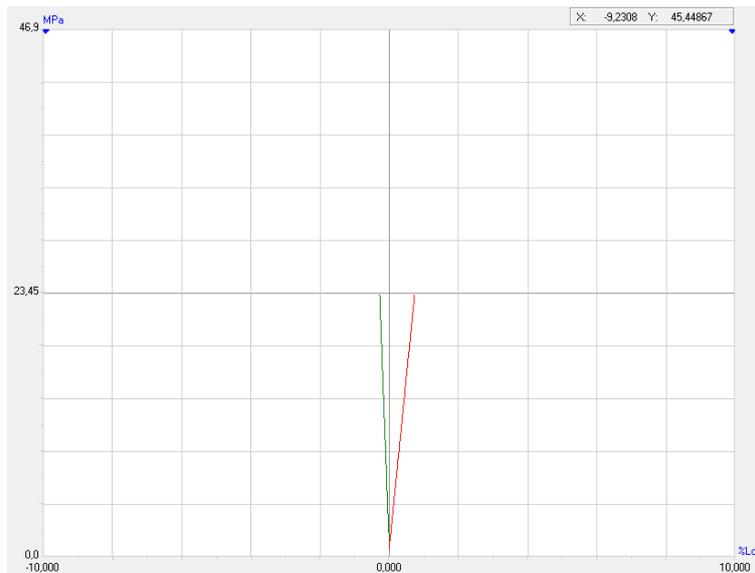


Figura IV. 10. Gráfico Tensión – Deformación Transversal Longitudinal, obtenido del software controlados de la máquina universal de ensayos Elib 50. A partir de este gráfico se puede obtener el Módulo de Elasticidad de forma más precisa.

Los valores obtenidos de este ensayo son:

Tabla IV. 7. Valores obtenidos a través del ensayo con las galgas extensométricas de Epsilon:

Módulo de Elasticidad (GPa)	3,08
Coeficiente de Poisson	0,35

Hay que tener en cuenta estos valores para su introducción en el software de simulación empleado y así definir correctamente el material.

4.1 ANSYS WORKBENCH

La última parte del presente proyecto es adaptar los datos obtenidos en los ensayos de tracción, fluencia y relajación para su introducción en el software de simulación ANSYS. Como ya se ha indicado, este programa admite diversas formas para simular el comportamiento viscoelástico. Estas formas son:

- Introducción y ajuste de la curva de tensión – deformación.
- Aplicación de las ecuaciones del Modelo Generalizado de Maxwell.
- Empleando las ecuaciones de las Series Prony.

Este apartado se dividirá en diferentes casos de estudios donde se expondrá el procedimiento seguido para la obtención del resultado.

4.1 Engineering Data:

El primer paso es definir el material que se va a emplear. El apartado de selección y edición de materiales de ANSYS Workbench, denominado como *Engineering Data*, incluye una gran variedad de propiedades y modelos de cálculo que abarcan prácticamente cualquier comportamiento de un material, se puede encontrar contenido para definir desde propiedades mecánicas básicas de un material, hasta comportamiento térmico, magnético, de fallo y específicos de viscoelasticidad (Figura IV. 11).

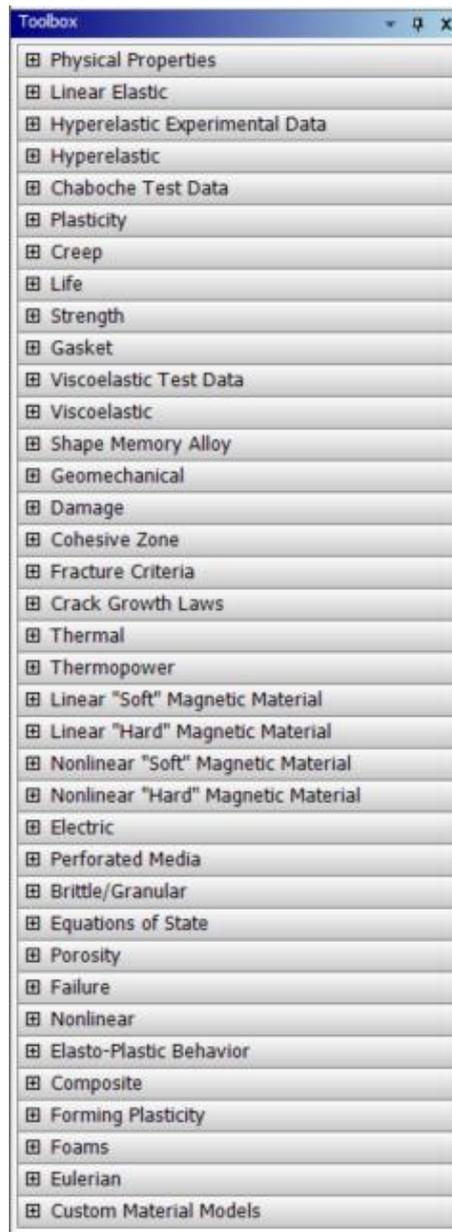


Figura IV. 11. Tabla de menús con diferentes definidores de materiales.

Las propiedades de definición de comportamiento mecánico más empleados para un material polimérico son BISO (*Bilinear Isotropic Hardening*) y MISO (*Multilinear Isotropic Hardening*), que se encuentran en el apartado de *Plasticity*. Además de estos definidores, también se pueden emplear propiedades como *Anand Viscoplasticity*, que se encuentra en el mismo submenú y se basa en el Modelo Generalizado de Maxwell; y las propiedades de *Prony Shear Relaxation* o *Prony Volumetric Relaxation*, que están ubicadas en el submenú de *Viscoelastic*.

4.2 Caso 1. Validación de los datos de tracción:

El primer caso de estudio es la validación de los datos obtenidos en los ensayos de tracción a velocidad constante. Como datos de partida se tomarán los obtenidos de la **muestra 4** de los ensayos realizados a **10 mm/min** (Gráfico IV. 16). Se ha optado por elegir esta velocidad por considerarla común en muchos ensayos y se ha elegido la **muestra 4** en concreto por mostrar lo que se podría considerar como unos resultados medios de entre las 5 muestras ensayadas.

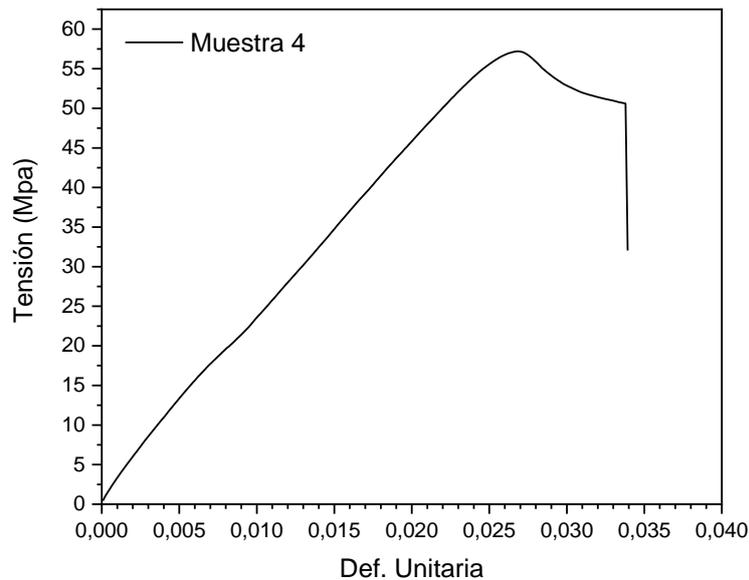


Gráfico IV. 16. Representación gráfica de la curva de Tensión vs. Deformación de la muestra 4 que ha sido ensayada a 10 mm/min.

Las propiedades principales de esta muestra y que se han de introducir para definir el material en ANSYS son:

Tabla IV. 8. Tabla de propiedades mecánicas principales de la muestra seleccionada:

Propiedades de la muestra 4		
Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	1,24	g/cm ³
Módulo de Young	3080,54	MPa
Coefficiente de Poisson	0,346	
Límite elástico	55,05	MPa
Tensión máxima	57,19	MPa

4.2.1 Introducción de datos:

Según diferentes fuentes, para la correcta introducción de datos de comportamiento mecánico de un material, estos hay que corregirlos, hay que pasar los datos de “ingeniería” que se obtienen de la máquina de tracción a verdaderos “verdaderos”.

A partir de las indicaciones encontradas en diversos sitios web y varios artículos de investigación en los que se podría destacar los escritos por A. Arriaga et al. (2007) [19], D. Tscharnuter et al.

(2012) [34] y *W. Brocks et al.* (2015) [20], ANSYS permite la entrada de datos de tensión Cauchy (Ecuación IV.1) y de deformación logarítmica o de Hencky (Ecuación IV.2):

$$\sigma_t = \sigma_t(1 + \varepsilon_e) \quad \begin{array}{l} \text{Ecuación IV. 1} \\ \text{(Tensión Cauchy)} \end{array}$$

$$\varepsilon_t = Ln(1 + \varepsilon_e) \quad \begin{array}{l} \text{Ecuación IV. 2} \\ \text{(Deformación de tipo logarítmica o de Hencky)} \end{array}$$

En este caso, como se ha obtenido el valor del Coeficiente de Poisson de manera precisa con el empleo de unas galgas extensométricas y al no estar ensayando un material elastomérico, no haría falta emplear las ecuaciones para hallar su valor ni convertir los datos de tensión de ingeniería en función del Coeficiente de Poisson.

