



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ELEMENTOS PARA FABRICACIÓN ADITIVA

Alumno: José Juan Rodríguez Moral

Tutor: Prof. Dr. Fernando Suárez Guerra
Prof. Dr. Luis A. Felipe Sesé

Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Julio, 2018

Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ELEMENTOS PARA FABRICACIÓN ADITIVA

D. FERNANDO SUÁREZ GUERRA y D. LUIS A. FELIPE SESÉ, como tutores del Trabajo Fin de Grado “*SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ELEMENTOS PARA FABRICACIÓN ADITIVA*” presentado por el alumno JOSÉ JUAN RODRÍGUEZ MORAL, dan su visto bueno para la defensa y posterior evaluación del mencionado trabajo en la Escuela Politécnica Superior de Linares.

Linares, JULIO de 2018

RODRÍGUEZ MORAL, JOSÉ JUAN

SUÁREZ GUERRA, FERNANDO
EL TUTOR

FELIPE SESÉ, LUIS ANTONIO
EL TUTOR

Indice

1. Resumen	11
2. Introducción.....	12
2.1. Clasificación de las tecnologías de fabricación aditiva	13
2.1.1. Estereolitografía (SLA).....	14
2.1.2. Sinterizado de láser selectivo (SLS)	14
2.1.3. Polyjet	15
2.1.4. Modelado por deposición de hilo fundido (FDM)	15
2.2. Parámetros principales de impresión para la técnica de deposición de hilo fundido.....	16
2.2.1. Velocidad de impresión.....	16
2.2.2. Temperatura de impresión.....	17
2.2.3. Altura de las capas.....	17
2.2.4. Aditivos empleados	17
2.3. Motivación.....	18
2.4. Objetivos.....	19
3. Fundamentos.....	20
3.1. Método de elementos finitos.....	20
3.1.1. Historia del método de los elementos finitos.....	20
3.1.2. Descripción del método de los elementos finitos	21

3.1.3. Número de nodos y orden de interpolación	22
3.1.4. Campo de desplazamientos.....	22
3.1.5. Tipos de elementos finitos	26
3.1.5.1. Modelo unidimensional.	26
3.1.5.2. Modelo bidimensional	27
3.1.5.3. Modelo tridimensional.....	28
3.2. Comportamiento mecánico del material.....	29
3.3. Comportamiento del material como material compuesto.....	32
3.4. Análisis mecánico de una lámina	34
4. Antecedentes.....	35
4.1. Ensayo experimental.....	36
4.1.1. Materiales empleados	37
4.1.1.1. Ultimaker PLA RAL 9010	37
4.1.1.2. Ultimaker ABS RAL 9003	37
4.1.2. Probetas ensayadas	38
4.1.3. Resultados experimentales	40
4.1.3.1 PLA orientación 0°	41
4.1.3.2 PLA orientación 90°	42
4.1.3.3. ABS orientación 0°	43
4.1.3.4. ABS orientación 90°	44

4.2. Modelo elástico lineal.....	45
4.2.1. Material ortótropo.....	46
4.3. Modelo elastoplástico	47
4.3.1. Regla de endurecimiento	48
4.3.2. Regla de flujo.....	50
4.4. Modelo elastoplástico de Drucker-Prager	51
4.5. Modelo elastoplástico de Von Mises.....	55
4.6. Función potencial de Hill	58
4.7. Modelo de rotura de Hashin	59
4.8. Modelo de rotura de Tsai-Hill	60
4.9. Modelo de rotura de Tsai-Wu.....	60
4.10. Elección de los modelos elastoplástico y de rotura para la caracterización de polímeros ortótropos.....	61
5. Definición del modelo numérico	63
5.1. Diseño de la pieza.....	63
5.2. Propiedades del material.....	65
5.2.1. Material tipo laminar	65
5.2.2. Definición propiedades elásticas	67
5.2.3. Definición propiedades plásticas	69
5.3. Definición del Step utilizado	71

5.4. Interacciones de las mordazas con el resto de la probeta	72
5.5. Aplicación de las cargas	73
5.6. Mallado y tipo de elemento	74
5.7. Ejecución de la simulación	77
6. Interpretación y validación de los resultados de la simulación	79
6.1. PLA orientación 0°	82
6.2. PLA orientación 90°	94
6.3. ABS orientación 0°	98
6.4. ABS orientación 90°	103
7. Conclusiones.....	108
8. Bibliografía.....	110

Índice de Figuras

Figura 2-1 Diseño y construcción de pieza mediante fabricación aditiva [2]	12
Figura 2-2 Ejemplo de diseño de pieza y fabricación aditiva [3].....	13
Figura 2-3 Esquema funcionamiento técnica estereolitografía [27].....	14
Figura 2-4 Esquema técnica Polyjet	15
Figura 2-5 Proceso de fabricación mediante deposición de hilo fundido [1].....	16
Figura 3-1 Elemento lineal con 8 nodos y elemento de segundo orden con 20 nodos [9]..	22
Figura 3-2 función de forma bilineal en elemento rectangular (izquierda) y lineal en elemento triangular (derecha)[4]	23
Figura 3-3 elemento triangular plano [4].....	23
Figura 3-4 Esquema del estado tensorial de elementos triangulares constantes (izquierda) y rectangulares lineales (derecha) [4]	26
Figura 3-5 elemento tipo truss con función de forma lineal (2 nodos) y parabólica (3 nodos) [4]	27
Figura 3-6 de arriba abajo, funciones de forma de los grados de libertad de la flecha y giro en extremo izquierdo, y flecha y giro en extremo derecho [4].....	27
Figura 3-7 Elemento tipo placa y tipo membrana, con 5 y 3 grados de libertad en cada nodo [4]	28
Figura 3-8 Elemento tetraédrico con 4 nodos y 3 grados de libertad en cada nodo [4]	29
Figura 3-9 Esquema de un ensayo de tracción general [13].....	30
Figura 3-10 Esquema curva tensión-deformación [14]	31
Figura 3-11 Materiales compuestos según su estructura (1. Compuesto por matriz y partículas, 2. Compuesto por matriz y fibras continuas unidireccionales, 3. Compuesto por láminas o capas).....	33
Figura 4-1 Bobina de PLA RAL 9010 usada para la fabricación de las probetas [30]	37
Figura 4-2 Bobina de ABS RAL 9003 usada para la fabricación de probetas [30]	38
Figura 4-3 Geometría probetas según la norma UNE-EN ISO 527-2:2012 [31]	38
Figura 4-4 Diagrama tensión-deformación para PLA orientación 0° [30]	41

Figura 4-5 Diagrama tensión-deformación para PLA orientación 90° [30]	42
Figura 4-6 Diagrama tensión-deformación para ABS orientación 0° [30]	43
Figura 4-7 Diagrama tensión-deformación para ABS orientación 90° [30]	44
Figura 4-8 Criterios de plastificación anisótropo (imagen superior) y de Drucker Prager (imagen inferior) [18]	48
Figura 4-9 Ley de endurecimiento isótropo [14]	49
Figura 4-10 Curva tensión-deformación de un metal. Efecto Bauschinger [20]	50
Figura 4-11 Superficies de fluencia para el modelo Drucker-Prager y sus respectivas funciones de fluencia [21]	51
Figura 4-12 Superficie de fluencia del modelo Drucker-Prager en función del parámetro K [21]	53
Figura 4-13 Esquema de la ley de endurecimiento y flujo en el modelo lineal Drucker-Prager [21]	55
Figura 4-14 componentes del estado tensional mostrado como la suma del estado tensional esférico y desviador [22]	56
Figura 4-15 Superficie de fluencia del criterio Von Mises en (a) tres dimensiones y (b) dos dimensiones	58
Figura 5-1 diseño probeta a simular	64
Figura 5-2 modificación de la geometría de la probeta a simular [elaboración propia]	65
Figura 5-3 Sistema de referencia según la norma UNE 116005:2012. [32]	66
Figura 5-4 Parámetros para la definición del material como tipo compuesto	66
Figura 5-5 Captura y ampliación para la orientación del sistema de coordenadas local definido, y orientación de las fibras mediante la indicación Ref 1	67
Figura 5-6 Definición características elásticas	68
Figura 5-7 Definición características para el criterio de rotura	69
Figura 5-8 Modelo de cálculo inicial (izquierda) y con límite de fluencia falseado (derecha) [24]	70
Figura 5-9 calibración del material	70
Figura 5-10 Definición coeficientes para la función potencial	71

Figura 5-11 superficie superior impuesta como sólido rígido	73
Figura 5-12 Definición de la condición de desplazamiento vertical (izquierda) y restricción de todos los grados de libertad (derecha)	74
Figura 5-13 Definición tipo de elemento.....	74
Figura 5-14 Mallado de la probeta de manera progresiva	76
Figura 5-15 Mallado con elementos tipo quad estructurados, con tamaño uniforme (izquierda) y tamaño progresivo según la zona de interés (derecha)	77
Figura 6-1 Disminución del centro de la probeta para concentrar las tensiones en esta zona	80
Figura 6-2 Comportamiento material mediante modelo numérico Drucker-Prager y posterior comparación con resultados experimentales	81
Figura 6-3 Resultados del ensayo para las tensiones equivalentes de Von Mises	83
Figura 6-4 Contorno de deformación plástica para PLA 0°	84
Figura 6-5 Contorno del criterio de rotura Tsai-Hill para PLA 0°	85
Figura 6-6 Utilización de un factor de escalado de la deformación de la probeta	86
Figura 6-7 Comprobación ensayo numérico para el PLA a 0°	87
Figura 6-8 Secuencia 1	88
Figura 6-9 Secuencia 2	88
Figura 6-10 Secuencia 3	89
Figura 6-11 Contorno de tensiones para el incremento de fallo para PLA 0°	90
Figura 6-12 Contorno de deformaciones plásticas para el incremento de fallo para PLA 0°	91
Figura 6-13 Introducción del criterio de rotura a la curva del ensayo numérico, coincidiendo éste con la tensión última del ensayo experimental.....	92
Figura 6-14 Representación del elemento escogido para la creación de la curva tensión-deformación	93
Figura 6-15 Definición Ley potencial para caracterización plástica ortótropa del material	94
Figura 6-16 Secuencia 1	95

Figura 6-17 Secuencia 2	95
Figura 6-18 Contorno de tensiones para el incremento de fallo para PLA 90°	96
Figura 6-19 Contorno de deformaciones plásticas para el incremento de fallo para PLA 90°	96
Figura 6-20 Comparación ensayo numérico y experimental para PLA 90°	97
Figura 6-21 Secuencia 1	99
Figura 6-22 Secuencia 2	99
Figura 6-23 Contorno de tensiones para el incremento de fallo para material ABS orientación 0°	100
Figura 6-24 Contorno de deformaciones plásticas para el incremento de fallo para material ABS orientación 0°	101
Figura 6-25 Comparación ensayo numérico y experimental para ABS 0°	102
Figura 6-26 Secuencia 1	103
Figura 6-27 Secuencia 2	104
Figura 6-28 Contorno de tensiones para el incremento de fallo para material ABS orientación 90°	105
Figura 6-29 Contorno de deformaciones plásticas en el incremento de fallo para material ABS orientación 90°	106
Figura 6-30 Comparación ensayo numérico y experimental para ABS 90°	107

1. RESUMEN

El presente trabajo consiste en la caracterización de dos tipos de materiales mediante técnicas computacionales de simulación, considerando los distintos parámetros que afectan al análisis, y su posterior contrastación con estudios experimentales para validar esta metodología.

Se hará una breve introducción acerca de la fabricación aditiva, de la historia del método de elementos finitos y su funcionamiento, se estudiará teóricamente las características principales de los materiales tipo lámina, indicando su definición y comportamiento, siendo este tipo de material el que posteriormente se simulará.

Se expondrán diversos modelos constitutivos empleados para la caracterización elastoplástica y de rotura, definiéndolos teóricamente e indicando sus particularidades, eligiendo finalmente los modelos más apropiados para las simulaciones que se llevarán a cabo.

Se analizará el comportamiento mecánico del PLA (ácido poliláctico) y el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), muy frecuentes en el ámbito industrial, especialmente en el de la automoción, donde se pretende someter probetas con las características de estos materiales a ensayos de tracción simulados.

Se considerará la ortotropía que define al material, para ello se hará uso de modelos constitutivos que definen esta propiedad y se simularán ensayos con orientaciones de las fibras para cero y noventa grados.

2. INTRODUCCIÓN

La utilización de fabricación aditiva en el ámbito industrial es cada vez más representativa a nivel mundial. Esta tecnología, versión industrial de la impresión 3D, ya se usa para fabricar prototipos de plástico para ingenieros y diseñadores, debido a sus múltiples ventajas, tales como la posibilidad de prescindir de utillajes, proporcionar una rápida reacción de respuesta ante las cambiantes necesidades del mercado, reproducir cualquier geometría que el diseñador pueda imaginar, sin las limitaciones existentes por las técnicas de fabricación en mecanizado, inyección (en polímeros) o fundición (en metales), o capacidad de crear productos con múltiples materiales para proporcionar las propiedades que se deseen. Todo esto, y otra serie de ventajas, hace que esta tecnología abra una nueva puerta hacia una nueva revolución industrial.



Figura 2-1 Diseño y construcción de pieza mediante fabricación aditiva [2]

La fabricación aditiva se basa en la sucesiva superposición de capas de material hasta conseguir el objeto deseado, proporcionando unas propiedades adecuadas para el fin que se quiera dar al producto. Esta tecnología permite obtener las piezas directamente de un archivo CAD 3D, sin intermediarios que definan algunas características de la pieza como pueden ser las caras inclinadas para favorecer el desmoldeado de piezas poliméricas, o el chaflanado de piezas metálicas.

Por otro lado, la agregación del material para formar una capa sólida y la consolidación entre cada capa, y con las próximas a ella, requiere un aporte de energía o de

adhesivo, lo que también es determinante en la calidad final del producto resultante y de sus características mecánicas y, por consiguiente, en el estudio numérico del material.

El material se puede aportar en diferentes estados: sólido en polvo, sólido en varilla o hilo, en lámina de espesor constante, o líquido. El aporte de energía se realiza en forma de calor o de luz ultravioleta. Con calor se puede producir fusión de metales o termoplásticos, o polimerización de ciertos plásticos, mientras que otros materiales son fotosensibles y sufren un proceso de curado y solidificación al someterlos a radiación ultravioleta.

Para que esta tecnología sea funcional, necesita de las herramientas “*CAD (computer aided design)*”, “*CAM (computer aided manufacturing)*” y “*CAE (computer aided engineering)*” orientadas a resolver los problemas que aborda la fabricación aditiva, de modo que estén integradas en el propio proceso de fabricación del producto. Esta última tecnología será la utilizada en el presente trabajo, analizando el comportamiento mecánico de diferentes materiales.