Los valores de la muestra 4 tras la aplicación de estas ecuaciones son:

Tabla IV. 9. Tabla comparativa de los valores originales de la muestra y los mismos tras aplicarles las correcciones de tensiones de Cauchy:

Corrección de valores		
Propiedad	Valor original	Valor corregido
Límite elástico	55,05	56,40
Tensión máxima	57,19	58,73

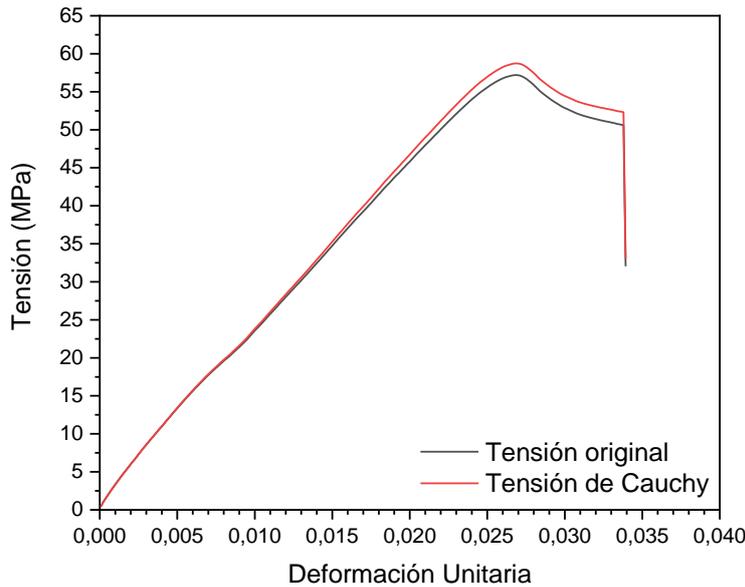


Gráfico IV. 17. Representación gráfica de la tensión original de la muestra y la tensión corregida por la ecuación de Cauchy.

Como se puede observar tanto en la Tabla IV. 9 y en el Gráfico IV. 17, la diferencia que hay entre la tensión original y la corregida es muy pequeña, con la tensión de Cauchy aumenta ligeramente la resistencia de la muestra.

4.2.2 Creación de los materiales para simulación:

Para la validación de los datos de tracción obtenidos a velocidad constante se hará uso de los materiales BISO y MISO, que se crearán con los datos originales y los datos corregidos para comparar la necesidad de aplicar esta corrección y también se comparará la precisión de los diferentes definidores de material.

Todos los materiales se definirán con los datos de las tablas IV. 7, IV. 8, IV. 9 y IV. 10:

Tabla IV. 10. Datos introducidos para definir la propiedad.

Tensión (MPa)	Tensión Cauchy (MPa)	Def. Unitaria	Def. ANSYS
55,05	56,40	0,0246	0,000000
55,25	56,62	0,0248	0,000001
55,47	56,86	0,0249	0,000003
55,67	57,07	0,0251	0,000004
55,87	57,28	0,0252	0,000006
56,06	57,49	0,0254	0,000007
56,24	57,68	0,0255	0,000009
56,41	57,86	0,0257	0,000010
56,56	58,02	0,0258	0,000012
56,70	58,17	0,0259	0,000013
56,83	58,31	0,0261	0,000014
56,94	58,44	0,0262	0,000016
57,02	58,52	0,0264	0,000017
57,10	58,62	0,0265	0,000019
57,16	58,68	0,0267	0,000020
57,19	58,73	0,0268	0,000022

A) Multilinear Isotropic Hardening (MISO):

Para la creación del material con la propiedad que aporta MISO, hace falta introducir en modo tabular los datos obtenidos desde el límite elástico hasta el punto de tensión máxima, todo ello con respecto a la deformación que ha de ser 0 en el punto inicial (Tabla IV. 10).

La deformación de ANSYS se obtenido a partir de la siguiente expresión:

$$Def. ANSYS = \frac{x_1 - x_y}{100} \quad \begin{array}{l} \text{Ecuación IV. 3} \\ \text{(Deformación en formato ANSYS)} \end{array}$$

Donde:

- x_1 ; es el valor de la deformación en cada punto.
- x_y ; es el valor de la deformación registrada hasta el límite elástico.

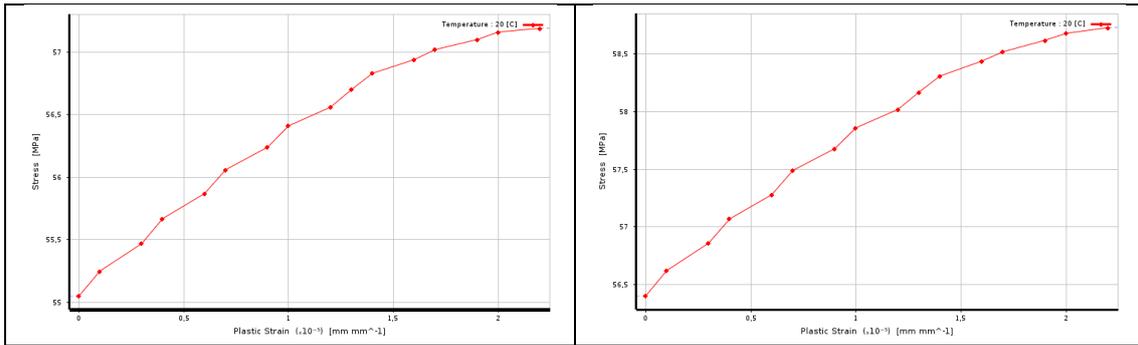


Figura IV. 12. Gráficos de las tensiones introducidas para definir el material. Estos gráficos pertenecen a la tensión original del material y a la tensión corregida respectivamente.

B) Bilinear Isotropic Hardening (BISO):

Para aplicar la propiedad BISO hace falta definir los parámetros Límite elástico y Módulo Tangente a partir de los cuales el programa crea una gráfica de tensión-deformación.

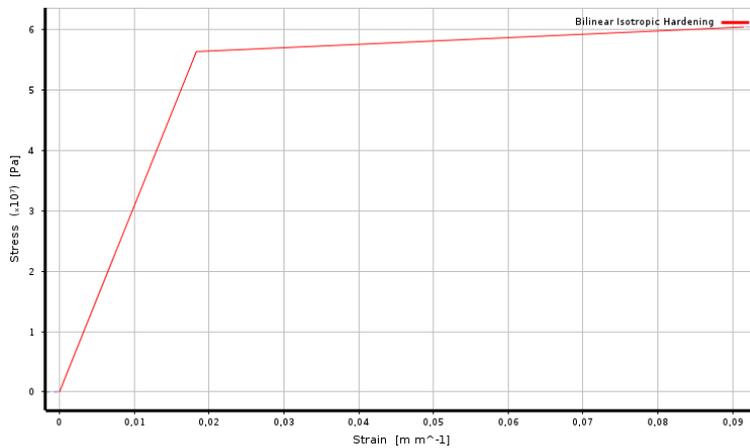


Figura IV. 13. Representación gráfica del comportamiento del material según la propiedad BISO.

Para el cálculo del **Módulo Tangente** necesario para definir el material *Bilinear Isotropic Hardening*, se ha empleado la ecuación de **Ramberg-Osgood** (Ecuación IV.4) [32]:

$$E_t = \frac{E \cdot \sigma_{YS}}{\sigma_{YS} + 0,002 \cdot n \cdot E \left(\frac{\sigma}{\sigma_{YS}}\right)^{n-1}} \quad \begin{matrix} \text{Ecuación IV. 4} \\ \text{(Ecuación Ramberg-Osgood)} \end{matrix}$$

Donde:

- σ ; es la tensión.
- σ_{YS} ; es el límite elástico. Este valor se ha de multiplicar por el 0,2%.
- E ; es el módulo elástico.
- n ; es el parámetro de Ramberg-Osgood, el cual es una medida de la no-linealidad de la curva de tensión-deformación y se haya con la siguiente ecuación:

$$n = \frac{\ln(20)}{\ln\left(\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_{0,01}}\right)} \quad \text{Ecuación IV. 5}$$

Donde:

- $\sigma_{0,2}$; equivale a la tensión al 0,2%.
- $\sigma_{0,01}$; equivale a la tensión al 0,01%.

4.2.3 Preparación de la simulación:

Para realizar la simulación del ensayo de tracción se ha creado un modelo en 3D de probeta tipo 1B-ISO 527-2:2012 (Figura IV. 14), que corresponde con el tipo de probeta empleada para los ensayos de tracción. El software empleado para su diseño ha sido *Solidworks* y el modelo se ha guardado en un formato paramétrico compatible con el programa ANSYS Workbench.

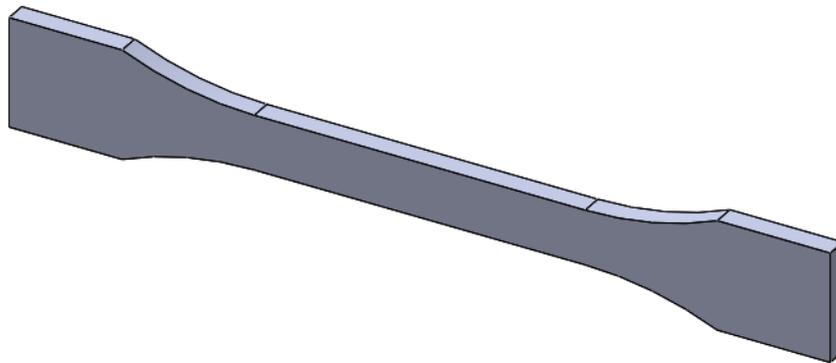


Figura IV. 14. Modelo 3D de la probeta empleada para las simulaciones. El diseño del modelo ha sido realizado con *Solidworks*.

Una vez creado el modelo, se ha de importar a ANSYS Workbench y se ha de seleccionar el tipo de análisis que se quiere realizar, en este caso es el *Static Structural* y se han de hacer las conexiones necesarias para ligar el material y la biblioteca de materiales propia del software (Figura IV. 15)

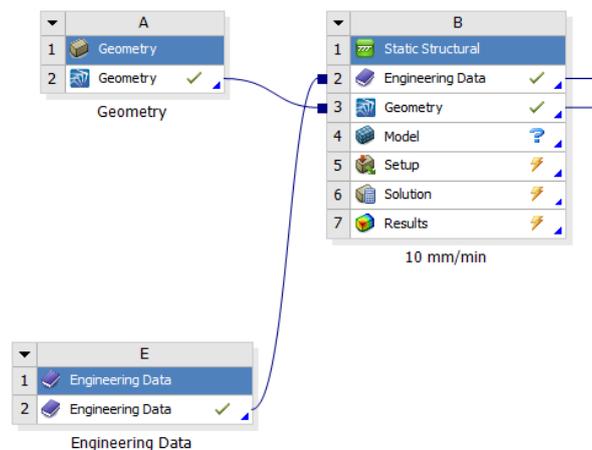


Figura IV. 15. Paneles de análisis del módulo ANSYS Workbench.

El siguiente paso es asignar uno de los materiales creados en el apartado anterior como se puede ver en la siguiente figura (Figura IV. 16):

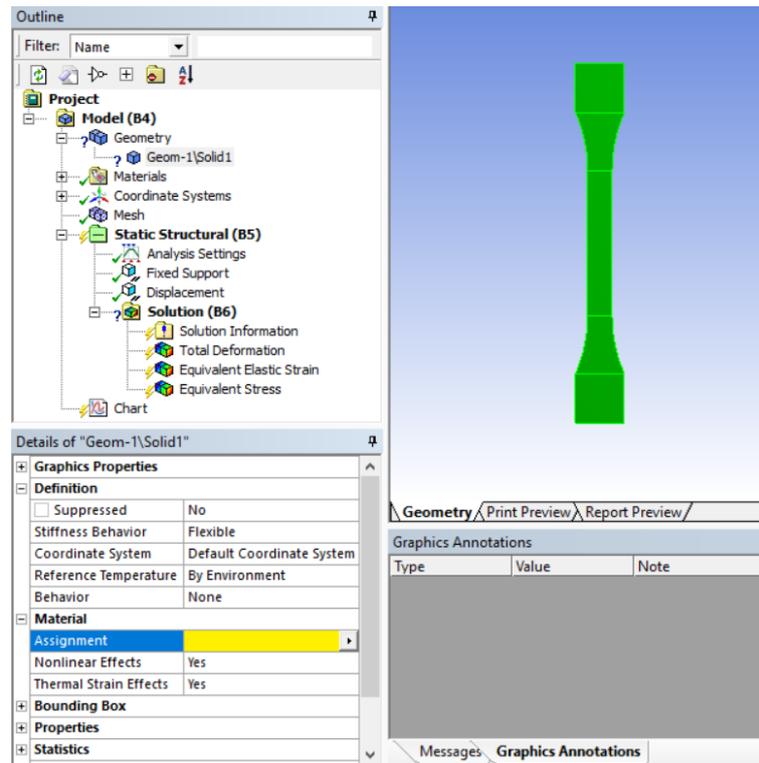


Figura IV. 16. Menú de asignación de material para el modelo de probeta.

Para la creación de la malla (*Mesh*), conviene que sea lo más fina posible para que el resultado obtenido sea real y no se vea afectado por una mala configuración de la propia malla. En este caso, para crear la malla se ha seleccionado una resolución de 4 sobre 7 y con un suavizado alto, con lo que se obtiene un resultado de malla interesante para las necesidades del proyecto. La malla resultante presenta una maya de mayor grosor en los extremos, donde la información es menos interesante; y una malla fina en la zona central, donde se registran la mayoría de los datos relevantes para el estudio (Figura IV. 17).

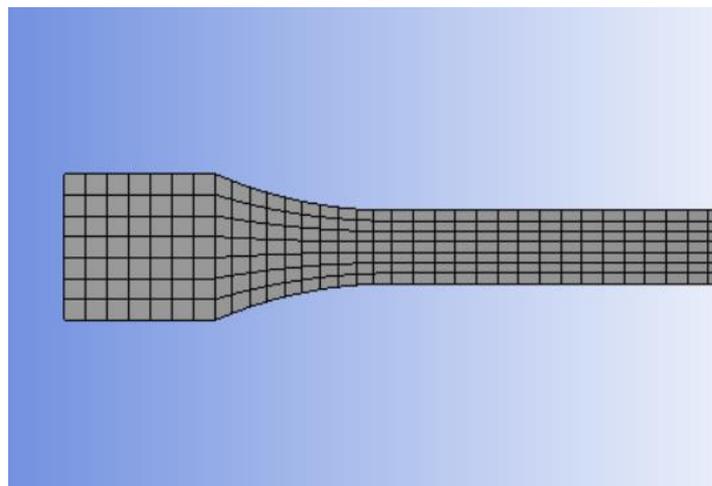


Figura IV. 17. Modelo de probeta con el mallado resultante.

Para recrear las condiciones de tensión del ensayo, se ha tratado de emular el funcionamiento de las dos mordazas, para ello se ha creado una fijación (*Fixed Support*) en la parte inferior (Figura IV. 18) y se ha simulado un elemento de tracción en la parte superior con la herramienta *Displacement* (Figura IV. 18). Se ha optado por emplear esta herramienta de desplazamiento porque, aunque la máquina de tracción trabaja con una tensión, esta no es constante como se supone que si es el desplazamiento.

De desplazamiento se ha puesto que se mueva en el Eje Y (hacia arriba) 0,16 mm por segundo, que es lo que se desplaza la mordaza de tracción en un ensayo de 10 mm/min.

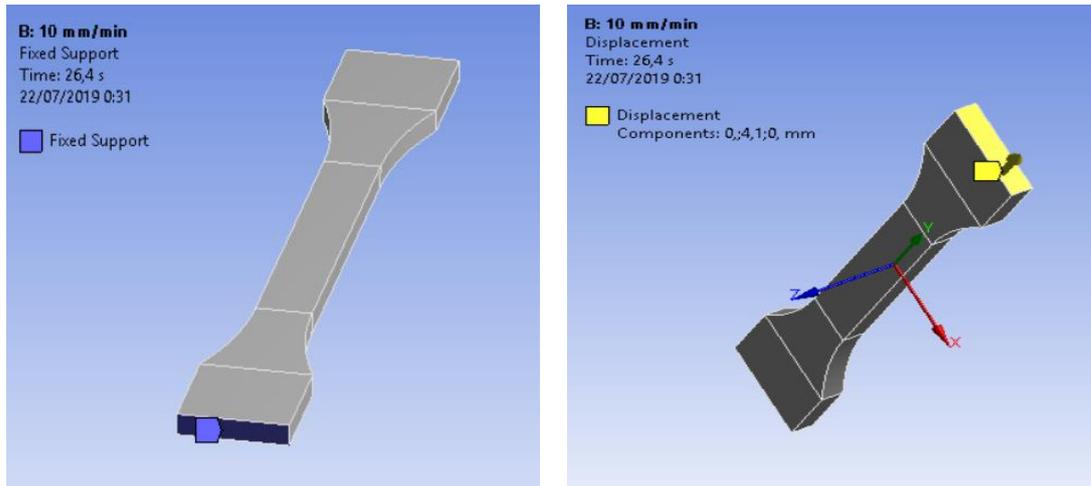


Figura IV. 18. Áreas de aplicación de las herramientas *Fixed Support* y *Displacement*.

En cuanto a los resultados que se quiere obtener de las diferentes simulaciones son los mismos de los que se tienen datos para poder compararlos. Estos datos son el desplazamiento o deformación (*Total Deformation*), la deformación unitaria (*Equivalent Elastic Strain*) y la tensión (*Equivalent Stress*). Esta última opción se analizará dos veces, una para ver el comportamiento global de la probeta y otra para observar cómo se distribuyen las tensiones en la parte estrecha.

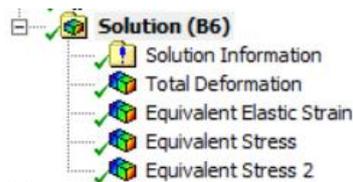


Figura IV. 19. Soluciones que se pretende obtener para comparar con los valores reales.

4.2.4 Resultados:

A continuación, se van a mostrar los diferentes resultados obtenidos de cada una de las simulaciones realizadas:

A) Multilinear Isotropic Hardening (MISO):

i. MISO – Cauchy:

Tabla IV. 11. Tabla comparativa de los resultados obtenidos con respecto a los valores obtenidos del cálculo con la tensión Cauchy:

Comparación de resultados aplicando la corrección de Cauchy		
Solución	Resultado	Valores originales
Total Deformation (mm)	4,10	3,90
Equivalent Elastic Strain (mm/mm)	0,01	0,03
Equivalent Stress (MPa)	58,7	58,7

Del software de ANSYS se pueden extraer unas gráficas que simulan el comportamiento que mostrado por el material definido y que debería ser similar al del material real.

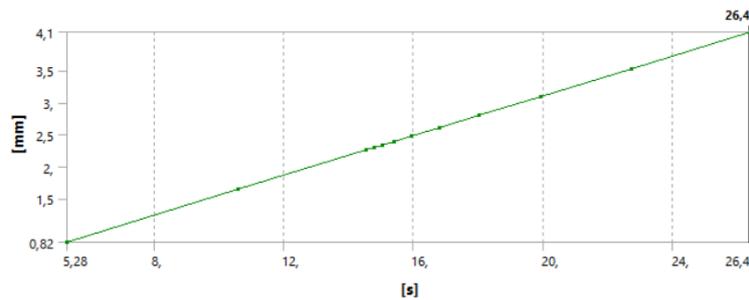


Figura IV. 20. Simulación del comportamiento de deformación del material introducido.