Figura 2-2 Ejemplo de diseño de pieza y fabricación aditiva [3]

2.1. Clasificación de las tecnologías de fabricación aditiva

Según el estado en el que se aporta el material y por la forma en la que se crea o se deposita el mismo para la creación de la pieza deseada, existen diversas tecnologías de fabricación aditiva. Las más representativas son:

2.1.1. Estereolitografía (SLA)

Considerada como la precursora del resto de tecnologías, esta técnica se basa en solidificar resinas en estado líquido y sensibles a la luz ultravioleta mediante un láser, capa a capa. El láser “dibuja” la parte que en cada capa corresponde a sólido sobre la superficie del material líquido contenido en una cuba, de modo que el material no afectado por la luz permanece líquido y el expuesto a la radiación se agrega y solidifica [1].

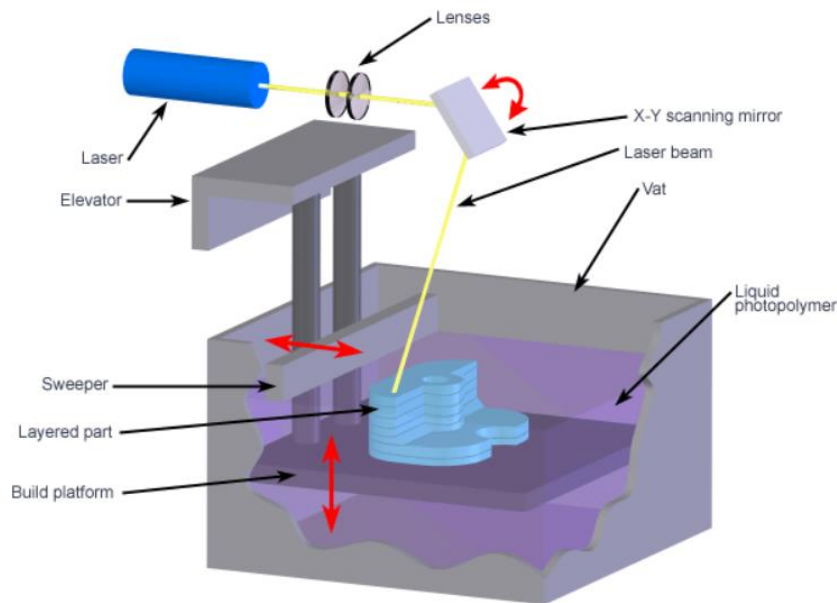


Figura 2-3 Esquema funcionamiento técnica estereolitografía [27]

2.1.2. Sinterizado de láser selectivo (SLS)

En este proceso se aplica una capa de polvo homogénea en una cuba y un láser dibuja las zonas que para esa capa deben ser sólidas, de forma similar a lo descrito en las de estereolitografía. Para mejorar el proceso el material se calienta en la cuba hasta la temperatura de transición, de modo que el láser solamente debe aplicar la energía necesaria para fundir el material (que ya se encuentra polimerizado) y volver a solidificarse.

Se debe tener en cuenta que el proceso debe realizarse en una atmósfera controlada en ausencia de oxígeno [28]

2.1.3. Polyjet

Esta tecnología utiliza resinas líquidas, de formulación propia, de material sensible a la radiación ultravioleta. Los inyectores están situados en un cabezal móvil en X e Y como muestra la Figura 2-4. La deposición se realiza en capas de manera similar a como lo hace una impresora convencional de chorro de tinta, con movimiento del cabezal de izquierda a derecha y sucesivos barridos hasta completar la superficie de trabajo, pero sobre una bandeja de construcción en lugar de sobre un papel.

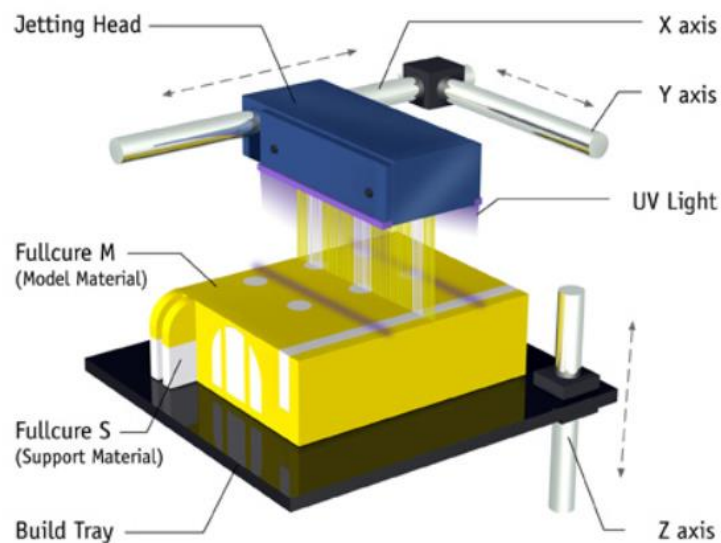


Figura 2-4 Esquema técnica Polyjet

2.1.4. Modelado por deposición de hilo fundido (FDM)

El proceso consiste en calentar y extrusionar un material termoplástico o cera suministrado en hilo a través de una boquilla que va trazando la geometría de la sección transversal de la pieza capa a capa. En la construcción es necesario crear estructuras de soporte, estas estructuras se realizan en un material diferente al de construcción lo cual permite que pueden ser retiradas fácilmente con la mano o incluso disolverse en una solución acuosa.

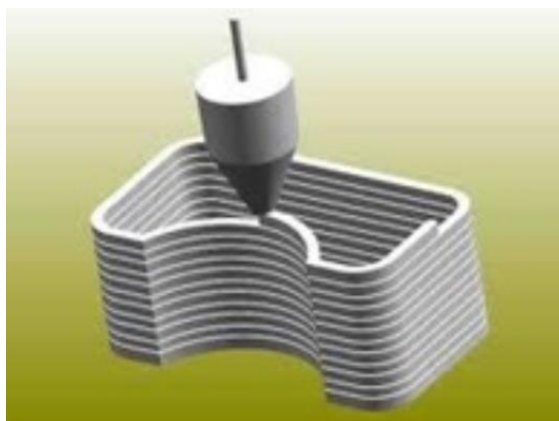


Figura 2-5 Proceso de fabricación mediante deposición de hilo fundido [1]

2.2. Parámetros principales de impresión para la técnica de deposición de hilo fundido

Las características mecánicas de una pieza, tales como la resistencia, acabado superficial, o la densidad final pueden verse afectadas por diversos parámetros cuando se utiliza esta técnica de. Por consiguiente, estos parámetros deben de ser ajustados y controlados en todo el proceso para que el comportamiento de la pieza final sea el deseado desde un principio.

Este amplio número de parámetros modificables conlleva a una difícil predicción de las propiedades mecánicas del objeto a fabricar, y por consiguiente al estudio numérico de los materiales que componen al mismo.

Los principales parámetros a tener en cuenta en el proceso de deposición fundido son los siguientes:

2.2.1. Velocidad de impresión

La velocidad de impresión es aquella a la que se mueve el cabezal de extrusión mientras deposita el filamento fundido en la cama de impresión. Un valor elevado de este parámetro tiene consecuencias tales como vibraciones del cabezal extrusor. Al cambiar de dirección se genera una inercia de la parte móvil, provocando imperfecciones en la pieza o dimensiones finales incorrectas.

La velocidad además puede provocar un exceso de presión en el extrusor. Esta presión puede generar un exceso de material en zonas donde el extrusor se detiene o reduce la velocidad para cambiar de dirección.

Por otro lado, una velocidad de impresión baja elimina todos los defectos mencionados anteriormente, a costa de aumentar el tiempo de fabricación de la pieza significativamente.

2.2.2. Temperatura de impresión

La temperatura cumple una misión trivial en el proceso. Por un lado, la diferencia de temperaturas entre la boquilla de extrusión y el ambiente puede provocar una contracción y solidificación del material antes de tiempo, provocando porosidades y malas uniones entre capas.

Además, el tiempo que existe entre la impresión de dos filamentos contiguos entre sí provoca un enfriamiento desigual, pudiendo aparecer agrietamientos internos, al igual que el tiempo existente entre la impresión de una capa y otra afecta a la adhesividad de éstas entre sí.

La temperatura también afecta al flujo de material, y éste al acabado final de la pieza, así como una baja temperatura provoca que el material no fluya correctamente debido a obstrucciones en el extrusor. Una temperatura elevada puede provocar que el filamento se degrade y pierda propiedades estructurales.

2.2.3. Altura de las capas

El laminado de las capas genera un efecto escalera en el eje vertical en las zonas de la pieza curvas, cuya magnitud dependerá de la altura de la capa. Este es un factor importante en la rugosidad y acabado superficial. A menor altura de capa, menor rugosidad y mejor acabado superficial, pero se incrementará el tiempo de fabricación.

2.2.4. Aditivos empleados

Se considera como material aditivo aquel que va disperso físicamente en la matriz polimérica sin afectar con ello a la estructura molecular. Estos materiales pueden provocar variabilidad en las capacidades y propiedades, tanto mecánicas como térmicas, de los

diferentes polímeros, así como se ven también afectadas la degradación o el envejecimiento del material. [29]

2.3. Motivación

La creciente utilización de esta nueva técnica de fabricación es debida a sus diversas ventajas, sin embargo, trae consigo una serie de desventajas, debidas al desconocimiento y a la novedad. Estas son, entre otras:

- Desconocimiento por parte de los diseñadores industriales, debido a que estos han sido instruidos para concebir piezas que se puedan fabricar por métodos más tradicionales.
- Propiedades anisótropas añadidas a las características de la pieza, dependiente de la dirección de construcción de las capas. Actualmente los programas de simulación y análisis llevan a cabo su estudio bajo la hipótesis de materiales homogéneos, no siendo este el caso para productos fabricados por capas, presentando características diferentes según cada eje de construcción x, y, z. [1]

Esta última idea es la principal precursora de este trabajo, en el que por medio de la herramienta Abaqus de Dassault Systèmes, se estudiarán los modelos constitutivos que están disponibles en este programa para definir las propiedades de cada material a estudiar de la manera más próxima a la realidad, sin la necesidad de recurrir a subrutinas, que es una herramienta que no está al alcance del usuario medio.

Un prototipado mediante simulación numérica debe ser siempre corroborado por estudios experimentales, como es el caso del presente trabajo, ya que lo que representa es una aproximación de la realidad, intentando siempre disminuir el margen de error mediante la modificación de parámetros como el mallado, las propiedades definidas, y otros que se detallarán a lo largo de este trabajo.

En trabajos anteriores se han realizado ensayos experimentales para analizar las características de probetas fabricadas mediante fabricación aditiva de distintos polímeros como el PLA y el ABS, compuestos por láminas superpuestas entre sí con fibras unidimensionales. Se ha estudiado el comportamiento mecánico en un ensayo de tracción

para distintas orientaciones de sus fibras. Además, se hizo uso de una modelización elástica lineal para estudiar computacionalmente el comportamiento de la pieza, quedando limitado a este régimen elástico sin predecir el comportamiento plástico y el criterio de rotura de cada material.

2.4. Objetivos

- Dado el gran impacto que está teniendo la tecnología de fabricación aditiva, se pretende analizar de manera computacional el comportamiento mecánico de dos tipos de materiales poliméricos como son el PLA (ácido poliláctico), utilizado en la industria textil y de empaquetado, y el ABS (acrilo nitrilo butadieno) utilizado, entre otros fines, en la fabricación de piezas para automóviles, conociendo así sus propiedades mecánicas y características técnicas.
- Se estudiarán 3 fases bien diferenciadas entre sí, el régimen elástico del material, el régimen plástico y un criterio de rotura, conociendo y analizando cada ley de comportamiento que interviene en cada régimen de manera teórica.
- Finalmente se realizará una elección de los modelos constitutivos utilizados en la simulación, considerando sus ventajas y diferencias con el resto de modelos. Se analizarán direcciones de impresión a 0 y 90 grados para los dos materiales, considerando así la ortotropía del material, contrastando las simulaciones con los datos de ensayos experimentales y así validar el modelo.

3. FUNDAMENTOS

3.1. Método de elementos finitos

3.1.1. *Historia del método de los elementos finitos*

La historia del método de los elementos finitos (MEF) se inicia en la década de los cincuenta, a partir del surgimiento de la computadora digital que hacía posible el cálculo automático de estructuras de barras sin recurrir a tediosos procedimientos, como el de Cross. Se concibió entonces una nueva técnica de cálculo, que no se podía abordar sin la ayuda de la computación, y fue denominada cálculo matricial de estructuras, en reconocimiento del papel que desempeña el Álgebra matricial en su formalismo matemático. El desarrollo de los elementos finitos tal y como se conocen hoy en día ha estado ligado al cálculo estructural fundamentalmente en el campo aeroespacial [5].

En 1956, con un artículo publicado en la revista *Journal of Aeronautical Science*, Turner, Clough, Martin y Topp presentaban el MEF en la forma aceptada hoy en día [8]. En su trabajo introdujeron la aplicación de elementos finitos simples (barras y placas triangulares con cargas en su plano) al análisis de estructuras aeronáuticas, utilizando los conceptos de discretizado y funciones de forma.

Durante los años sesenta se descubrió que lo que hasta ahora había sido una generalización del cálculo matricial podía utilizarse, no solo para problemas de cálculo de estructuras, sino también para problemas de cualquier otro campo, tales como elasticidad, transmisión de calor, conductividad eléctrica, o transmisión acústica, entre otros. En estos años el MEF tuvo gran auge, demostrando su gran potencia y versatilidad, aunque su empleo estaba muy restringido dentro de la industria aeroespacial y de la defensa, debido al precio de las computadoras de esa época.

Los años setenta es la época de los grandes avances del MEF, tanto en tecnología de elementos como en procedimientos de cálculo y aumento de prestaciones. Además, el número de publicaciones sobre el método creció exponencialmente y el MEF se aplicó progresivamente a problemas cada vez más complejos, como los estudios no lineales.

A finales de los años ochenta el avance fue vertiginoso, con la aparición de las primeras estaciones de trabajo (Workstation), computadoras creadas para un solo cliente, con buenas prestaciones y menor costo.

Desde los noventa hasta el día de hoy la cantidad de computadoras y programas han ido aumentando, haciendo que las herramientas de elementos finitos aumenten de forma considerable [5].

3.1.2. Descripción del método de los elementos finitos

La solución de muchos problemas en el campo de la ingeniería implica la construcción de modelos matemáticos en torno a fenómenos o sistemas físicos dentro de la mecánica del medio continuo, para lo cual es muy frecuente el uso de ecuaciones diferenciales parciales (EDP).

Uno de los principales retos en la ingeniería para la aplicación de dichos modelos consiste en la solución de estas EDP o de sus sistemas. Dada la imposibilidad de plantear soluciones analíticas para muchos de dichos modelos, las soluciones numéricas se muestran como la única posibilidad de materializar dichos modelos en aplicaciones científicas o de ingeniería.

El método de los elementos finitos es un procedimiento numérico que permite resolver problemas de la mecánica del continuo, entre otros, con una aproximación aceptable para la ingeniería [6]. En este procedimiento, el medio continuo se divide en un número finito de subdominios denominados elementos finitos, conectados entre sí por nudos, cuyo comportamiento responde a las ecuaciones de gobierno y a las condiciones de frontera [7].