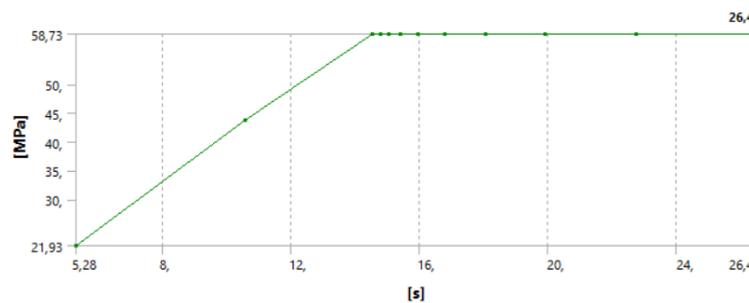


Figura IV. 21. Simulación de cómo se aplica el software la tensión determinada.

ii. MISO – Valores originales de tracción:

Tabla IV. 12. Tabla comparativa del valor obtenido en la simulación con el valor real:

Comparación de resultados aplicando los valores originales		
Solución	Resultado	Valores originales
Total Deformation (mm)	4,10	3,90
Equivalent Elastic Strain (mm/mm)	0,01	0,03
Equivalent Stress (MPa)	57,2	57,2

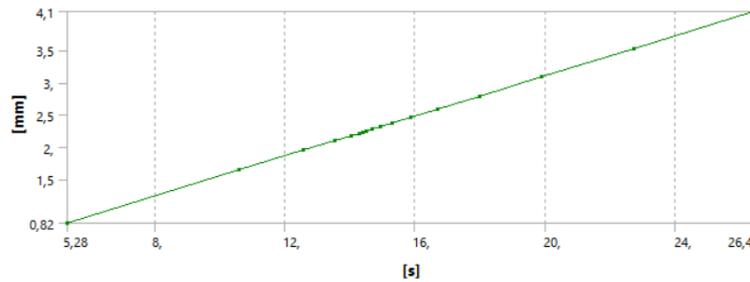


Figura IV. 22. Simulación del comportamiento de deformación del material introducido.

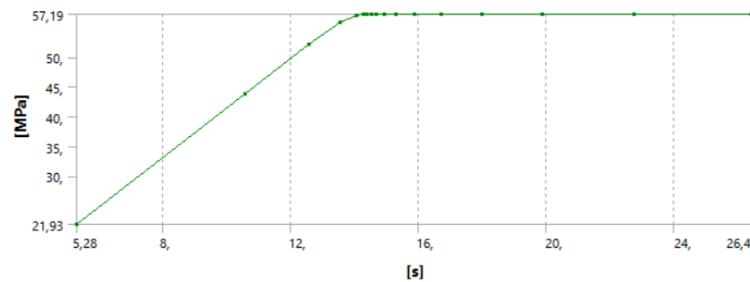


Figura IV. 23. Simulación de cómo se aplica el software la tensión determinada.

B) Bilinear Isotropic Hardening (BISO):

i. BISO – Cauchy:

Tabla IV. 13. Tabla comparativa del valor obtenido en la simulación con el valor real:

Comparación de resultados aplicando los valores originales		
Solución	Resultado	Valores originales
Total Deformation (mm)	4,10	3,90
Equivalent Elastic Strain (mm/mm)	0,01	0,03
Equivalent Stress (MPa)	56,9	57,2

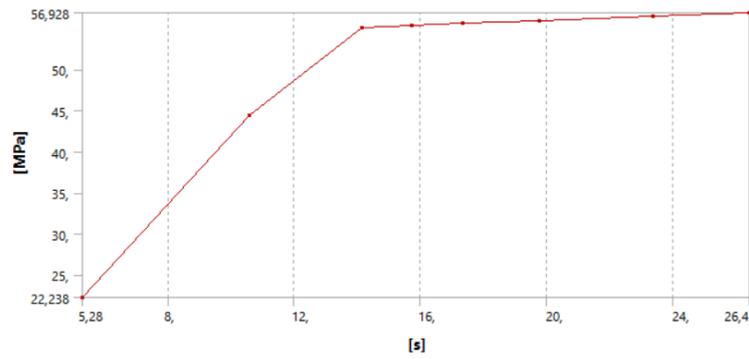


Figura IV. 24. Simulación de cómo se aplica el software la tensión determinada.

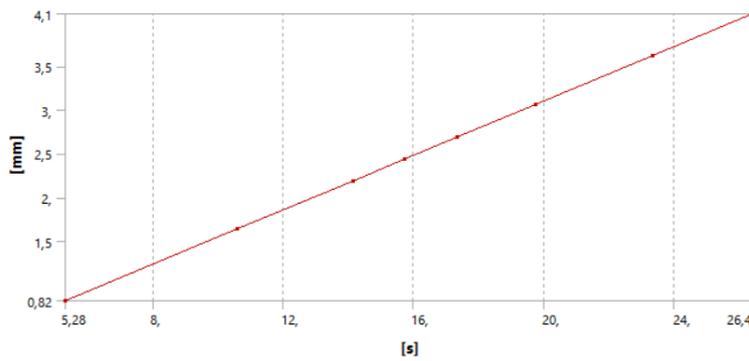


Figura IV. 25. Simulación del comportamiento de deformación del material introducido.

ii. BISO – Valores originales de tracción:

Tabla IV. 14. Tabla comparativa de los resultados obtenidos con respecto a los valores obtenidos del cálculo con la tensión Cauchy:

Comparación de resultados aplicando la corrección de Cauchy		
Solución	Resultado	Valores originales
Total Deformation (mm)	4,10	3,90
Equivalent Elastic Strain (mm/mm)	0,01	0,03
Equivalent Stress (MPa)	58,3	58,7

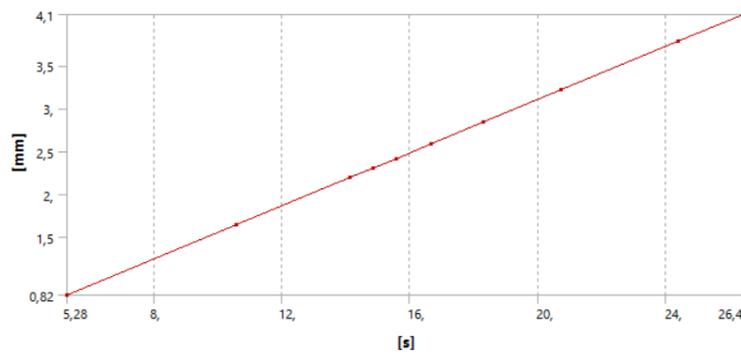


Figura IV. 26. Simulación del comportamiento de deformación del material introducido.

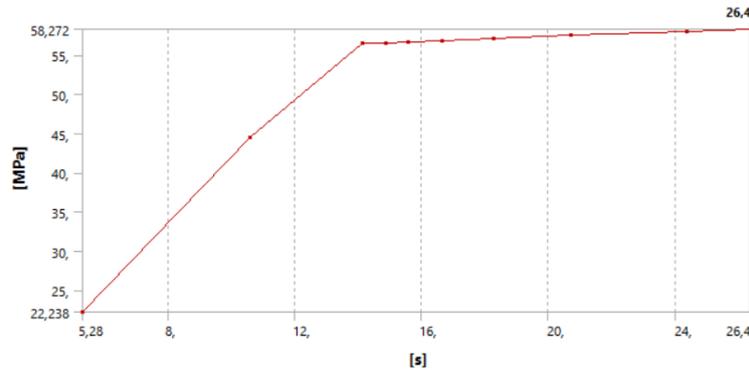


Figura IV. 27. Simulación del comportamiento de deformación del material introducido.

4.2.5 Conclusiones parciales del caso 1:

En el presente apartado se va a mostrar una comparación entre los diferentes endurecedores de material empleados y con el valor original obtenido del ensayo real.

Tabla IV. 15. Tabla comparativa de todos los valores obtenidos de las simulaciones con respecto a los valores reales obtenidos en los ensayos.

	Total Deformation (mm)	Equivalent Elastic Strain (mm/mm)	Equivalent Stress (MPa)
MISO - Original	4,10	0,01	57,2
MISO - Cauchy	4,10	0,01	58,7
Desviación valores MISO	0,00	0,00	1,09
BISO - Original	4,10	0,01	57,2
BISO - Cauchy	4,10	0,01	58,7
Desviación valores BISO	0,00	0,00	1,09

Como se puede observar en la Tabla IV. 15, donde se comparan todos los valores del mismo caso, no existe diferencia entre aplicar el material definido mediante un *Multilinear Isotropic Hardening* o definido con un *Bilinear Isotropic Hardening*. La única diferencia resultante de entre estos dos tipos de propiedades es el propio valor de tensión marcado, que es diferente en cada caso y que en ambos casos plasma en definido en el material en la simulación.

En cuanto al comportamiento del material a partir de los gráficos obtenidos de ANSYS (Figuras IV. 11 hasta la 18), la deformación (Figuras IV. 11, 13, 16 y 17) siempre es lineal, lo que corresponde con el comportamiento real material al forzar en la tracción a un desplazamiento constante.

La mayor diferencia en el comportamiento se observa en los gráficos tiempo-tensión, en los siguientes gráficos se puede ver comparado el comportamiento del material de ANSYS con el teóricamente real que se ha obtenido durante el ensayo de tracción.

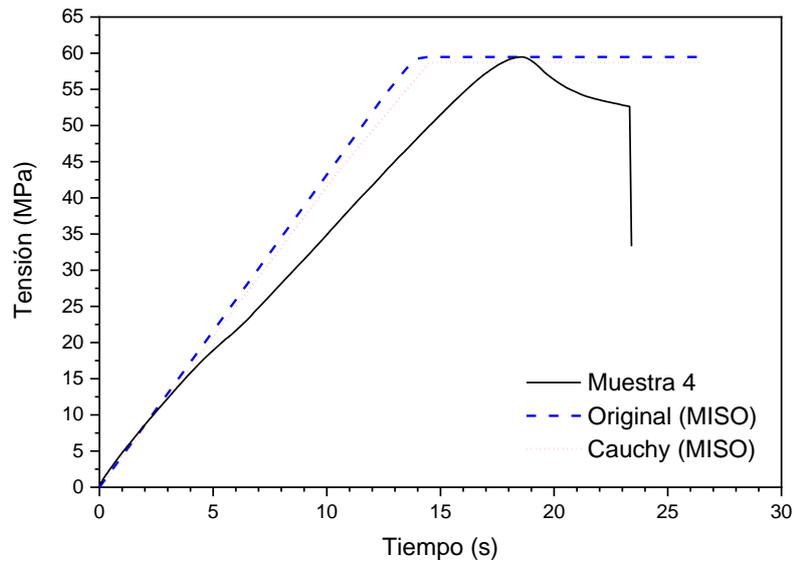


Gráfico IV. 18. Gráfico comparativo del comportamiento mostrado con el endurecedor MISO con respecto al comportamiento real obtenido del ensayo de tracción.

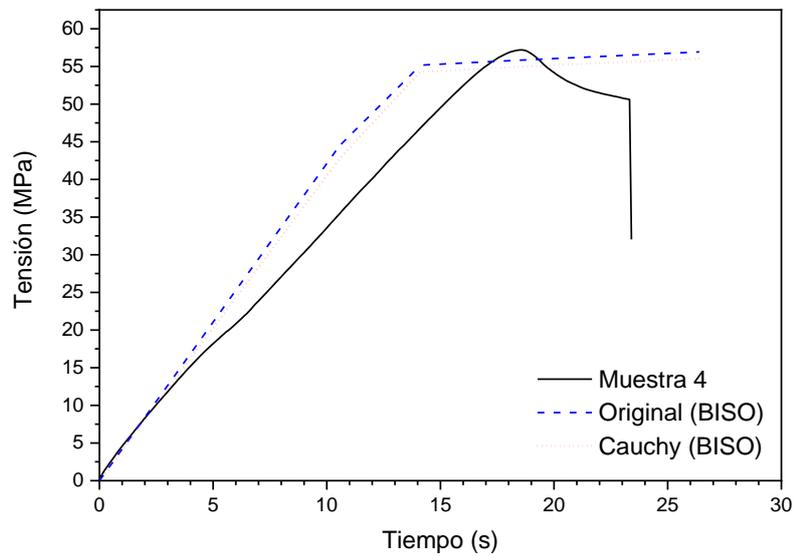


Gráfico IV. 19. Gráfico comparativo del comportamiento mostrado con el endurecedor BISO con respecto al comportamiento real obtenido del ensayo de tracción.

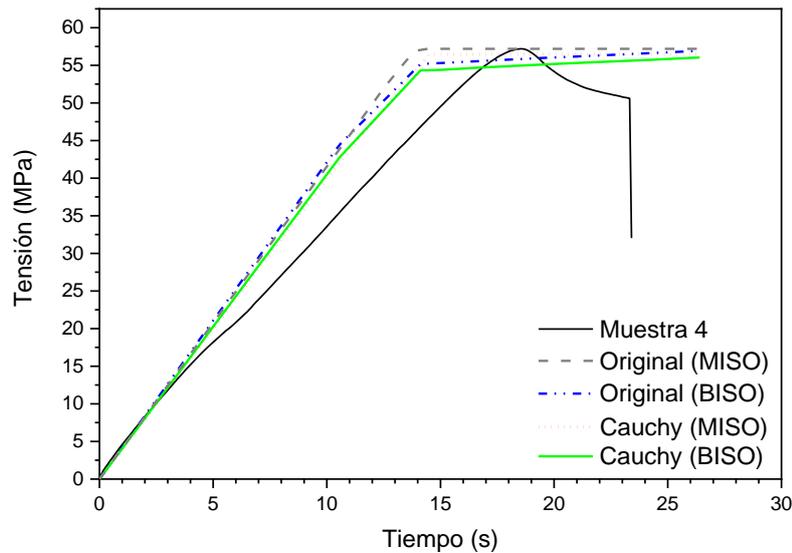


Gráfico IV. 20. Gráfico comparativo del comportamiento mostrado por los endurecedores MISO y BISO con respecto al comportamiento real obtenido del ensayo de tracción.

Como se puede comprobar en los gráficos IV. 18, IV. 19 y IV. 20, el comportamiento de la tensión que se obtiene de ANSYS con ambos endurecedores (MISO y BISO) se aleja bastante del comportamiento real. En los 4 materiales simulados se repite un patrón similar, en un espacio de tiempo de 13-14 segundos se alcanza una tensión cercana a la máxima y esta va aumentando hasta que finaliza el ensayo con la tensión máxima determinada del material. Este error o falta de realismo puede ser debido a la falta de precisión en la toma de datos. El cálculo realizado en los ensayos toma la sección como constante y no tiene en cuenta la posible estricción de la probeta y, por tanto, la reducción de su sección.

A partir de la Figura IV. 28 se puede analizar cómo se distribuyen las tensiones en el modelo de probeta empleado. En este caso, este análisis solamente sirve para comprobar que las zonas de mayor tensión se concentran en la parte adecuada, que dada la forma de halterio de la probeta, es donde deben concentrarse si la simulación es realista.



Figura IV. 28. Resultado de la simulación de tracción a 10 mm/min. Como se puede observar, la zona de mayor tensión se encuentra en la parte estrecha del modelo. Este comportamiento es el adecuado y similar al de una probeta real.

4.3 Caso 2. Validación de los resultados de fluencia:

En este segundo caso de estudio se pretende obtener los valores experimentales de fluencia al 10% de tensión a partir de la simulación con los materiales creados en el caso anterior (Caso 1).

Como los ensayos de fluencia trabajan aplicando una tensión en un determinado espacio de tiempo y manteniendo la misma durante otro espacio tiempo, para recrear estas condiciones en el software de ANSYS Workbench, se ha estipulado que se realice la simulación en 2 pasos, el primero con una duración de 5 segundos, que corresponde con la aplicación de la carga (Figura IV. 29); y el segundo paso con una duración de 600 segundos que corresponde con el tiempo empleado manteniendo la carga. Para la simulación no se tendrá en cuenta la precarga que se realiza en el ensayo experimental.

Tabular Data		
	Steps	End Time [s]
1	1	5,
2	2	600,
*		

Figura IV. 29. Recorte de la tabla de datos donde especifica los tiempos empleados para cada paso. Para determinar estos pasos hay que introducirse en el menú de Analysis Settings e introducir los pasos y tiempos deseados en el submenú de Step Controls.

Para simular los esfuerzos de este caso, en lugar un desplazamiento fijo como en el caso anterior, se aplicará la fuerza (*Force*) en la cara superior del modelo de probeta y como valor se le pondrá el mismo que se ha aplicado para el ensayo real (219 N) (Figura IV. 30).

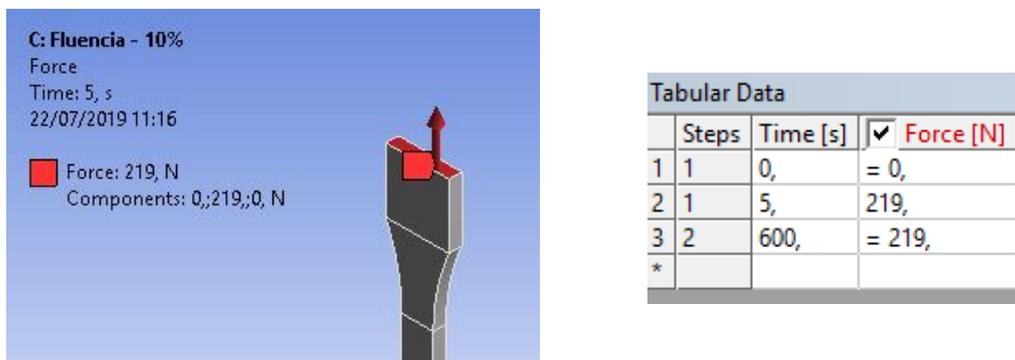


Figura IV. 30. Zona y dirección de la aplicación de la fuerza y momentos en los que se aplica dicha fuerza.

4.3.1 Resultados:

Debido a las características de este ensayo y a que no se les aplica ninguna corrección a las curvas obtenidas en el experimental, todos los valores obtenidos se compararán con los valores originales obtenidos del ensayo real.

A) Multilinear Isotropic Hardening (MISO):

i. MISO con tensión de Cauchy:

Tabla IV. 16. Tabla comparativa de los valores obtenidos con la propiedad MISO y los valores de tensión Cauchy, con respecto a los valores reales del material:

Comparación de resultados aplicando la corrección de Cauchy		
Solución	Resultado	Valores originales
Total Deformation (mm)	0,21	0,21
Equivalent Elastic Strain (mm/mm)	0,002	0,002
Equivalent Stress (MPa)	5,68	5,59

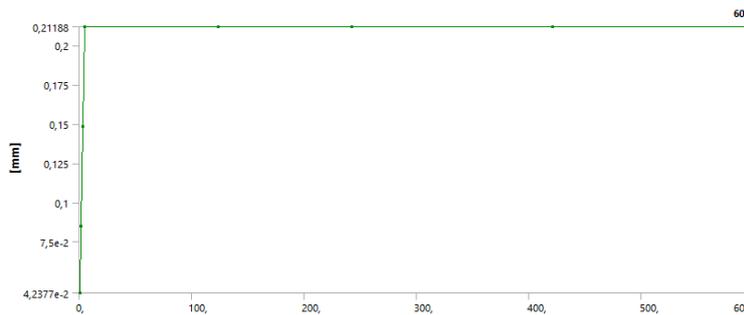


Figura IV. 31. Gráfico de ANSYS que muestra el comportamiento de las deformaciones con respecto al tiempo.