La solución de un problema en elementos finitos consiste en encontrar los desplazamientos causados por una serie de fuerzas, y a partir de ellos, las deformaciones y tensiones causadas en el sistema analizado. Las propiedades de los elementos que unen a los nodos están dadas por el material asignado al elemento, que a su vez define la rigidez del mismo y la geometría de la estructura a modelizar (a partir de las leyes de la Elasticidad). Las deformaciones y las fuerzas externas se relacionan entre sí mediante la rigidez y las relaciones constitutivas del elemento. Trabajando en régimen elástico, las ecuaciones que definen el sistema pueden expresarse de forma matricial, tal como se muestra en la ecuación (1).

$$\bar{F} = \underline{K} \cdot \bar{u} \quad (1)$$

Donde $\bar{F}$ implica el vector fuerzas, $\underline{K}$ es la matriz de rigidez que define el sistema y $\bar{u}$ el vector desplazamientos.

3.1.3. Número de nodos y orden de interpolación

El modo de funcionamiento en el cálculo por el método de elementos finitos consiste en discretizar el medio continuo en una serie de elementos discretos, pero no se estudia el estado de carga del elemento total conocido hasta ahora, sino que se estudian los estados en los nodos, dispuestos en las esquinas de este, mientras que en el resto del elemento se calcula mediante reglas de interpolación dispuestas previamente.

Estas reglas de interpolación están definidas por las llamadas funciones de forma. Las funciones de forma permiten calcular el valor de cualquier desplazamiento interno por interpolación de los desplazamientos nodales, relacionando los desplazamientos de los nodos con los de las mallas. Estos desplazamientos toman mayor importancia en simulaciones no lineales con gradientes de deformaciones altas.

Las funciones de forma más extendidas son de dos tipos, lineales o de primer orden (definidas por dos nodos en los vértices) y parabólicas o de segundo orden (definidas por dos nodos en los vértices y un nodo intermedio) las cuales se representan en la Figura 3-1.



Figura 3-1 Elemento lineal con 8 nodos y elemento de segundo orden con 20 nodos [9]

3.1.4. Campo de desplazamientos

Como se ha visto en el apartado anterior, los cálculos se definen en los nodos y mediante las funciones de forma se establecen en el resto del elemento, pero dependiendo de si el elemento es de tipo triangular o rectangular las soluciones pueden variar de manera severa. Esto es debido a que un elemento con tres nodos (impuestos en los vértices) el campo

de desplazamientos generado es un plano lineal que pasa por los tres valores nodales del desplazamiento, mientras que en un elemento de cuatro nodos el campo de desplazamientos se rige por una superficie definida por dos polinomios bilineales que pasa por los cuatro valores nodales del mismo como se muestra en la Figura 3-2

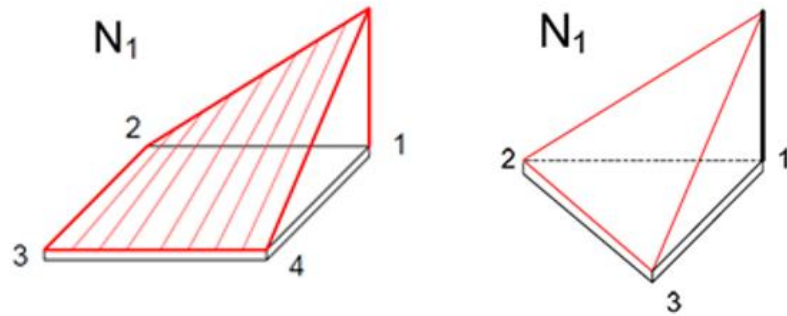


Figura 3-2 función de forma bilineal en elemento rectangular (izquierda) y lineal en elemento triangular (derecha)[4]

Para analizar cómo se comportan ambos elementos se partirá de hipótesis elásticas con el fin de reducir la complejidad del problema y facilitar la explicación de la filosofía del método. Se analizará un caso en el que un elemento triangular es sometido a un estado de tensión plana en régimen elástico. Los desplazamientos nodales quedan definidos en la Figura 3-3:

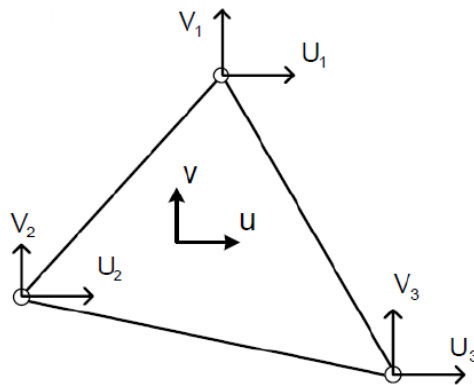


Figura 3-3 elemento triangular plano [4]

Los desplazamientos u y v de un punto cualquiera del interior del elemento en función de los desplazamientos de sus nodos de un elemento triangular se expresan como:

$$u = \sum N_i U_i \quad (2)$$

$$v = \sum N_i V_i \quad (3)$$

$$\bar{u} = N \bar{\delta}^e \quad (4)$$

Donde $\bar{u}$ es el vector de desplazamientos para el interior del elemento y $\bar{\delta}^e$ el vector de desplazamientos nodales del elemento definido en la ecuación XXXX.

$$\bar{\delta}^e = \{U_1 \ V_1 \ U_2 \ V_2 \ U_3 \ V_3\}^T \quad (5)$$

Las deformaciones unitarias en un punto del elemento finito son:

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \partial u \quad (6)$$

Por otro lado, la matriz de funciones de forma queda definida como:

$$N = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Donde N_1, N_2 y N_3 son las funciones de forma en cada nodo. Sustituyendo la ecuación 4 en la ecuación 6 se obtiene:

$$\varepsilon = \partial u = \partial N \bar{\delta}^e = B \bar{\delta}^e \quad (8)$$

Donde B es la derivada de la matriz de función de forma. Esta matriz relaciona los desplazamientos de los nodos con las deformaciones unitarias en un punto cualquiera del

elemento. Por tanto, B representa el campo de deformaciones unitarias que se supone existe en el interior del elemento finito.

Por otro lado, el estado de tensiones en dos dimensiones viene dado por:

$$\bar{\sigma} = D\bar{\varepsilon} \quad (9)$$

Donde para un material elástico lineal e isótropo la matriz elástica D es constante. Su expresión, al ser diferente para tensión y deformación plana, para el primer caso queda definida como sigue:

$$D^{TP} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Para un elemento triangular la matriz N queda definida como muestra la ecuación 7, donde las expresiones N_1, N_2 y N_3 quedan definidas mediante funciones lineales [4]. Por tanto, su derivada, la matriz B queda definida por expresiones constantes que no dependen de las coordenadas x e y . Teniendo en cuenta la ecuación 9, el estado tensional quedará definido en todo el elemento por valores constantes como muestra la Figura 3-4

Siguiendo el mismo razonamiento con la finalidad de comparar el estado tensional de un elemento triangular con uno rectangular, para este último, las expresiones que componen a la matriz N quedan compuestas por funciones cuadráticas, donde al derivarla para obtener la matriz B , las expresiones toman un comportamiento lineal, y teniendo en cuenta la expresión 9, el estado tensorial de cada elemento queda definido como muestra la Figura 3-4.

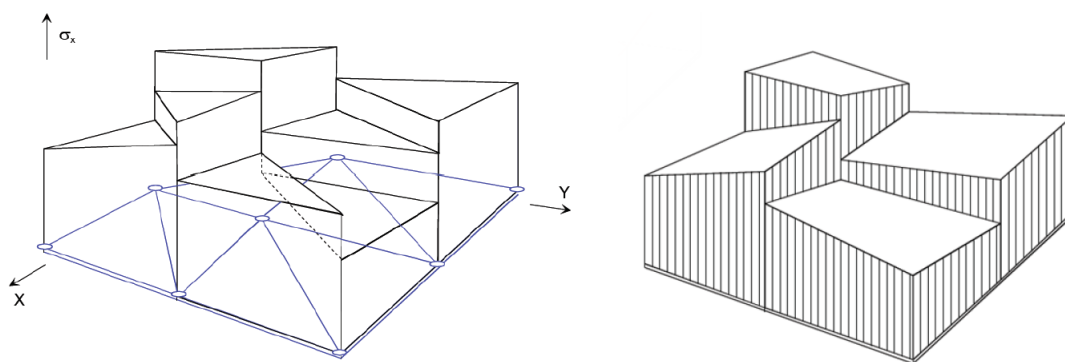


Figura 3-4 Esquema del estado tensorial de elementos triangulares constantes (izquierda) y rectangulares lineales (derecha) [4]

Por tanto, los elementos rectangulares dan mejores resultados al poder interpolar entre los valores nodales de manera lineal, permitiendo que cada nodo que define al elemento pueda tomar un valor de tensiones distinto (Figura 3-4 derecha), mientras que en los elementos triangulares cada elemento queda definido por una tensión constante (Figura 3-4 izquierda).

3.1.5. Tipos de elementos finitos

Los tipos de elementos más comúnmente utilizados en el método de elementos finitos se puede dividir según el dominio en el que se define el problema. Los siguientes casos son los más característicos y más estudiados en el ámbito de elementos finitos.

3.1.5.1. Modelo unidimensional.

En este tipo de modelo se definen los elementos tipo *beam* (viga) y tipo *truss* (barra). El elemento *truss*, es un elemento caracterizado básicamente porque solo puede comportarse como un miembro articulado sometido a fuerzas en dos puntos, las cuales deben estar alineadas con el eje longitudinal del elemento (carga axial). Este tipo de elemento, al igual que solo tienen un tipo de carga, sólo pueden tener desplazamiento en el mismo eje longitudinal, por lo que su grado de libertad es uno. Sus funciones de forma serán como se muestra en la Figura 3-5.

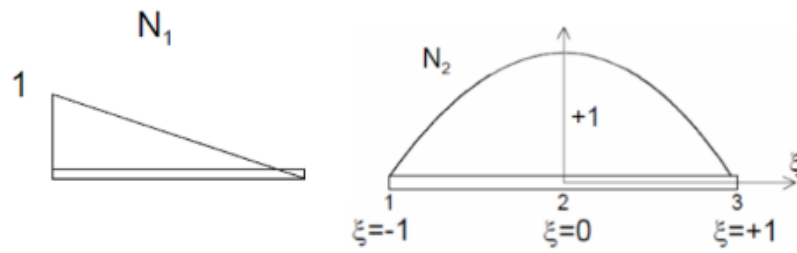


Figura 3-5 elemento tipo truss con función de forma lineal (2 nodos) y parabólica (3 nodos) [4]

Los elementos tipo *beam* se caracterizan por estar sometidos a cargas en dirección transversal y a momentos flectores. Es el tipo de elemento unidimensional más comúnmente usado, tanto en aplicaciones de estructuras, como en uniones mecánicas, sistemas de conductos y tuberías y vigas en puentes. El número de grados de libertad que posee este elemento es de cuatro, tanto el desplazamiento vertical como el giro en cada nodo de sus extremos como se indica en la Figura 3-6.

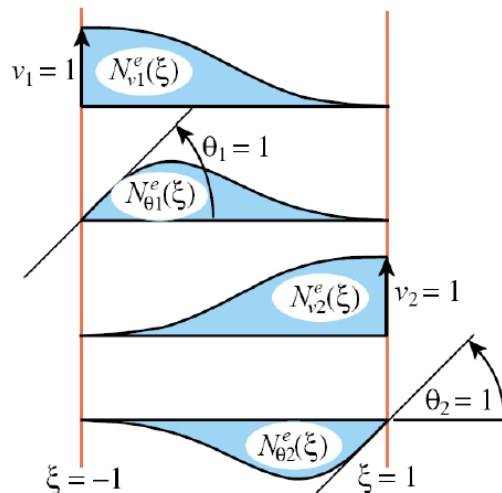


Figura 3-6 de arriba abajo, funciones de forma de los grados de libertad de la flecha y giro en extremo izquierdo, y flecha y giro en extremo derecho [4]

3.1.5.2. Modelo bidimensional

Los modelos bidimensionales se utilizan para reproducir el comportamiento de estructuras en las que una dimensión (espesor), es significativamente inferior al resto de dimensiones. El tipo más popularizado es el elemento tipo Shell, en el que los grados de

libertad se definen mediante los desplazamientos y giros contenidos en el plano en cada uno de sus nodos.

Otro elemento bidimensional es el tipo membrana, definido por tres o cuatro nodos, los cuales tienen dos grados de libertad definidos en el mismo plano. Las diferencias entre ambas radican en el número de grados de libertad disponibles. El tipo membrana, al solo admitir cargas en el mismo plano, es más limitante, pero también permite análisis más rápidos. Se puede apreciar las diferencias de manera visual en la Figura 3-7.

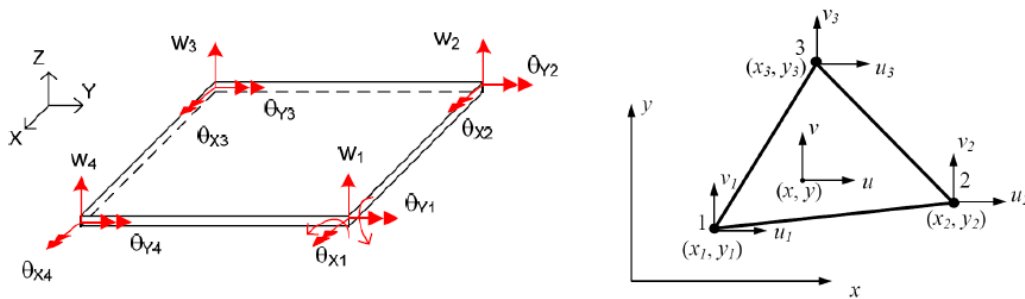


Figura 3-7 Elemento tipo placa y tipo membrana, con 5 y 3 grados de libertad en cada nodo [4]

3.1.5.3. Modelo tridimensional

Los problemas de análisis estructural en tres dimensiones son bastante frecuentes en el campo de la ingeniería, y se presentan sobre todo en elementos que por su proceso de fabricación o sus necesidades funcionales no pueden tener una dimensión mucho menor que las otras dos. El problema tridimensional ocurre en general cuando en una estructura no pueden asumirse las hipótesis de que la tensión en dirección del espesor es nula o simetría axial. El número de grados de libertad es de 3 en cada nodo, siendo estos los desplazamientos en cada eje de coordenadas como se muestra en la Figura 3-8.