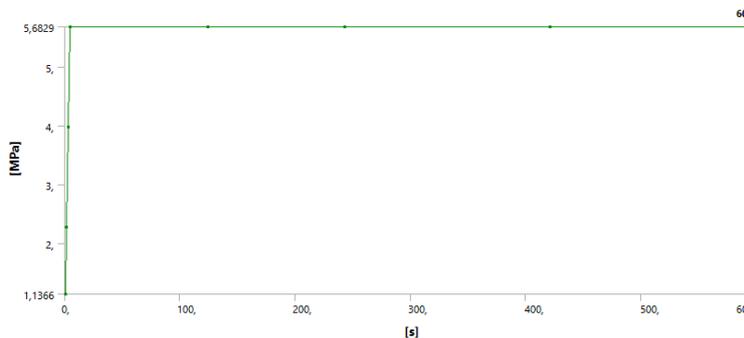


Figura IV. 32. Gráfico de ANSYS que muestra el comportamiento de las tensiones con respecto al tiempo.

ii. MISO con tensión original:

Tabla IV. 17. Tabla comparativa de los valores obtenidos con la propiedad MISO y los valores de tensión originales del ensayo de tracción, con respecto a los valores reales del material:

Comparación de resultados aplicando los valores originales		
Solución	Resultado	Valores originales
Total Deformation (mm)	0,21	0,21
Equivalent Elastic Strain (mm/mm)	0,002	0,002
Equivalent Stress (MPa)	5,68	5,59

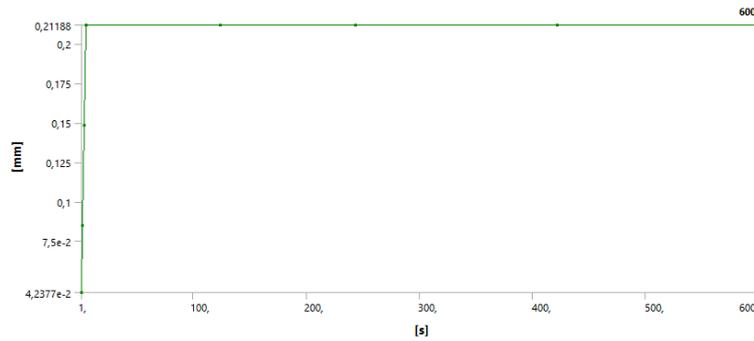


Figura IV. 33. Gráfico de ANSYS que muestra el comportamiento de las deformaciones con respecto al tiempo.

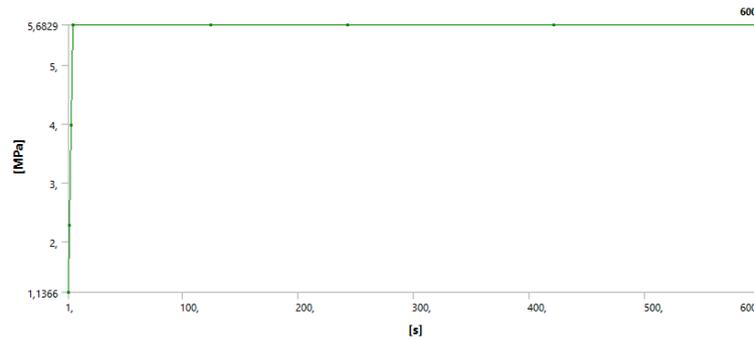


Figura IV. 34. Gráfico de ANSYS que muestra el comportamiento de las tensiones con respecto al tiempo.

B) Bilinear Isotropic Hardening (BISO):

i. BISO con tensión de Cauchy:

Tabla IV. 18. Tabla comparativa de los valores obtenidos con la propiedad BISO y los valores de tensión Cauchy con respecto a los valores reales del material:

Comparación de resultados aplicando la corrección de Cauchy		
Solución	Resultado	Valores originales
Total Deformation (mm)	0,21	0,21
Equivalent Elastic Strain (mm/mm)	0,002	0,002
Equivalent Stress (MPa)	5,68	5,59

ii. BISO con tensión original:

Tabla IV. 19. Tabla comparativa de los valores obtenidos con la propiedad BISO y los valores de tensión originales del ensayo de tracción, con respecto a los valores reales del material:

Comparación de resultados aplicando los valores originales		
Solución	Resultado	Valores originales
Total Deformation (mm)	0,21	0,21
Equivalent Elastic Strain (mm/mm)	0,002	0,002
Equivalent Stress (MPa)	5,68	5,59

4.3.2 Conclusiones parciales del Caso 2:

En el presente apartado se va a mostrar una comparación entre los diferentes endurecedores de material empleados y con el valor original obtenido del ensayo real.

Tabla IV. 20. Tabla comparativa de todos los valores obtenidos de las simulaciones con respecto a los valores obtenidos en los ensayos de tracción a fluencia:

Propiedad	Total Deformation (mm)	Equivalent Elastic Strain (mm/mm)	Equivalent Stress (MPa)
MISO - Original	0,21	0,002	5,68
MISO - Cauchy	0,21	0,002	5,68
Desviación resultados MISO	0,00	0,000	0,00
BISO - Original	0,21	0,002	5,68
BISO - Cauchy	0,21	0,002	5,68
Desviación resultados BISO	0,00	0,000	0,00
Desviación MISO-BISO	0,00	0,000	0,00
Valores originales	0,21	0,002	5,59
Desviación global	0,00	0,000	0,04

Como se puede observar en la Tabla IV. 20, las simulaciones realizadas con ambos tipos de propiedades endurecedores del material (BISO y MISO), han dado el mismo valor en el comportamiento a deformación y en la deformación unitaria. En el apartado de las tensiones, ambas propiedades han mostrado el mismo resultado, sin embargo, este es superior (desviación de 0,04) al valor real obtenido en el ensayo de fluencia. Debido a las características de este ensayo, se aplican tensiones lejanas a las de fractura y depende del tiempo y la temperatura a la que se encuentre, habría que estudiar detenidamente como podría afectar esta desviación en su aplicación real.

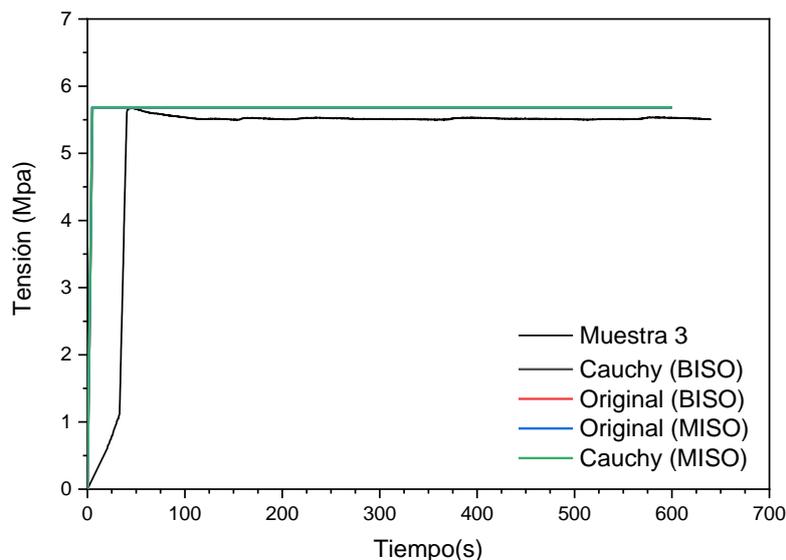


Gráfico IV. 21. Gráfico comparativo del comportamiento real de la muestra a fluencia con respecto a la fluencia simulada en ANSYS.

En el Gráfico IV. 21 se puede constatar lo mostrado en la Tabla IV. 20, donde los materiales han mostrado exactamente el mismo resultado, sin embargo, este difiere ligeramente del real. La diferencia en cuanto al inicio de la aplicación de la tensión que se puede observar en el gráfico puede ser debido a la precargar que se le realiza en el ensayo real y que no se ha tenido en cuenta para la simulación. Del gráfico también se puede ver que ANSYS mantiene constante la tensión y esta no varía, por lo que se puede afirmar que no está teniendo en cuenta un comportamiento viscoelástico. Esto puede ser debido a que tanto el software como muchos modelos de cálculo, no tienen en cuenta la fase de reducción de sección de la probeta, suceso que afecta a su comportamiento y que sí que se puede apreciar en la línea de la Muestra 3.

4.4 Caso 3. Validación de los resultados de relajación:

En este tercer caso de estudio se pretende obtener los valores experimentales de relajación de tensiones al 10% de deformación a partir de la simulación con los materiales creados en el caso anterior (Caso 1).

Como los ensayos de relajación trabajan aplicando una determinado en un determinado espacio de tiempo y manteniendo el mismo durante otro espacio tiempo, para recrear estas condiciones en el software de ANSYS Workbench, se ha estipulado que se realice la simulación en 2 pasos, el primero con una duración de 5 segundo, que corresponde con la aplicación de la deformación; y el segundo paso, con una duración de 600 segundo que corresponde con el tiempo empleado manteniendo la misma deformación (Figura IV. 35).

Tabular Data		
	Steps	End Time [s]
1	1	5,
2	2	600,
*		

Figura IV. 35. Recorte de la tabla de datos donde especifica los tiempos empleados para cada paso. Para determinar estos pasos hay que introducirse en el menú de Analysis Settings e introducir los pasos y tiempos deseados en el submenú de Step Controls.

Para simular los esfuerzos de este caso se aplicará un desplazamiento (*Displacement*) en la cara superior del modelo de probeta y como valor se le pondrá el mismo que se ha aplicado para el ensayo real (0,41 mm).