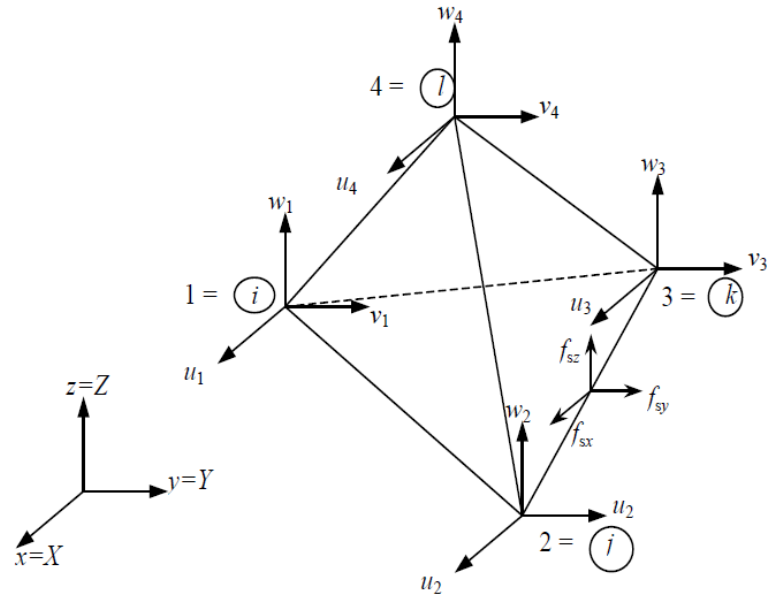


Figura 3-8 Elemento tetraédrico con 4 nodos y 3 grados de libertad en cada nodo [4]

3.2. Comportamiento mecánico del material

La definición de las propiedades mecánicas de un material se ve alterada por muchos factores, tales como la temperatura o la velocidad de aplicación de esfuerzos. Por ejemplo, existen ensayos que permiten determinar cómo evoluciona un material en función del tiempo estando sometido a una carga constante. Este tipo de ensayo se denomina ensayo a fluencia (o creep).

Las características mecánicas de un material más requeridas por parte de un ingeniero suelen ser la resistencia del propio material ante determinadas cargas y la deformación generada ante la misma. Para ello el uso de un ensayo de esfuerzo uniaxial de tracción resulta el más adecuado para este tipo de caracterización. La Figura 3-9 muestra un esquema de este ensayo.

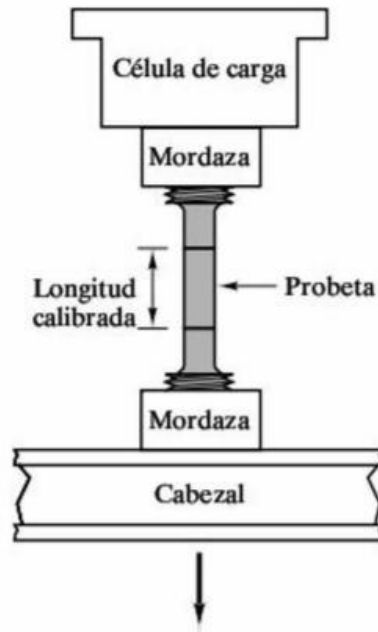


Figura 3-9 Esquema de un ensayo de tracción general [13]

Los ensayos a tracción están normalizados según el material que se aplicará, así como para plásticos se debe seguir la norma UNE-ISO 5893 [35], o para metales UNE-EN ISO 6892 [34].

En la Figura 3-10 se muestra una curva genérica propia de metales dúctiles, ya que este tipo de curvas muestran los distintos estados por los que pasa el material a lo largo del ensayo de la manera más clara, siendo para cada tipo de material distinta. En ella se puede definir la tensión y deformación ingenieril como se muestra en las ecuaciones 11 y 12.

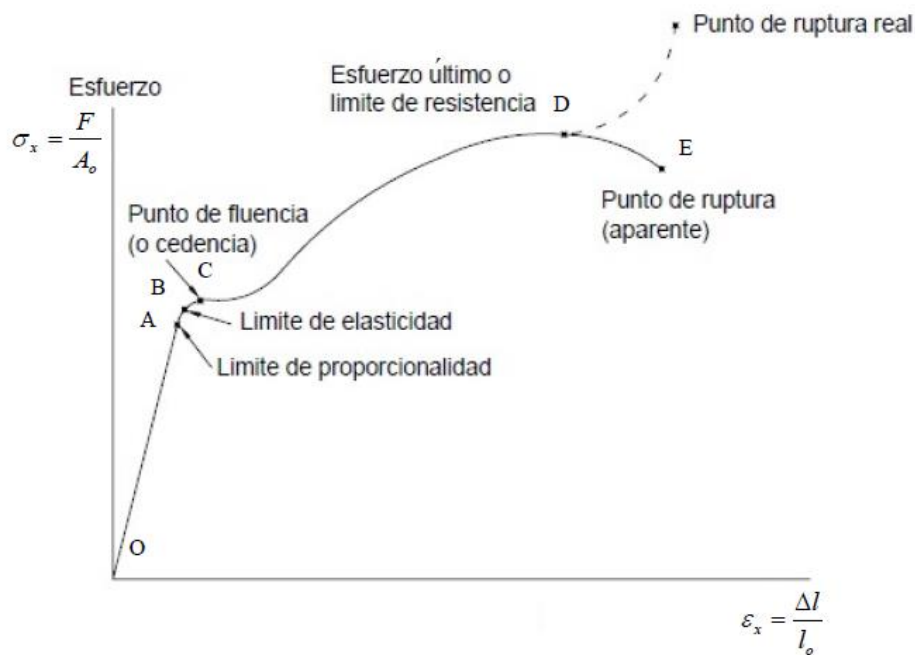


Figura 3-10 Esquema curva tensión-deformación [14]

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (11)$$

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (12)$$

El tramo OA se considera como lineal y muestra una proporcionalidad entre esfuerzo y deformación, conteniendo la parte elástica del material. Aunque en el tramo AB no existe proporcionalidad, el material aún se define como elástico, es decir, si cesara la carga recuperaría su longitud inicial.

El régimen elástico queda definido en este tramo, donde en materiales poliméricos, así como en otros materiales, resulta difícil distinguir el límite de proporcionalidad, límite elástico y límite de fluencia. Por consiguiente, se define una única tensión en esta zona, la tensión de fluencia, como punto representativo de cambio de comportamiento [14].

A partir del punto B el material deja de comportarse como elástico. Las deformaciones que tienen lugar dejan de ser recuperables, debido a que estas deformaciones son consecuencia del deslizamiento de unas partículas con otras. Se considera que el material se comporta con carácter elastoplástico.

A partir del punto C (límite de fluencia, σ_y) la curva tiende a la horizontalidad, como consecuencia de que el material se hace dúctil y fluye a poco que varíe el esfuerzo aplicado. Puede ocurrir que después de dicho punto el material sufra un endurecimiento, implicando un aumento de las cargas para seguir deformando. Este comportamiento se conoce como endurecimiento por fluencia. Finalmente, tras esta última etapa de endurecimiento el material vuelve a comportarse como dúctil, hasta llegar al punto E, instante en el que el material rompe con un esfuerzo de rotura σ_r .

Este tipo de ensayo será el que se pretende simular en el presente trabajo, considerando por separado la parte elástica, parte plástica y, finalmente, el punto de rotura donde la pieza falla.

3.3. Comportamiento del material como material compuesto

La estructura de una pieza construida por fabricación aditiva se dispone mediante capas superpuestas entre sí, compuestas de fibras continuas de plástico fundido apiladas horizontalmente capa por capa. Debido a su estructura, la ley de comportamiento que gobierna a este tipo de material se asemeja al comportamiento de un material compuesto laminado [12].

Los materiales compuestos según su estructura pueden ser:

- Compuestos por matriz y fibras: A partir de fibras continuas cortas o largas, en una, dos o tres direcciones, o bien distribuidas en forma aleatoria aglutinados por una matriz.
- Compuestos por matriz y partículas: formados por partículas que puntualmente trabajan aglutinadas por una matriz.
- Laminares: Compuestos por capas o constituyentes laminares con características de resistencia en magnitud y dirección diferentes.
- Hojuelados: Compuestos por hojuelas planas inmersas en una matriz.

- Relleno barra esqueleto: formado por un esqueleto relleno por otro material.

Los más utilizados son los compuestos por matriz y fibras, donde los más usuales son las fibras dispuestas en láminas, y a su vez clasificado como [16]:

- Lámina unidireccional: Todas las fibras están orientadas en una única dirección. Se considera que en este tipo de lámina existe isotropía transversal (mismas propiedades en todas las direcciones en un plano perpendicular a las fibras)
- Lámina tipo tejido: Todas las fibras están orientadas en dos direcciones perpendiculares entre sí. La urdimbre (fibras longitudinales) está entrelazada con la trama (fibras transversales). El 50% de las fibras puede estar orientada en cada dirección (tejido equilibrado) o puede haber más fibras en una dirección que en otra (tejido no equilibrado). Se considera que existe ortotropía en este tipo de lámina.
- Lámina tipo mat: Está compuesta por fibras cortadas aleatoriamente orientadas. Se considera que existe isotropía en el plano de la lámina.

En la Figura 3-11 se muestran estos tipos de materiales compuestos más usuales.

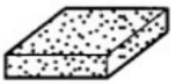
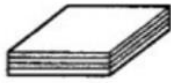
	Estructura	Refuerzo	Propiedades
1.		Partículas	Isotrópico
2.		Fibra continua	Ortotrópico
3.		Láminas o capas	Anisotropía en todo el espesor; isotropía/anisotropía en el plano

Figura 3-11 Materiales compuestos según su estructura (1. Compuesto por matriz y partículas, 2. Compuesto por matriz y fibras continuas unidireccionales, 3. Compuesto por láminas o capas)

3.4. Análisis mecánico de una lámina

Para estudiar el comportamiento mecánico de una lámina, que es la estructura básica de un laminado, dos hipótesis deben de ser consideradas:

- (i) La lámina es continua
- (ii) El comportamiento de la lámina es lineal elástico

El análisis es presentado de dos maneras bien diferenciadas entre sí, mediante el estudio de la micromecánica y de la macromecánica de la lámina. La primera es usada para para estimar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos a partir de las propiedades conocidas de la fibra y de la matriz. El estudio de las interacciones microscópicas entre los elementos constituyentes de una lámina también se denomina micromecánica. Este análisis es utilizado para hallar las constantes ingenieriles del material compuesto bajo las siguientes hipótesis:

- (i) Unión perfecta entre fibra y matriz
- (ii) Las fibras son paralelas y perfectamente distribuidas
- (iii) La matriz está libre de tensiones residuales
- (iv) Tanto la matriz como la fibra son isótropas y obedecen la ley de Hooke
- (v) Las cargas son paralelas y transversales a la dirección de las fibras

La técnica más extendida y sencilla para el estudio de este método es la Ley de las Mezclas [10]. Esta teoría permite estudiar el comportamiento del material compuesto como una combinación de simples materiales componentes cada uno con su modelo constitutivo “base” que satisfacen una ecuación de cierre apropiada.

Por otro lado, el comportamiento macromecánico considera las propiedades mecánicas promedio. Una restricción básica de la teoría es asumir el comportamiento lineal elástico para los materiales tratados. El modelo lineal de comportamiento para una deformación infinitesimal fue introducido por Cauchy (1828) siendo denominada Ley de Hooke generalizada, la cual se definirá más adelante.

4. ANTECEDENTES

Actualmente existen varios enfoques para simular el comportamiento elastoplástico para materiales compuestos, considerándolos como materiales con una marcada ortotropía [11], [15]:

- Hill fue quien formuló el primer criterio de fluencia para materiales anisótropos, extendiendo el criterio de fluencia de Von Mises al caso de materiales ortótropos.
- R. Ali propone que los materiales compuestos pueden considerarse como un conjunto de capas superpuestas cada una con diferentes orientaciones del refuerzo. En el análisis considera que cada lámina presenta un comportamiento ortótropo y supone un comportamiento del material elástico lineal. Simulado mediante elementos de lámina.
- Sun y Chen proponen una función de fluencia cuadrática y una regla de flujo asociada basados en el criterio de Hill para describir el comportamiento plástico anisótropo de materiales compuestos.
- Espinosa et al. extendieron la formulación propuesta por Sun y Chen al campo de grandes deformaciones para simular el comportamiento de materiales compuestos reforzados con tejidos de fibra de vidrio.
- Chen et al. extendieron la función de fluencia propuesta introduciendo el concepto PPR (plastic poisson's ratio).
- O'Donoghue et al. utilizaron la función de fluencia anisótropa propuesta por Hill para describir el comportamiento no lineal de materiales compuestos.
- Voyiadjis y Thiagrajan proponen una superficie de fluencia anisótropa para materiales compuestos reforzados en función de un tensor de cuarto orden. Su implementación en códigos de elementos finitos resulta sencilla tanto en coordenadas locales como globales
- Anderson et al. proponen un modelo para materiales compuestos basado en la teoría de mezclas. Este modelo se utilizó para el estudio de la propagación de ondas en materiales plásticos reforzados con fibras.
- Bibiana M. propone la existencia de dos espacios, uno anisótropo real y uno isótropo ficticio, donde los tensores de tensión en ambos están relacionados mediante un tensor de transformación que tiene en cuenta la anisotropía. El

problema se resuelve en el espacio isótropo ficticio lo cual permite utilizar funciones de fluencia standard desarrolladas para materiales ficticios.

Por otro lado, el fenómeno de delaminación es el mecanismo de fallo típico en los materiales con estructura laminar, responsable de una disminución considerable en la resistencia y rigidez del material. Este fenómeno ha sido modelado utilizando modelos basados en superficies cohesivas [15], los cuales son empleados habitualmente en materiales cuasifrágiles. Para la implementación de estos modelos en elementos finitos hay dos planteamientos diferentes: fisura difusa (*smeared crack*) y fisura discreta (*discrete crack*). El primero consiste en repartir la energía disipada por la rotura modificando las ecuaciones constitutivas. El segundo planteamiento precisa de materializar una discontinuidad en el campo de desplazamientos con el fin de capturar el salto en la fisura, para lo que se modifica la malla del modelo de elementos finitos [36].

- Dugdale y Barenblatt proponen una zona plástica alargada en el borde de una fisura, eliminando la singularidad de tensiones en el fondo de fisura, donde teóricamente la tensión alcanzaría un valor infinito
- Hillerborg generaliza el concepto de Dugdale y Barenblatt, no imponiendo el requisito de la existencia de una zona plástica en el frente de grieta. Por tanto, la grieta solo se propaga cuando la tensión en el borde de grieta alcanza un valor igual a una tensión de decohesión f_t .
- Camacho y Ortiz utilizaron este tipo de modelo basado en superficies cohesivas para simular el avance de fractura en materiales frágiles. Esta ley tiene en cuenta la pérdida de resistencia en función de la apertura de fisura
- Espinoza et al. utilizaron los modelos de zona cohesiva para el estudio del inicio y propagación de fisuras en materiales frágiles.

4.1. Ensayo experimental

En trabajos anteriores se caracterizó el comportamiento de dos materiales poliméricos, como lo son el PLA y el ABS, mediante impresión aditiva utilizando la técnica de deposición de hilo fundido para fabricar probetas para posteriormente realizar un ensayo de tracción uniaxial. La técnica empleada, así como los materiales utilizados son recopilados

del Trabajo Fin de Grado de Fernando Quevedo, de la Escuela Politécnica Superior de Linares.

4.1.1. Materiales empleados

La determinación de los filamentos escogidos para la fabricación de las probetas impresas fue en base a la buena relación entre facilidad de impresión y características mecánicas, así como se tuvo en cuenta la utilización de un color blanco para evitar los efectos de los adhesivos utilizados que determinan esta característica. Se utilizó un tipo de filamento lo más puro y homogéneo posible con un número mínimo de oclusiones de aire en el interior.

4.1.1.1. Ultimaker PLA RAL 9010

Para la impresión del material PLA se utilizó este tipo de filamento, al proporcionar una experiencia de impresión sin complicaciones gracias a su fiabilidad y buena calidad de superficie, con buena resistencia a la tracción y capacidad de trabajar a altas velocidades de impresión y creación de piezas de alta resolución.



<u>Filament specifications</u>	<u>Value</u>
Diameter	2.85±0.10 mm
Max roundness deviation	0.10 mm
Net filament weight	350 g / 750 g
Filament length	~44 m / ~95 m

Figura 4-1 Bobina de PLA RAL 9010 usada para la fabricación de las probetas [30]

4.1.1.2. Ultimaker ABS RAL 9003

En la impresión del ABS se utilizó este tipo de filamento al ser utilizado por una amplia variedad de industrias en todo el mundo y al ser fabricado específicamente para minimizar la deformación y asegurar una adhesión consistente entre capas. Con buenas propiedades mecánicas, estética agradable y adhesión de cama confiable.



Filament specifications

Value

Diameter	2.85 ± 0.10 mm
Max roundness deviation	0.10 mm
Net filament weight	750 g
Filament length	~107 m

Figura 4-2 Bobina de ABS RAL 9003 usada para la fabricación de probetas [30]

4.1.2. Probetas ensayadas

Para la realización del ensayo se llevaron a cabo el uso de probetas normalizadas por la norma UNE-EN ISO 527-2:2012 [31] y UNE 116005:2012 [32], donde se escogió una probeta tipo 1A al ser la más usual. Se puede ver la geometría y dimensiones de la misma en la Figura 4-3 y la Tabla 4-1.

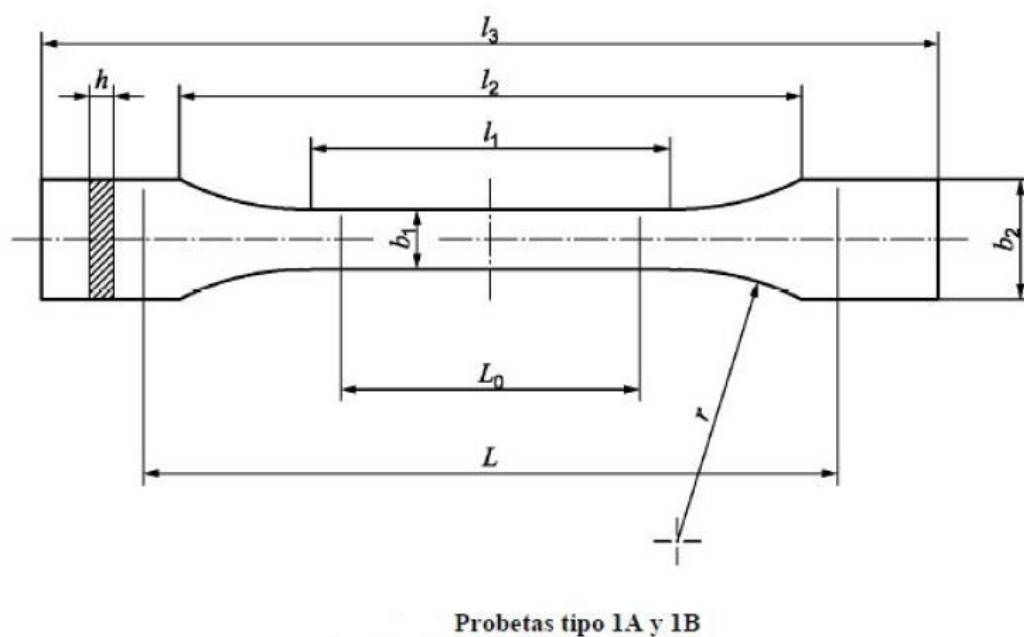


Figura 4-3 Geometría probetas según la norma UNE-EN ISO 527-2:2012 [31]

	Tipo de probetas	1A	1B
l_3	Longitud total ^a	170	≥ 150
l_1	Longitud de la parte estrecha de caras paralelas	80 ± 2	$60,0 \pm 0,5$
r	radio	24 ± 1	$60 \pm 0,5$
l_2	Distancia entre las partes anchas de caras paralelas ^b	$109,3 \pm 3,2$	$108 \pm 1,6$
b_2	Anchura en los extremos	$20,0 \pm 0,2$	
b_1	Anchura de la parte estrecha	$10,0 \pm 0,2$	
h	Espesor recomendado	$4,0 \pm 0,2$	
L_0	Longitud de referencia (recomendada)	$75,0 \pm 0,5$	$50,0 \pm 0,5$
	Longitud de referencia (aceptable si se requiere para el control de calidad o cuando se especifique)	$50,0 \pm 0,5$	
L	Distancia inicial entre las mordazas	115 ± 1	115 ± 1
^a La longitud total recomendada de 170 mm para el tipo 1A concuerda con las Normas ISO 294-1 e ISO 10724-1. Para algunos materiales, puede ser necesario alargar la longitud de los extremos (por ejemplo $l_3 = 200$ mm) para evitar la rotura o el deslizamiento en las mordazas de la máquina de ensayo. ^b $l_2 = l_1 + [4r(b_2 - b_1) - (b_2 - b_1)^2]^{1/2}$, que resulta de l_1 , r , b_1 y b_2 , pero dentro de las tolerancias indicadas.			

Tabla 4-1 Dimensiones de las probetas 1A y 1B según la norma UNE-EN ISO 527-2:2012 [31]

Al realizar los primeros ensayos resultó ser un modelo no válido debido a que estas probetas, al tener una configuración de impresión con orientaciones a 0 y 90 grados, producían unos huecos a lo largo de la curva de transición donde se producía el cambio gradual de sección transversal.

Se prosiguió considerando un diseño de probeta el cual tuviera un radio de curvatura y longitud de probeta mayor evitar este tipo de inconvenientes, pero también fueron descartados.

Como consecuencia se utilizó un tipo de probeta rectangular, utilizada para la caracterización de materiales compuestos, reduciendo (sin eliminar por completo) los problemas anteriores. Se mantuvo el tamaño de la probeta 1A, pero se eliminó el cambio gradual de sección transversal.

Como se verá más adelante, el ensayo numérico no queda influenciado por este tipo de problemas debidos al radio mencionado, siendo éste favorable para eliminar las concentraciones de tensiones en las cercanías de las mordazas.

4.1.3. Resultados experimentales

Los resultados experimentales que se mostrarán a continuación se extraen del Trabajo Final de Grado de Fernando Quevedo [30], donde se muestra el comportamiento de los polímeros PLA y ABS en un ensayo de tracción unidireccional mediante la curva tensión-deformación.

Estos resultados son a partir del ensayo de 5 probetas para cada ensayo, donde los datos finales se obtendrán a partir de la media de los 5 ensayos.

Estos resultados cobran vital importancia, ya que la finalidad del presente trabajo es estudiar los modelos constitutivos que mejor se ajustan a la realidad. Por tanto, se utilizarán como método de comprobación, comparándolos con las simulaciones pertinentes y obteniendo las discusiones necesarias en los siguientes capítulos.

Se muestran las curvas *tensión equivalente-Deformación longitudinal* de la probeta, donde en el ensayo numérico se toma como referencia la deformación total en el plano principal, siendo el error mínimo ya que las deformaciones en el eje transversal son despreciables respecto a las longitudinales.

4.1.3.1 PLA orientación 0°

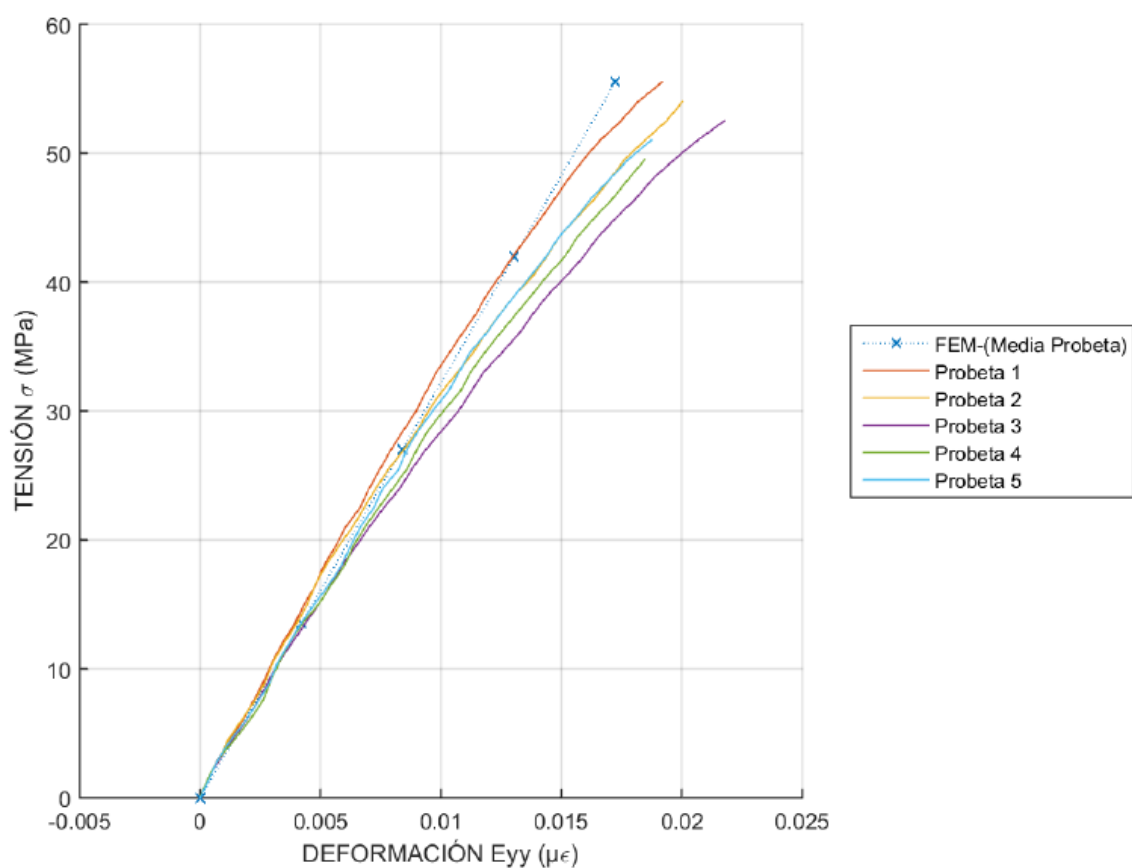


Figura 4-4 Diagrama tensión-deformación para PLA orientación 0° [30]

RESULTADOS MEDIOS DIC PLA ORIENTACIÓN DE FIBRA LONGITUDINAL 0°						
Módulo de Young (E_{11}) (MPa)	D. Típica Módulo de Young	C. de Poisson Principal (ν_{xy})	D. Típica C. de Poisson	Módulo de Cortadura (G) (MPa)	Tensión Máxima (σ_{max}) (MPa)	Tensión de Fractura (σ_f) (MPa)
3218,6	188,55	0,3483	0,0426	1193,6	52,51	52,51

Tabla 4-2 Propiedades PLA orientación 0° [30]

4.1.3.2 PLA orientación 90°

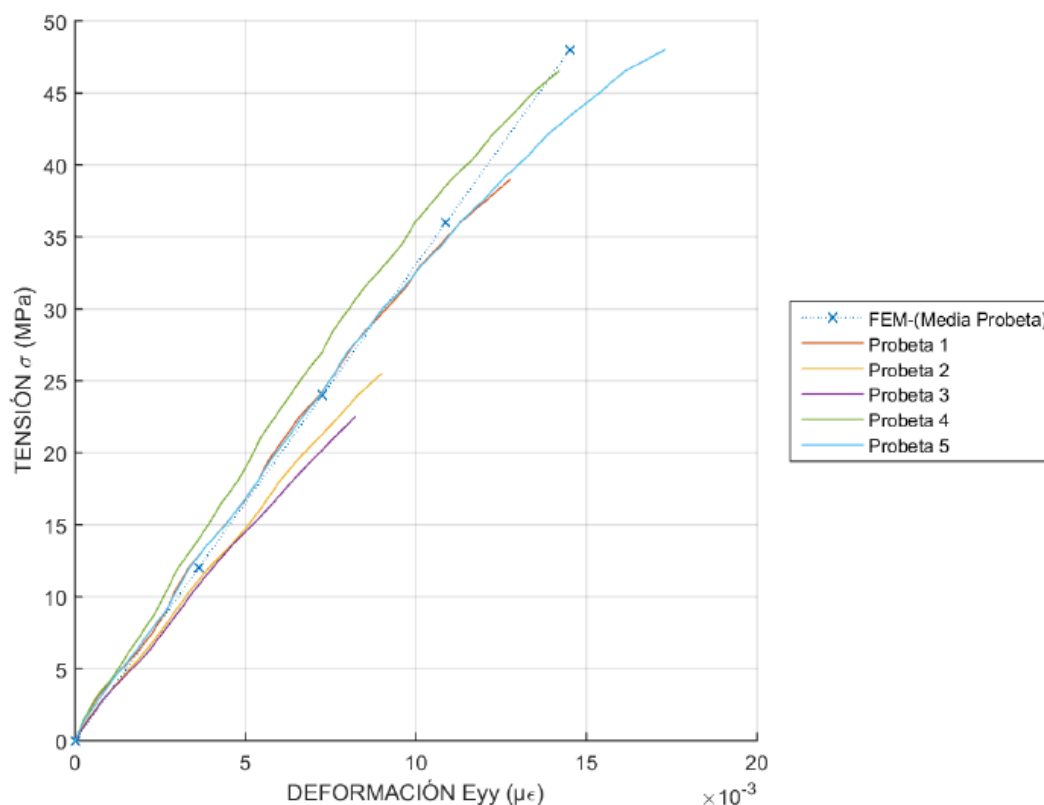


Figura 4-5 Diagrama tensión-deformación para PLA orientación 90° [30]

En este caso se observa cómo las probetas toman criterios de rotura bastante dispares, esto es debido a que en la impresión de las probetas quedaron huecos internos, así como defectos que provocaron una rotura distinta. Este defecto será considerado más adelante en la simulación.