4.4.1 Resultados:

A) Multilinear Isotropic Hardening (MISO):

i. MISO con tensiones de Cauchy:

Tabla IV. 21. Tabla comparativa de los resultados obtenidos aplicando las tensiones de Cauchy con respecto a los resultados originales:

Comparación de resultados aplicando la corrección de Cauchy		
Solución	Resultado	Valores originales
Total Deformation (mm)	0,41	0,41
Equivalent Elastic Strain (mm/mm)	0,004	0,004
Equivalent Stress (MPa)	11,0	10,9

ii. MISO con tensión original:

Tabla IV. 22. Tabla comparativa de los resultados obtenidos aplicando las tensiones de originales con respecto a los resultados originales de tracción:

Comparación de resultados aplicando los valores originales		
Solución	Resultado	Valores originales
Total Deformation (mm)	0,41	0,41
Equivalent Elastic Strain (mm/mm)	0,004	0,004
Equivalent Stress (MPa)	11,0	10,9

B) Bilinear Isotropic Hardening (BISO):

i. BISO con tensiones de Cauchy:

Tabla IV. 23. Tabla comparativa de los resultados obtenidos aplicando las tensiones de Cauchy con respecto a los resultados originales:

Comparación de resultados aplicando la corrección de Cauchy		
Solución	Resultado	Valores originales
Total Deformation (mm)	0,41	0,41
Equivalent Elastic Strain (mm/mm)	0,004	0,004
Equivalent Stress (MPa)	11,0	10,9

ii. BISO con tensión original:

Tabla IV. 24. Tabla comparativa de los resultados obtenidos aplicando las tensiones de originales con respecto a los resultados originales de tracción:

Comparación de resultados aplicando los valores originales		
Solución	Resultado	Valores originales
Total Deformation (mm)	0,41	0,41
Equivalent Elastic Strain (mm/mm)	0,004	0,004
Equivalent Stress (MPa)	11,0	10,9

4.4.2 Conclusiones parciales:

En el presente apartado se va a mostrar una comparación entre los diferentes endurecedores de material empleados y con el valor original obtenido del ensayo real.

Tabla IV. 25. Tabla comparativa de todos los valores obtenidos de las simulaciones con respecto a los valores obtenidos en los ensayos de tracción a fluencia:

Propiedad	Total Deformation (mm)	Equivalent Elastic Strain (mm/mm)	Equivalent Stress (MPa)
MISO - Original	0,41	0,004	11,0
MISO - Cauchy	0,41	0,004	11,0
Desviación resultados MISO	0,00	0,000	0,00
BISO - Original	0,41	0,004	11,0
BISO - Cauchy	0,41	0,004	11,0
Desviación resultados BISO	0,00	0,000	0,00
Desviación MISO-BISO	0,00	0,000	0,00
Valores originales	0,41	0,004	10,9
Desviación global	0,00	0,000	0,24

Como se puede observar en la Tabla IV. 25, las simulaciones de liberación de tensiones con ambos tipos de propiedades endurecedores del material (BISO y MISO), han dado el mismo valor en el comportamiento de deformación, deformación unitaria y tensiones. En el apartado de las tensiones, sin embargo, este resultado es superior (desviación de 0,24) al valor real obtenido en el ensayo de fluencia. Debido a las características de este ensayo, se aplican deformaciones lejanas a las de deformación permanente y se dependencia del tiempo y la temperatura a la que se encuentre, habría que estudiar detenidamente como podría afectar esta desviación en su aplicación real.

En el Gráfico IV. 22 se puede contrastar los resultados mostrados en la tabla anterior (Tabla IV. 25), donde ya se ha mostrado que los materiales simulados en ANSYS han mostrado un comportamiento idéntico, pero, que difiere del comportamiento real de la muestra ensayada. Comparando los comportamientos, parece que la simulación de ANSYS aplica antes la deformación que, en el caso real, sin embargo, esta diferencia puede ser debido a la inexistencia de un periodo de pre-ajuste o precarga que no se ha valorado en la simulación. También hay que señalar la visible diferencia de comportamiento a deformación constante que se muestra,

ANSYS mantiene el valor constante e inalterable en el tiempo, lo que no es realista y por tanto no está teniendo en cuenta un comportamiento viscoelástico en el material.

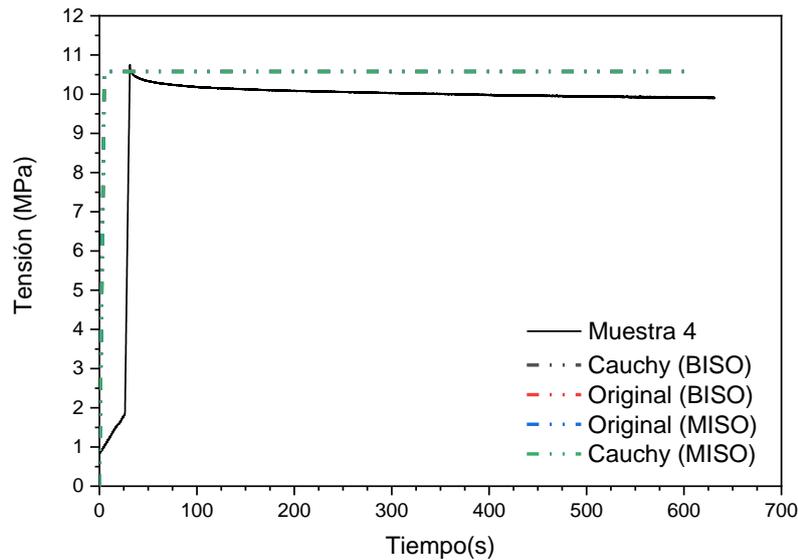


Gráfico IV. 22. Gráfico comparativo del comportamiento real de la muestra a relajación con respecto a la fluencia simulada en ANSYS.

4.5 Caso 4: Contrastación de los resultados:

Hasta el momento se han analizado los datos obtenidos bajo las mismas condiciones a las que se les ha sometido realmente, pero para comprobar si este método y estos valores son válidos y se podrían emplear como propiedades generales del ácido poliláctico ensayado, hace falta contrastarlos. Para contrastar estos valores se van a realizar una serie de simulaciones en condiciones de exigencia diferentes a reales.

Como ya se ha podido comprobar que la diferencia de resultados entre el material definido con las tensiones de Cauchy y las tensiones originales de tracción no difieren de la tensión máxima marcada, para el contraste de datos se emplearán los materiales *Multilinear Isotropic Hardening* y *Bilinear Isotropic Hardening* con los datos obtenidos del equipo de tracción.

4.5.1 Tracción a 2 mm/min:

A) Multilinear Isotropic Hardening (MISO):

Tabla IV. 26. Tabla comparativa de los resultados obtenidos aplicando las tensiones de originales con respecto a los resultados originales de tracción:

Comparación de resultados aplicando los valores originales		
Solución	Resultado	Valores originales
Total Deformation (mm)	4,19	4,19
Equivalent Elastic Strain (mm/mm)	0,007	0,036
Equivalent Stress (MPa)	57,2	53,3

B) Bilinear Isotropic Hardening (BISO):

Tabla IV. 27. Tabla comparativa de los resultados obtenidos aplicando las tensiones de originales con respecto a los resultados originales de tracción:

Comparación de resultados aplicando los valores originales		
Solución	Resultado	Valores originales
Total Deformation (mm)	4,19	4,19
Equivalent Elastic Strain (mm/mm)	0,007	0,036
Equivalent Stress (MPa)	57,0	53,3

4.5.2 Conclusiones parciales:

En el presente apartado se va a mostrar una comparación entre los diferentes endurecedores de material empleados y con el valor original obtenido del ensayo real.

Tabla IV. 28. Tabla comparativa de todos los valores obtenidos de las simulaciones con respecto a los valores reales obtenidos en los ensayos.

Propiedad	Total Deformation (mm)	Equivalent Elastic Strain (mm/mm)	Equivalent Stress (MPa)
Resultados MISO	4,19	0,007	57,2
Resultados BISO	4,19	0,007	57,0
Desviación MISO - BISO	0,00	0,000	0,10
Valores originales	4,19	0,036	53,3
Desviación valores globales	0,00	0,017	2,18

Como se puede observar en la Tabla IV. 28, la deformación obtenida en la simulación es la misma que se ha obtenido en el ensayo real de tracción a 2 mm/min, sin embargo, la deformación unitaria sí que difiere ligeramente, aunque este error, debido a que es bajo, podría deberse a error en la toma de datos del ensayo de tracción real. La diferencia más notable se encuentra en el resultado de tensiones, donde hay una desviación de 2,18 y denota que los materiales creados no son apropiados para la simulación en condiciones diferentes a los ensayados.

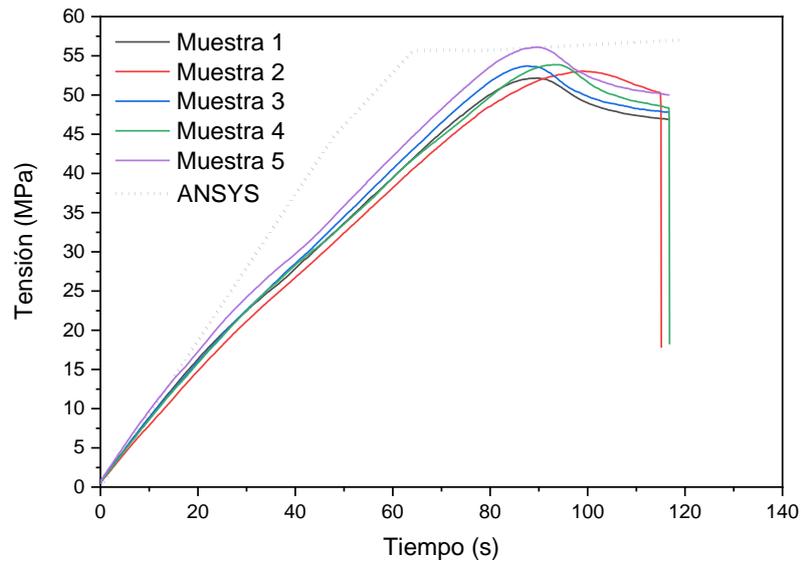


Gráfico IV. 23

En el Gráfico IV. 23 se puede comprobar como el comportamiento que se simula en ANSYS difiere del comportamiento real obtenido en el ensayo de tracción. Al que, en los casos anteriores, esta diferencia de comportamiento puede deberse a una mala definición del material, sobre todo a su parte plástica donde el material empieza a deformarse y a cambiar su sección.

V. CONCLUSIONES

V. CONCLUSIONES

1. CONCLUSIONES

En el presente apartado se van a analizar los resultados obtenidos y la metodología empleada para alcanzar dichos resultados, siempre en base a los objetivos que se marcaron al principio del proyecto.