RESULTADOS MEDIOS DIC PLA ORIENTACIÓN DE FIBRA TRANSVERSAL 90°						
Módulo de Young (E_{11}) (MPa)	D. Típica Módulo de Young	C. de Poisson Principal (ν_{xy})	D. Típica C. de Poisson	Módulo de Cortadura (G) (MPa)	Tensión Máxima (σ_{max}) (MPa)	Tensión de Fractura (σ_i) (MPa)
3306,8	396,8936	0,3370	0,0441	1234,66	36,309	36,309

Tabla 4-3 Propiedades PLA orientación 90° [30]

4.1.3.3. ABS orientación 0°

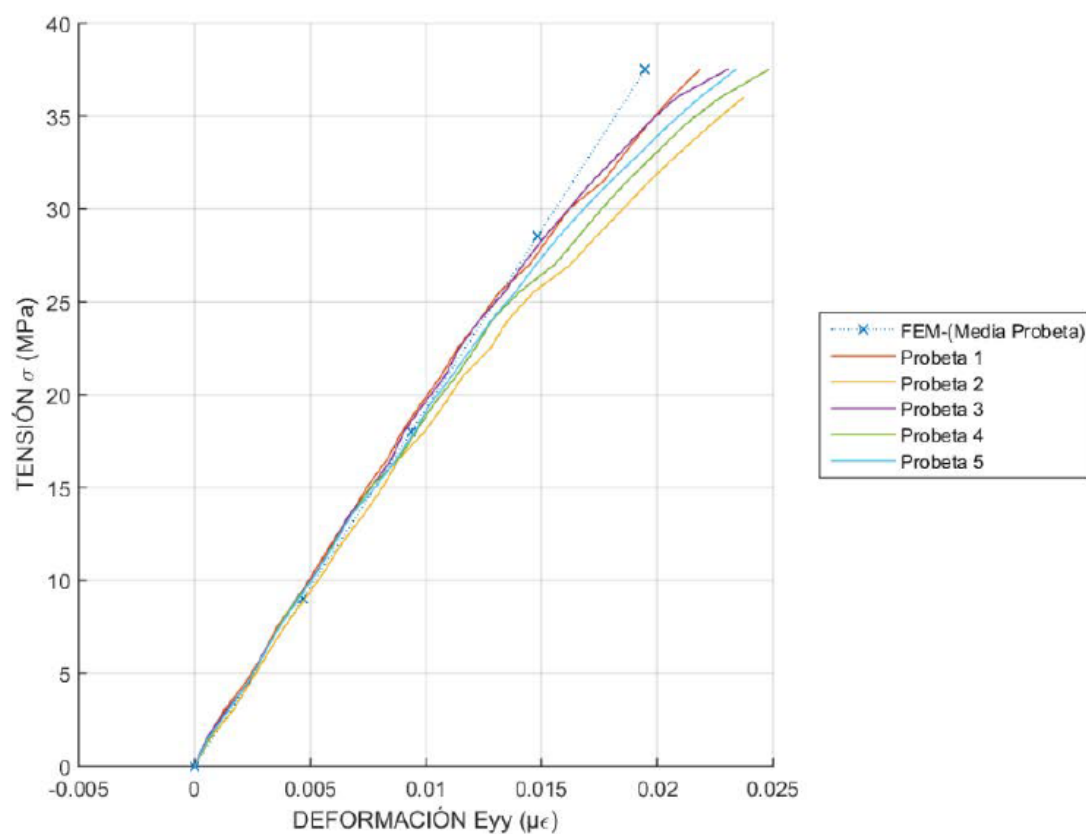


Figura 4-6 Diagrama tensión-deformación para ABS orientación 0° [30]

RESULTADOS MEDIOS DIC ABS ORIENTACIÓN DE FIBRA LONGITUDINAL 0°						
Módulo de Young (E_{11}) (MPa)	D. Típica Módulo de Young	C. de Poisson Principal (ν_{xy})	D. Típica C. de Poisson	Módulo de Cortadura (G) (MPa)	Tensión Máxima (σ_{max}) (MPa)	Tensión de Fractura (σ_f) (MPa)
1924,6	69,0667	0,3768	0,034	699,07004	37,40404	31,75

Tabla 4-4 Propiedades ABS orientación 0° [30]

4.1.3.4. ABS orientación 90°

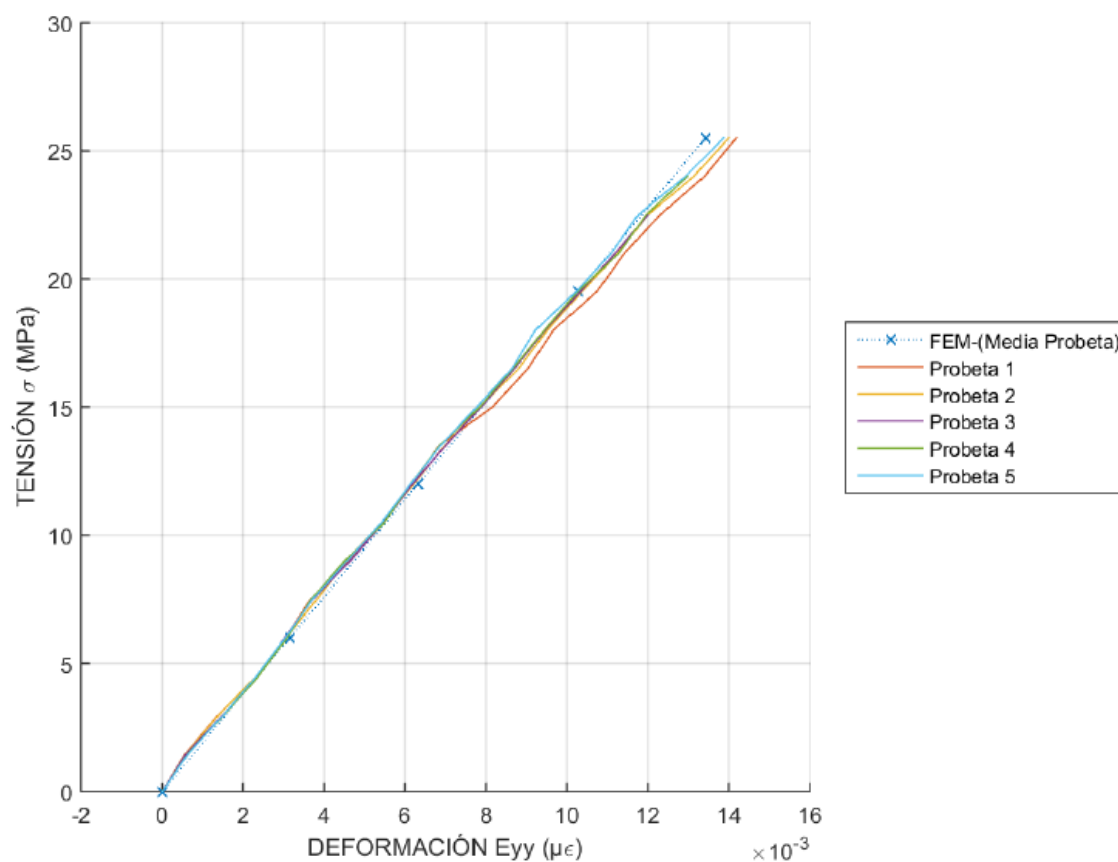


Figura 4-7 Diagrama tensión-deformación para ABS orientación 90° [30]

RESULTADOS MEDIOS DIC ABS ORIENTACIÓN DE FIBRA TRANSVERSAL 90°						
Módulo de Young (E_{11}) (MPa)	D. Típica Módulo de Young	C. de Poisson Principal (ν_{xy})	D. Típica C. de Poisson	Módulo de Cortadura (G) (MPa)	Tensión Máxima (σ_{max}) (MPa)	Tensión de Fractura (σ_f) (MPa)
1899,6	21,3634	0,3711	0,0311	692,91206	24,98372	24,98372

Tabla 4-5 Propiedades ABS orientación 90° [30]

4.2. Modelo elástico lineal

El modelo elástico lineal fue introducido por Cauchy siendo denominada Ley de Hooke generalizada para un sólido elástico lineal, homogéneo e isótropo, definida en la ecuación 13 [17].

$$\sigma_i = C_{ij} \cdot \varepsilon_j \quad (13)$$

Donde C_{ij} es el tensor de rigidez del material. En forma matricial, la ecuación queda definida por un tensor de rigidez con 36 componentes.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Al ser la matriz $[C]$ simétrica, el tensor de rigidez queda reducido a 21 constantes:

$$C_{anisotropo} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ \dots & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ \dots & & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ & & & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ & SIM & & & c_{55} & c_{56} \\ & & & & & c_{66} \end{bmatrix} \quad (15)$$

En un material isótropo, definido por tener el mismo comportamiento mecánico para cualquier dirección del espacio, la matriz de rigidez presenta solo 3 constantes:

$$C_{isotropo} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \dots & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \dots & & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & c_{44} & 0 & 0 \\ & SIM & & & c_{44} & 0 \\ & & & & & c_{44} \end{bmatrix} \quad (16)$$

4.2.1. Material ortótropo

En el caso de un material ortótropo, la matriz de rigidez tiene un total de 9 constantes.

$$C_{ortotropo} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \dots & c_{11} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ \dots & & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & c_{44} & 0 & 0 \\ & SIM & & & c_{55} & 0 \\ & & & & & c_{66} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Los coeficientes elásticos de la ecuación 17 se relacionan con las constantes ingenieriles E_i , G_{ij} , y ν_{ij} mediante:

$$\begin{aligned} c_{11} &= \frac{E_1(1 - \nu_{23} \nu_{32})}{\Delta} \\ c_{22} &= \frac{E_2(1 - \nu_{13} \nu_{31})}{\Delta} \\ c_{33} &= \frac{E_3(1 - \nu_{12} \nu_{21})}{\Delta} \\ c_{12} &= \frac{E_1(\nu_{21} - \nu_{31} \nu_{23})}{\Delta} \\ c_{13} &= \frac{E_1(\nu_{31} - \nu_{21} \nu_{32})}{\Delta} \\ c_{23} &= \frac{E_2(\nu_{32} - \nu_{12} \nu_{31})}{\Delta} \end{aligned} \quad (18)$$

$$c_{44} = G_{23} ; c_{55} = G_{13} ; c_{66} = G_{12}$$

$$\Delta = 1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}$$

Donde G es el módulo elástico tangencial o cortante:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (19)$$

4.3. Modelo elastoplástico

La teoría de la plasticidad establece relaciones matemáticas que caracterizan la respuesta elastoplástica de los materiales. En ese contexto, hay tres factores fundamentales: el criterio de plastificación, la regla de flujo y la regla de endurecimiento del material.

El criterio de plastificación indica el estado tensorial para el que se produce plastificación. En estados de más de una dimensión, el criterio se representa mediante una función de las componentes individuales $f(\sigma)$, que puede ser interpretada como una tensión equivalente σ_{eq} .

$$\sigma_{eq} = f(\sigma) \quad (20)$$

Cuando la tensión equivalente es igual al límite elástico del material el punto comenzará a desarrollar deformación plástica, tal como se muestra en la ecuación 21:

$$\sigma_{eq} = \sigma_y(k) \quad (21)$$

Si σ_{eq} es menor que σ_y el material trabaja en régimen elástico y no sufre deformación plástica. En la ecuación 21, k es el trabajo plástico (parámetro de endurecimiento).

La ecuación 21 puede ser representada en el espacio de tensiones como muestra la Figura 4-8 para varios tipos de plastificación.

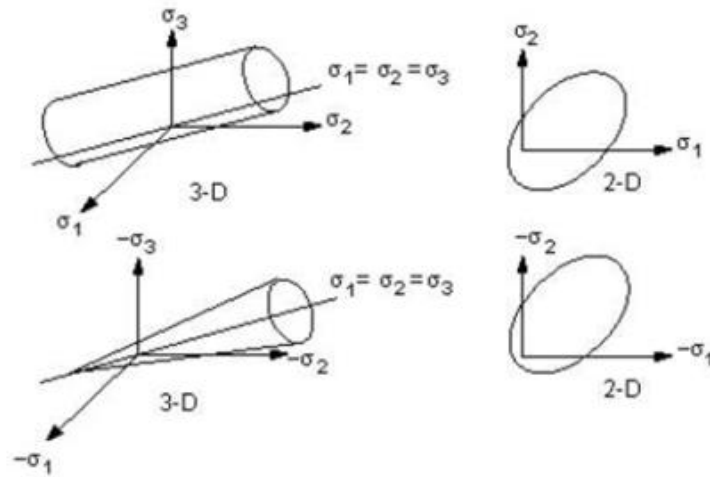


Figura 4-8 Criterios de plastificación anisótropo (imagen superior) y de Drucker Prager (imagen inferior) [18]

Las superficies representadas en la Figura 4-8 son conocidas como superficies de plastificación, donde cualquier estado tensorial dentro de las mismas es elástico, es decir, no produce deformaciones plásticas, produciéndose éstas cuando el estado tensorial toca la superficie.

A continuación, se detallan varias definiciones que son importantes dentro del campo de la plasticidad.

4.3.1. Regla de endurecimiento

La regla de endurecimiento describe las modificaciones que sufre la superficie de plastificación con las deformaciones plásticas, con el fin de que las condiciones para plastificación subsecuentes puedan ser establecidas. En definitiva, define cómo progresa la plastificación.

Según Wulfsohn y Adams (2002), la ley de endurecimiento es una función que describe el cambio de tamaño y posición de la superficie de fluencia en el espacio de la tensión [18].

Existen dos tipos de endurecimiento, el isótropo y el cinemático, donde en el primero la superficie de fluencia resulta centrada respecto a su generatriz ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) y se expande de igual forma en todos los puntos conforme se desarrolla el comportamiento

plástico, aumentando esta superficie de tamaño sin desplazarse como se muestra en la Figura 4-9.

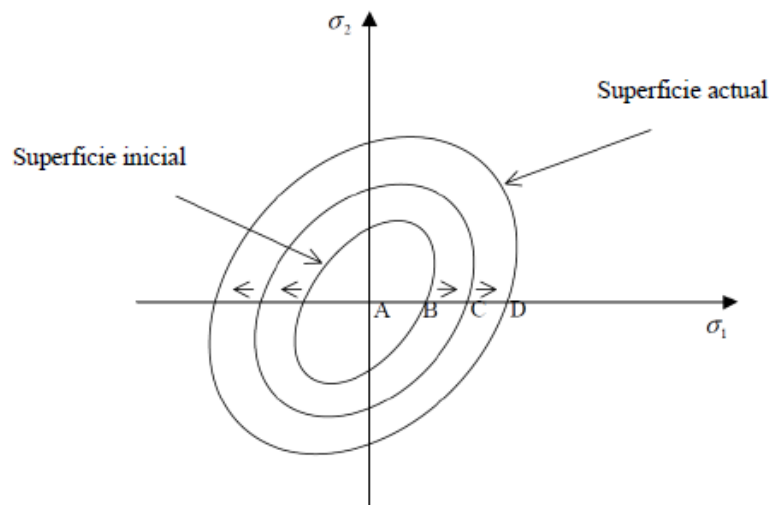


Figura 4-9 Ley de endurecimiento isótropo [14]

Por otro lado, el endurecimiento cinemático contempla el siguiente fenómeno: en algunos materiales es posible observar que la deformación plástica generada por una carga, al cesar ésta, aumenta el límite elástico en la dirección de la sollicitación, disminuyéndolo en la dirección contraria. Este fenómeno es conocido como efecto Bauschinger [20]. Esto provoca un desplazamiento de la superficie de fluencia sin cambiar el tamaño. Como ejemplo se muestra el estado que provoca este efecto sobre la curva tensión-deformación de un metal en la Figura 4-10.

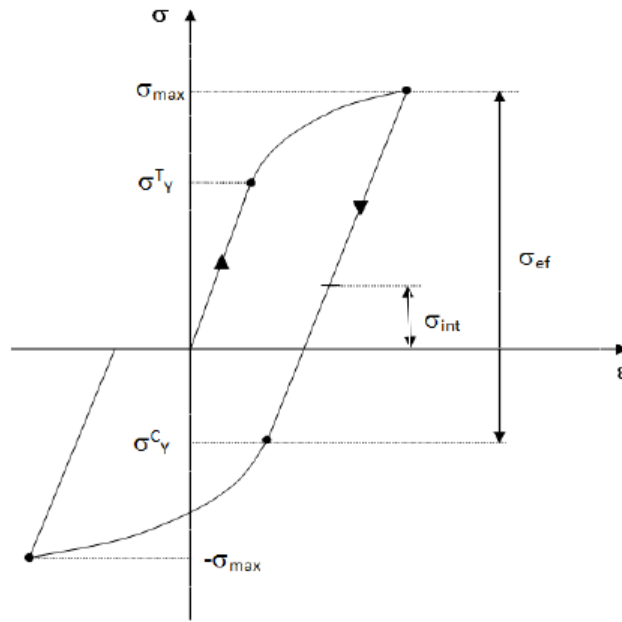


Figura 4-10 Curva tensión-deformación de un metal. Efecto Bauschinger [20]

Mientras que el comportamiento de los metales se ajusta mejor mediante la ley de endurecimiento cinemático, el caso de los polímeros responde de forma correcta a una ley de endurecimiento isótropa [14].

4.3.2. Regla de flujo

La regla de flujo indica la dirección del comportamiento plástico, es decir, define la relación entre los incrementos de deformación plástica, el estado actual de tensión y los incrementos de tensión durante el proceso de plastificación. Analíticamente puede expresarse como:

$$d\varepsilon^p = \lambda_p \cdot \frac{dG}{d\sigma} \quad (22)$$

Donde λ_p es el multiplicador plástico o factor de proporcionalidad y G es la función de potencial plástico, cuyo gradiente determina la dirección de plastificación.

Habitualmente se asume que la función G es la propia función de plastificación, por lo que la regla de flujo se denomina asociada, y las deformaciones plásticas suceden en la dirección normal a la superficie de plastificación. Para el tipo no-asociado, se supone que el

incremento de deformación plástica es perpendicular a la superficie que define potencial plástico.

4.4. Modelo elastoplástico de Drucker-Prager

Este modelo constitutivo es esencialmente un modelo de plasticidad dependiente de la presión que históricamente ha sido popular en el campo de la ingeniería geotécnica. Sin embargo, más recientemente se ha comprobado que el modelo es también de utilidad para reproducir el comportamiento de diversos tipos de polímeros y materiales compuestos que presentan una marcada diferencia entre el comportamiento de deformación plástica en tracción y compresión [21].

El modelo considera que la deformación total del elemento es debida, en parte a una deformación elástica y recuperable, estudiada mediante el modelo elástico lineal de Hooke (estudiado anteriormente), y una deformación plástica irrecuperable y permanente, tal y como se muestra en la ecuación 23.

$$d\varepsilon = d\varepsilon^e + d\varepsilon^p \quad (23)$$

El modelo toma tres criterios de fluencia, diferenciados entre sí por la forma de la superficie de fluencia en el plano meridional, tomando esta superficie una forma lineal, hiperbólica o exponencial, tal y como se muestra en la Figura 4-11.

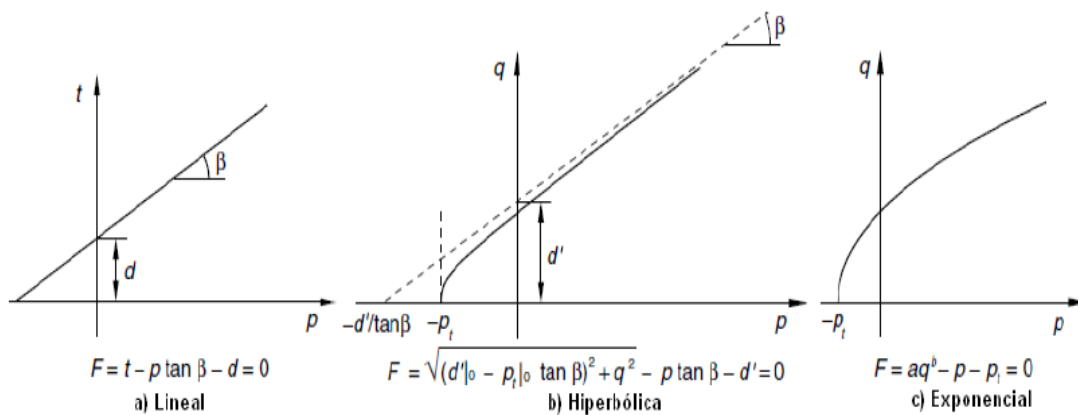


Figura 4-11 Superficies de fluencia para el modelo Drucker-Prager y sus respectivas funciones de fluencia [21]

La selección de la forma de la superficie de fluencia a utilizar vendrá en función del análisis a realizar, del tipo de material, de los datos de entrada posibles, así como, de los valores de presión y tensión del material.

El caso más general es el modelo lineal, donde el criterio de fluencia queda definido por la siguiente ecuación:

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = t - p \tan \beta - d = 0 \quad (24)$$

El material comienza a plastificar cuando se cumple la anterior igualdad, siendo t el esfuerzo desviador, p la tensión equivalente que actúa sobre el elemento, β el ángulo de fricción interna del material y d el coeficiente de cohesión.

Estos términos, considerando un caso de tracción uniaxial para el presente estudio pueden ser obtenidos mediante las siguientes expresiones:

$$t = \frac{1}{2} q \left[1 + \frac{1}{k} - \left(1 - \frac{1}{k} \right) \left(\frac{r}{q} \right)^3 \right] \quad (25)$$

En la ecuación 25 el término $K(\theta, f^\alpha)$ es un parámetro del material, función de θ (temperatura) y f^α (variables de campo predefinidas) que queda definido en el dominio $0.778 < K < 1.0$. Esta función es usada porque permite diferenciar los diferentes valores en tracción y compresión en el plano desviador, tal y como se muestra en la Figura 4-12. Por tanto, proporciona flexibilidad en el ajuste de los resultados experimentales cuando el material exhibe diferentes valores de rendimiento en pruebas triaxiales de tracción y compresión.

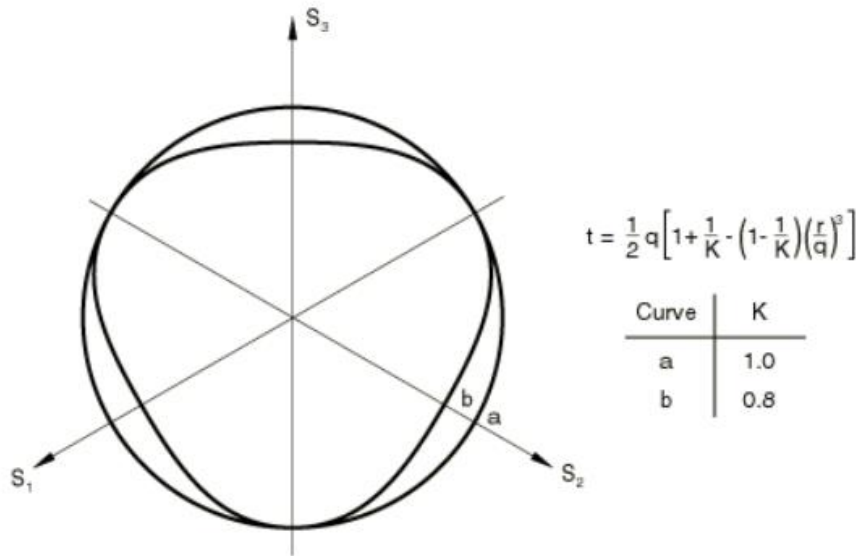


Figura 4-12 Superficie de fluencia del modelo Drucker-Prager en función del parámetro K [21]

Cuando $K = 1$, entonces $t = q$, lo cual implica que la superficie de fluencia es el círculo de Von Mises representado en el plano de las tensiones desviadoras (Figura 4-12, curva a)

Además, $(r/q)^3$ en tracción uniaxial queda definido como 1, por lo que la anterior expresión se simplifica de la forma:

$$t = \frac{q}{K} \quad (26)$$

Donde queda por definir el parámetro q , correspondiente a la tensión equivalente según el criterio de Tresca mediante la siguiente expresión:

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (27)$$

Por otro lado, el término p corresponde a la tensión hidrostática y queda definido como:

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (28)$$

Las tensiones mencionadas σ_1 y σ_3 en las ecuaciones 27 y 28 se obtienen mediante un test triaxial experimental.

El coeficiente de cohesión para tracción uniaxial se puede obtener en función del ángulo de fricción interna del material y del límite de fluencia a tracción σ_t

$$d = \left(1 - \frac{1}{3}\tan(\beta)\right)\sigma_t \quad (29)$$

La ley de endurecimiento impuesta en el modelo implica que la superficie de fluencia se aleje cada vez más del eje de abscisas, tal y como se muestra en la Figura 4-13

La ley de flujo que proporciona la evolución de la deformación plástica es no asociada, la plastificación no fluye en dirección perpendicular a la superficie como se muestra en la Figura 4-13, quedando definida mediante la siguiente expresión:

$$d\varepsilon^p = \frac{d\bar{\varepsilon}^p}{c} \frac{\partial G}{\partial \sigma} \quad (30)$$

Donde en tracción axial:

$$d\bar{\varepsilon}^p = d\varepsilon_{11}^p \quad (31)$$

$$c = \frac{1}{K} + \frac{1}{3}\tan(\psi) \quad (32)$$

Siendo ψ el ángulo de dilatancia en el plano p-t.

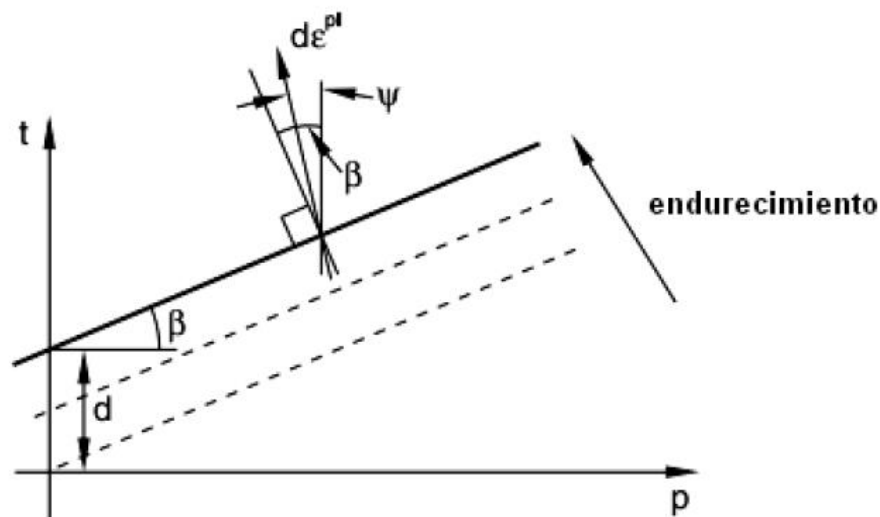


Figura 4-13 Esquema de la ley de endurecimiento y flujo en el modelo lineal Drucker-Prager [21]

Cuando el ángulo de dilatancia coincide con el ángulo de fricción, el flujo tendrá dirección perpendicular a la superficie de fluencia, considerándose la regla de flujo asociada.

4.5. Modelo elastoplástico de Von Mises

El modelo constitutivo elastoplástico de Von Mises está diseñado para definir la superficie de fluencia isótropa de un material, por lo que la anisotropía presente en este estudio será definida a partir de una función potencial de Hill, partiendo del modelo de Von Mises y extendiéndolo para materiales anisótropos.

Este modelo, denominado también como energía de distorsión de Von Mises, es el fruto de trabajos analíticos de Huber y Henchy y expresa que el estado límite en un punto de un cuerpo en el que existe un estado tensional cualquiera comienza cuando la energía de distorsión por unidad de volumen en un entorno de dicho punto es igual a la energía de distorsión absorbida por unidad de volumen cuando el material alcanza la tensión límite en el ensayo a tracción [22].

La energía de deformación por unidad de volumen se puede descomponer en dos partes, una de ellas debida al cambio de volumen (definida por el tensor esférico) y otra

vinculada a la distorsión o cambio de forma (definida por el tensor desviador). Un esquema de lo explicado se muestra en la Figura 4-14.

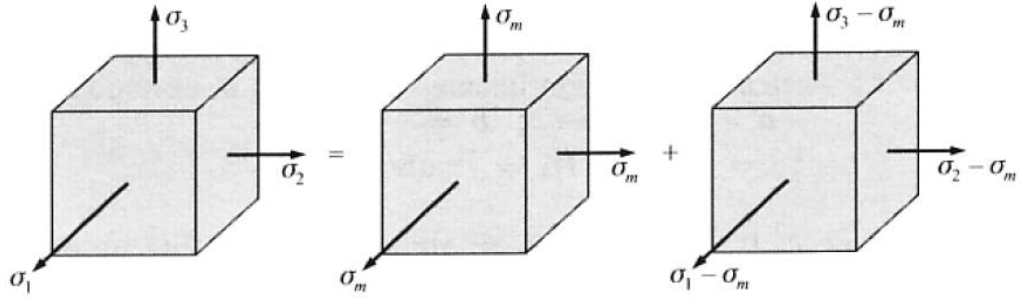


Figura 4-14 componentes del estado tensional mostrado como la suma del estado tensional esférico y desviador [22]

Donde la tensión media σ_m queda definida como:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (33)$$

La energía de deformación por unidad de volumen es:

$$W = W_v + W_d = \frac{1}{2E}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - \frac{\nu}{E}(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3) \quad (34)$$

La debida al cambio de volumen es:

$$W_v = 3 \frac{1}{2} \sigma_m \varepsilon_m \quad (35)$$

Teniendo en cuenta la ley de Hooke:

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E}(1 - 2\nu) \quad (36)$$

La ecuación 35 queda:

$$W_v = \frac{3\sigma_m^2}{2E}(1 - 2\nu) = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2}{6E}(1 - 2\nu) \quad (37)$$

La energía por unidad de volumen debida al cambio de forma o de distorsión se puede obtener como diferencia de la ecuación 34 y 37 que, de manera simplificada queda:

$$W_d = W - W_v = \frac{1 + \nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (38)$$

La energía de distorsión para un ensayo de tracción simple, cuando alcanza el estado límite elástico será:

$$W_d = \frac{1 + \nu}{3E} \sigma_e^2 \quad (39)$$

Volviendo a la definición del criterio de plastificación, el material llegará al límite elástico cuando la energía de distorsión del material es igual a la energía de distorsión absorbida en un ensayo de tracción, expresada de manera analítica en la ecuación 40.

$$\frac{1 + \nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = \frac{1 + \nu}{3E} \sigma_e^2 \quad (40)$$

Simplificando la ecuación 39 queda:

$$[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = 2\sigma_e^2 \quad (41)$$

Finalmente, de la ecuación 41 se puede deducir la tensión equivalente a la cual el material alcanza el límite elástico:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (42)$$

La expresión obtenida del criterio de Von Mises indica que la superficie de plastificación es un cilindro de revolución cuyo eje es la trisectriz $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ tal y como se muestra en la Figura 4-15.