El objetivo principal del proyecto ha sido estudiar e investigar el comportamiento viscoelástico del PLA, para ello se realizó una revisión bibliográfica a partir de la cual se pudo obtener información acerca de diferentes métodos de cálculo de comportamiento viscoelástico y de diferentes técnicas de ensayo de materiales para conocer dicho comportamiento. De estos métodos de ensayo, por condicionantes del mismo proyecto, se eligió únicamente la caracterización de fluencia mediante tracción uniaxial, técnica que, aunque es bastante empleada, los resultados que se han podido obtener de los ensayos no han sido suficientes para emplear algunos de los modelos de cálculo viscoelásticos existentes. Además, se ha comprobado que el equipo empleado carece de la precisión que exige este tipo de comprobaciones, para solventar este problema, sería necesario poder medir con precisión las deformaciones que se producen en la probeta.

En cuanto a los modelos de cálculo viscoelástico y otras formas de corrección y ajuste de datos experimentales, se ha comprobado mediante las distintas simulaciones realizadas con ANSYS que, al menos los métodos empleados no muestran el ajuste necesario como para considerarlos óptimos. Esto es debido a que, aunque las simulaciones han mostrado unos resultados iguales o bastante próximos a los reales, para conseguir esto hacía falta introducir el tiempo de duración del ensayo real o al menos un tiempo mayor que este. Además, para comprobar la validez de los datos de material introducidos en ANSYS, se ha realizado otra prueba en la que se han simulado condiciones de velocidad diferentes a las que se han aplicado en el ensayo real. A partir de esta prueba se ha podido ver que la solución obtenida en la simulación de contraste de datos se alejaba de los valores experimentales.

Por todo esto, se puede concluir que, a falta de comprobar otros métodos y modelos viscoelásticos más complejos que, por las características y limitaciones del trabajo, no se han podido desarrollar, el software ANSYS Workbench se puede utilizar para la simulación de al menos cierto tipo de polímeros, siempre y cuando, los datos que se tengan del material hayan sido obtenidos en unas condiciones iguales o similares a las que se pretende simular.

VI. REFERENCIAS

IV. REFERENCIAS

1. REFERENCIAS

- [1] ECOPLAS. *Qué es el plástico – Historia* [sitio web] (Recuperado de: <https://ecoplas.org.ar/que-es-el-plastico-historia/>. Consultado el: 4 de junio de 2019).
- [2] Brunet, R. El plástico en nuestras vidas. *Muy interesante* (Recuperado de: <https://www.muyinteresante.es/innovacion/articulo/el-plastico-en-nuestras-vidas-281467114396>. Consultado el: 4 de junio de 2019).
- [3] GREENPEACE. *Datos sobre la producción de plásticos* (Recuperado de: <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos/datos-sobre-la-produccion-de-plasticos/>. Consultado el: 4 de junio de 2019).
- [4] GREENPREACE. *Plásticos* (Recuperado de: <https://es.greenpeace.org>
<https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos/>. Consultado el: 4 de junio de 2019)
- [5] Asociación Española de Industriales de Plástico (ANAIP). *¿Qué son los plásticos?* (Recuperado de: <https://www.anaip.es/los-plasticos/que-es.html>. Consultado el: 4 de junio de 2019).
- [6] Balart Gimeno, R. A. (22 de septiembre de 2011). *Naturaleza de Materiales Poliméricos* (27/93) [Archivo de vídeo]. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=jEwucnZkiBE>
- [7] Balart Gimeno, R. A. (21 de septiembre de 2011). *Clasificación de materiales poliméricos* (28/93) [Archivo de vídeo]. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=vMai5oPAqpQ>
- [8] Llorens Molina, J. A. (22 de septiembre de 2011). *Clasificación de los polímeros* [Archivo de vídeo]. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=6Met4sgCt0A&t=40s>
- [9] Balart Gimeno, J. F. (2017). *Desarrollo y caracterización de WPCs basados en ácido poliláctico (PLA) y refuerzos derivados de la cáscara de avellana* (Tesis doctoral). Universitat Politècnica de València, Alcoy. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10251/85982>.
- [10] European Bioplastics (Recuperado de: <https://www.european-bioplastics.org/news/publications/#BackgroundPapers>). Consultado el: 23 de mayo de 2019)
- [11] Segura González, E. A. (2016). *Diseño, caracterización y comportamiento en servicio de materiales basados en Ácido Poliláctico (PLA) con potencial utilidad en el empaquetado de alimentos* (Tesis doctoral). Universidad Carlos III, Madrid. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10016/23514>
- [12] H. Vink, E. T. et al. (2007). The eco-profiles for current and near-future NatureWorks polylactide (PLA) production. *Spring*, 3(1), p. 58-81 (Recuperado de: http://cms.natureworkslc.com/~media/The_Ingeo_Journey/EcoProfile_LCA/EcoProfile/NTR_Eco_Profile_Industrial_Biotechnology_032007_pdf.pdf)

- [13] Serna C. et al. (2003). Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones. *Universidad del Valle*, 5(1), p. 16-26 (Recuperado de: <https://doi.org/10.25100/iyc.v5i1.2301>)
- [14] Gimeno Balart, R. A. (26 de septiembre de 2011). *Comportamiento Viscoelástico de Materiales Plásticos* (37/93) [Archivo de vídeo]. Recuperado de: https://www.youtube.com/watch?v=HkwwS9sLq7U&list=PL6kQim6ljTJs68kaWApEzRSVAsge-N_CS&index=37
- [15] Balart Gimeno, J. F. et al. (2017). Modelos de viscoelasticidad en green composites de PLA y refuerzo de cáscara de avellana con plastificante natural de aceite de linaza. *AEMAV*, 2(4), p. 135-138 (Recuperado de: <https://revista.aemac.org/materiales-compuestos/article/view/188>)
- [16] Fombuena, V. et al. (2017). Utilidad de los modelos de viscoelasticidad en el aprendizaje de la ingeniería de materiales poliméricos. *MSEL*, 10(1), p. 137-148 (Recuperado de: <https://doi.org/10.4995/msel.2017.6315>)
- [17] Gimeno Balart, R. A. (26 de septiembre de 2011). *Cálculo de Materiales Plásticos a Fluencia* (38/93) [Archivo de vídeo]. Recuperado de: https://www.youtube.com/watch?v=h9Em5oKu7ro&list=PL6kQim6ljTJs68kaWApEzRSVAsge-N_CS&index=38
- [18] Universitat d'Alacant. *La búsqueda de información científica* (Recuperado de: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/33983/1/BUSQUEDA_informacion_DOCTORADO.pdf).
- [19] Arriaga, A et al. (2007). Finite-element analysis of quasi-static characterisation test in thermoplastic materials: Experimental and numerical analysis results correlation with ANSYS. *Polymer Testing* 26, p. 284-305.
- [20] Brocks, W. et al. (2015). *Computational Fracture Mechanics Mechanics* (Technical Report). Politecnico di Milano, Milán. Recuperado de: DOI: 10.13140/RG.2.2.30931.17444)
- [21] AENOR. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales. UNE-EN ISO 527. UNE-EN ISO 527-1:2012. Madrid: AENOR, 2012.
- [22] AENOR. Plásticos. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 2: Condiciones de ensayo de plásticos para moldeo y extrusión. UNE-EN ISO 527. UNE-EN ISO 527-2:2012. Madrid: AENOR, 2012.
- [23] Drozdov, A. D. et al. (2010). Viscoelasticity and viscoplasticity of polypropylene/polyethylene blends. *International Journal of Solids and Structures* (IJSOLSTR) 47, p. 2498-2507 (<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.05.010>)
- [24] UNE-EN ISO 899-1:2018. Plásticos. Determinación del comportamiento en fluencia. Parte 1: Fluencia en tracción.
- [25] ASTM D2990-17. Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics.
- [26] NatureWorks LLC. Ingeo™ Biopolymer 2003D Technical Data Sheet [Ficha Técnica]. Recuperado de: https://www.natureworkslc.com/~media/Technical_Resources/Technical_Data_Sheets/TechnicalDataSheet_2003D_FFP-FSW_.pdf

- [27] Serra Àguila, A. (2013). *Propuestas de nuevos modelos constitutivos para caracterización viscoelástica de materiales termoplásticos* (Tesis doctoral). Universitat Ramon Llull, Barcelona. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10803/127157>)
- [28] Imaoka, S. (2008). Analyzing Viscoelastic Materials. *ANSYS Advantage*, 11(4), p. 46-47 (Recuperado de: <https://www.ansys.com/-/media/ansys/corporate/resourcelibrary/article/aa-v2-i4-analyzing-viscoelastic-materials.pdf>)
- [29] Gutierrez-Lemini, D. (2014). *Engineering Viscoelasticity*, Arlington (Texas), EE. UU.: Springer.
- [30] Balart Gimeno, R. et al. (2001). *Introducción a la ciencia e ingeniería de polímeros*, Alcoy, España.
- [31] Ribes Greus, M. D. (28 de enero de 2016). *Clasificación de los polímeros biodegradables* [Archivo de vídeo]. Recuperado de: https://www.youtube.com/watch?v=_1jLf-e9Yu8&t=5s
- [32] Patil, V. Fundamentals of Material Properties. *Vaftsy CAE Institute*, Knowledge Base Article (ACE 1400). Recuperado de: https://www.vaftsycae.com/knowledge_files/FEA_basics/ACE1400_stress_strain_curve_slip_planes_yeild.pdf
- [33] Simsiriwong, J. et al. (2015). A statistical approach to characterize the viscoelastic creep compliances of a vinyl ester polymer. *Polymer Testing*, 48, p. 183-198. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.10.001>
- [34] Tscharnuter, D. et al. (2012). Modeling of the nonlinear viscoelasticity of polyoxymethylene in tension and compression. *International Journal of Engineering Science (IJENGSCI)*, 60, p. 37-52.