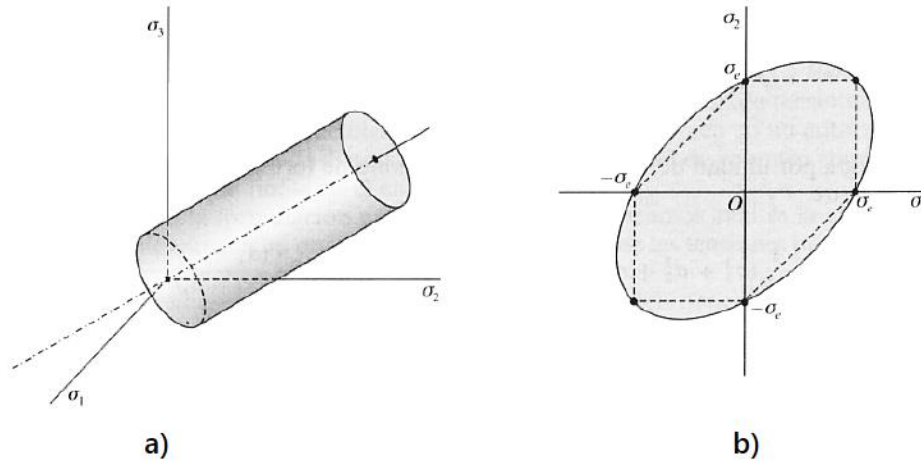


Figura 4-15 Superficie de fluencia del criterio Von Mises en (a) tres dimensiones y (b) dos dimensiones

El criterio de Von Mises usa una regla de flujo asociada, y el endurecimiento puede ser isótopo o cinemático.

4.6. Función potencial de Hill

La función potencial de Hill es una simple extensión de la función de fluencia de Von Mises [21], el cual puede ser expresado de la siguiente forma:

$$f(\sigma) = \sqrt{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2} \quad (43)$$

Donde los parámetros F, G, H, L, M, N quedan definidos por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right) \\ G &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right) \\ H &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right) \\ L &= \frac{3}{2R_{23}^2} ; \quad M = \frac{3}{2R_{13}^2} ; \quad N = \frac{3}{2R_{12}^2} \end{aligned} \quad (44)$$

Donde cada σ_{ij} determina la tensión de fluencia aplicada a una dirección concreta, haciendo cero al resto de componentes de fluencia del estado tensional. R_{ij} son ratios de tensión de fluencia anisótropos, determinados como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} R_{11} &= \frac{\sigma_{11}}{\sigma^0} ; R_{22} = \frac{\sigma_{22}}{\sigma^0} ; R_{33} = \frac{\sigma_{33}}{\sigma^0} ; \\ R_{12} &= \frac{\sigma_{12}}{\tau^0} ; R_{13} = \frac{\sigma_{13}}{\tau^0} ; R_{23} = \frac{\sigma_{23}}{\tau^0} \end{aligned} \quad (45)$$

Donde σ^0 y τ^0 son las tensiones de fluencia de referencia.

4.7. Modelo de rotura de Hashin

El modelo de Hashin se inició en el año 1973, basado en las observaciones del fallo en probetas sometidas a tracción con composición multidireccional [25]. En este modelo se propone dos tipos de fallo, a causa del fallo en la matriz o en la fibra, siendo el primero gobernado por las tensiones transversales y tangenciales en la dirección de la fibra, y el segundo por la tensión longitudinal a lo largo de la dirección de esta.

En 1980, el criterio es revisado por Hashin para así añadir dos tipos de fallo, uno asociado a fibras y otro a matriz, pero distinguiendo entre tracción y compresión [26].

Este criterio se rige por cuatro modos de fallo como son: fallo por tensión en la fibra (46) o por compresión (47), y fallo por tensión en la matriz (48) o por compresión (49).

$$F_f^t = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^t} \right)^2 + \alpha \left(\frac{\tau_{12}}{S^L} \right)^2 \leq 1 \quad (46)$$

$$F_f^c = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^c} \right)^2 \leq 1 \quad (47)$$

$$F_m^t = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y^t} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L} \right)^2 \leq 1 \quad (48)$$

$$F_m^c = \left(\frac{\sigma_{22}}{2S^T} \right)^2 + \left[\left(\frac{Y^c}{2S^T} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{22}}{Y^c} + \left(\frac{\tau}{S^L} \right)^2 \leq 1 \quad (49)$$

Donde σ_{11} indica la tensión en la dirección de la fibra, σ_{22} la tensión en la dirección transversal de la fibra, y τ_{12} la tensión en el plano de esfuerzo cortante. X^T, X^C, Y^T, Y^C, S^T y S^L son las resistencias longitudinales, transversales y a cortadura a tracción y compresión del material.

4.8. Modelo de rotura de Tsai-Hill

Este criterio permite distinguir entre el fallo debido a la fibra, representada por la máxima resistencia del material compuesto en la dirección de la fibra, y el fallo en la matriz, representada por la máxima resistencia transversal a las fibras sin tener en cuenta la interacción entre las componentes del tensor de tensiones. Suponiendo un estado de tensión plana, el criterio de fluencia se escribe como:

$$\frac{\sigma_{11}^2}{X^2} - \frac{|\sigma_{11}\sigma_{22}|}{X^2} + \frac{\sigma_{22}^2}{Y^2} + \frac{\sigma_{12}^2}{S^2} < 1 \quad (50)$$

Donde σ_{11} indica la tensión en la dirección de la fibra, σ_{22} la tensión en la dirección transversal de la fibra, y τ_{12} la tensión en el plano de esfuerzo cortante. X, Y y S son las resistencias longitudinales, transversales y a cortadura.

4.9. Modelo de rotura de Tsai-Wu

Este criterio es una generalización del criterio de fluencia de Azzi-Tsai-Hill e incorpora la posibilidad de diferenciar las resistencias a compresión y tracción y la interacción entre las tensiones. En el espacio de tensiones se escribe como:

$$F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{22} + F_{11}\sigma_{11}^2 + F_{22}\sigma_{22}^2 + F_{66}\sigma_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} < 1 \quad (51)$$

Donde los coeficientes de Tsai-Wu quedan definidos como sigue:

$$\begin{aligned}
F_1 &= \frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} \\
F_2 &= \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \\
F_{11} &= -\frac{1}{X_t X_c} \\
F_{22} &= -\frac{1}{Y_t Y_c} \\
F_{66} &= \frac{1}{S^2}
\end{aligned} \tag{52}$$

σ_{biax} es conocida como la tensión de fallo equibiaxial. Si es conocida, entonces:

$$F_{12} = \frac{1}{2\sigma_{biax}^2} \left[1 - \left(\frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} + \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \right) \sigma_{biax} + \left(\frac{1}{X_t X_c} + \frac{1}{Y_t Y_c} \right) \sigma_{biax}^2 \right] \tag{53}$$

Si la tensión mencionada no se conoce la ecuación 53 puede calcularse como:

$$F_{12} = f^* \sqrt{F_{11} F_{22}} \tag{54}$$

donde f^* queda comprendido en el rango $-1 \leq f^* \leq 1$.

4.10. Elección de los modelos elastoplástico y de rotura para la caracterización de polímeros ortótropos

El modelo Drucker-Prager es el más idóneo para la caracterización de polímeros [21], [23], ya que, para un comportamiento más exacto de la respuesta en la fase de fluencia de un material polimérico, es necesario que el criterio de plastificación sea sensible también al estado tensional hidrostático, esto es que las tensiones principales sean iguales o muy próximas entre sí. Sin embargo, debido a los concretos ensayos triaxiales que necesita el modelo para la obtención de los parámetros característicos que lo definen, se ha desechado la idea de utilizar este modelo en el presente trabajo al no disponer de datos del ensayo experimental mencionado.

Por otro lado, principalmente en el ámbito industrial, se ha verificado la utilización de criterios de plastificación simplificados para la caracterización de materiales poliméricos isotrópicos inyectados, como es el caso del criterio de Von Mises [24].

En este caso, para el presente trabajo donde el material plástico tiene una marcada ortotropía debido al proceso de fabricación mediante impresión aditiva, se ha utilizado el criterio de plastificación de Von Mises, con una regla potencial de Hill para añadir esta última propiedad mencionada.

La regla de flujo escogida es la asociada, por ser la implementada en el programa Abaqus, principalmente para los modelos clásicos de plasticidad de metales [14]. Por último, el endurecimiento que caracterizará a los polímeros a estudiar de la manera más eficiente es el endurecimiento isótropo que, al igual que la regla de flujo, está implementado en el programa Abaqus.

El criterio de rotura de Hashin es el más empleado dentro de los materiales compuestos, debido también a su amplia incorporación en muchos programas de simulación como es el caso de Abaqus. Sin embargo, este modelo requiere que el comportamiento del material no dañado sea definido únicamente por un modelo elástico lineal, el cual no es objetivo del presente trabajo, donde se desea estudiar además del fallo del material, el comportamiento mecánico elastoplástico, por tanto es descartado.

Se ha escogido el modelo de rotura de Tsai-Hill por ser un criterio adecuado para la implementación del modelo elástico y plástico. Este modelo está disponible en el programa Abaqus, por lo que no hará falta generar ningún tipo de subrutina para trabajar con él. Uno de los aspectos principales a tener en cuenta es que no degrada el material, es decir, es usado únicamente como indicador de fallo del material, por lo que el material podrá superar este criterio y comportarse de manera dúctil. Esta característica será comentada más adelante cuando se expliquen las simulaciones llevadas a cabo.

5. DEFINICIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

En este capítulo se definirá el proceso seguido mediante la utilización consecutiva de los distintos módulos que posee Abaqus para el diseño de las piezas a estudiar, determinación del modelo escogido, mallado, condiciones de contorno, entre otros. Se dividirá en tantos apartados como módulos han sido necesarios para la determinación del problema, definiendo paso a paso las características de cada proceso llevado a cabo.

Por otro lado, se han considerado ciertas simplificaciones para llevar a cabo esta simulación, como son:

- Simulación independiente de la temperatura
- Módulo de cizalladura constante para la caracterización del régimen elástico
- Pieza determinada como material compuesto de una sola capa con espesor constante de 4 milímetros
- Para el criterio de rotura se ha obviado el esfuerzo cortante máximo y las tensiones de compresión de fallo

5.1. Diseño de la pieza

El presente trabajo trata de simular ensayos experimentales que previamente han sido realizados, por lo que el diseño de la probeta se ajustará a las dimensiones preestablecidas en los ensayos mencionados.

Como se vio en el apartado 4.2, las probetas analizadas en el ensayo experimental tomaron geometría rectangular, tal como se muestra en la figura 5-1.

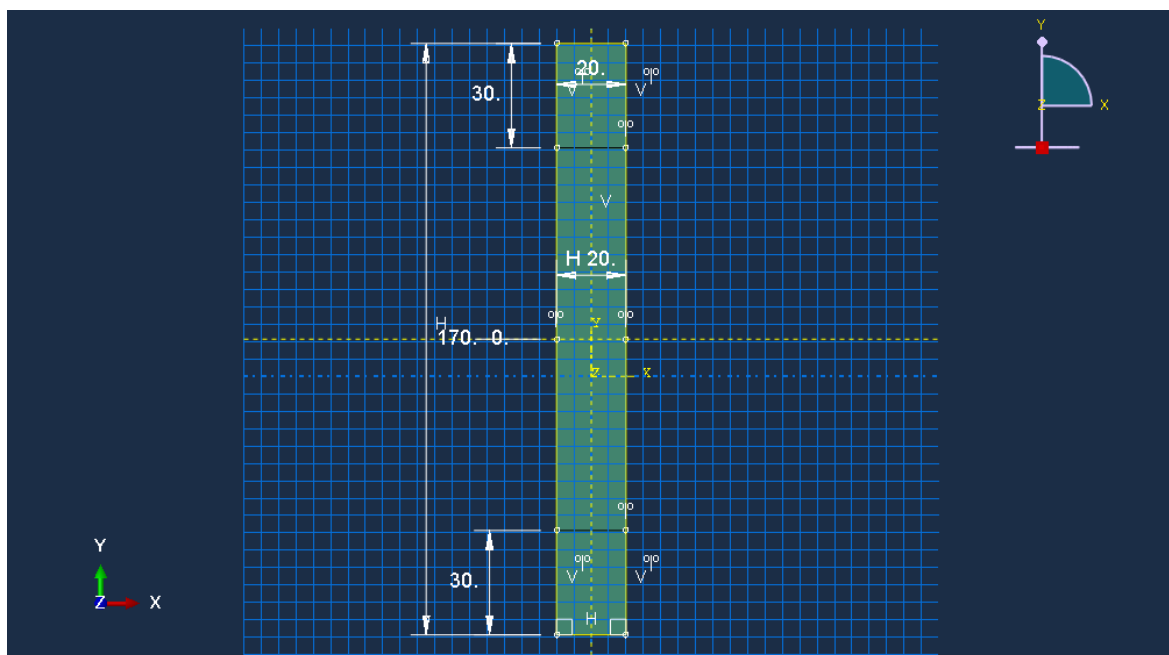


Figura 5-1 diseño probeta a simular

En la Figura 5-1 se puede ver como se ha añadido una diferencia entre la zona central y las zonas donde en el ensayo experimental la probeta estaría sujeta por las mordazas, con un valor de 30 para cada una. El motivo de añadir estas zonas se verá más adelante, donde se puede añadir unas interacciones para generar unos desplazamientos más uniformes sin que estas zonas sufran alteración ninguna.

Sin embargo, en la posterior simulación se comprobó que tales dimensiones daban problemas a la hora de obtener los resultados, debido a que, por la geometría de la figura, las tensiones y deformaciones máximas se concentraban cerca de las mordazas, por lo que se llevó a cabo un reajuste de la probeta para concentrar estos resultados lo más próximo al centro de esta. La nueva geometría de la probeta a simular se basó en la norma UNE-EN ISO 527-2:2012, con una modificación del radio de la curva de transición de la sección transversal de la probeta, permitiendo un cambio más gradual y uniforme, así como la sección estrecha se ha mantenido un tamaño de 12, como se muestra en la Figura 5-2.

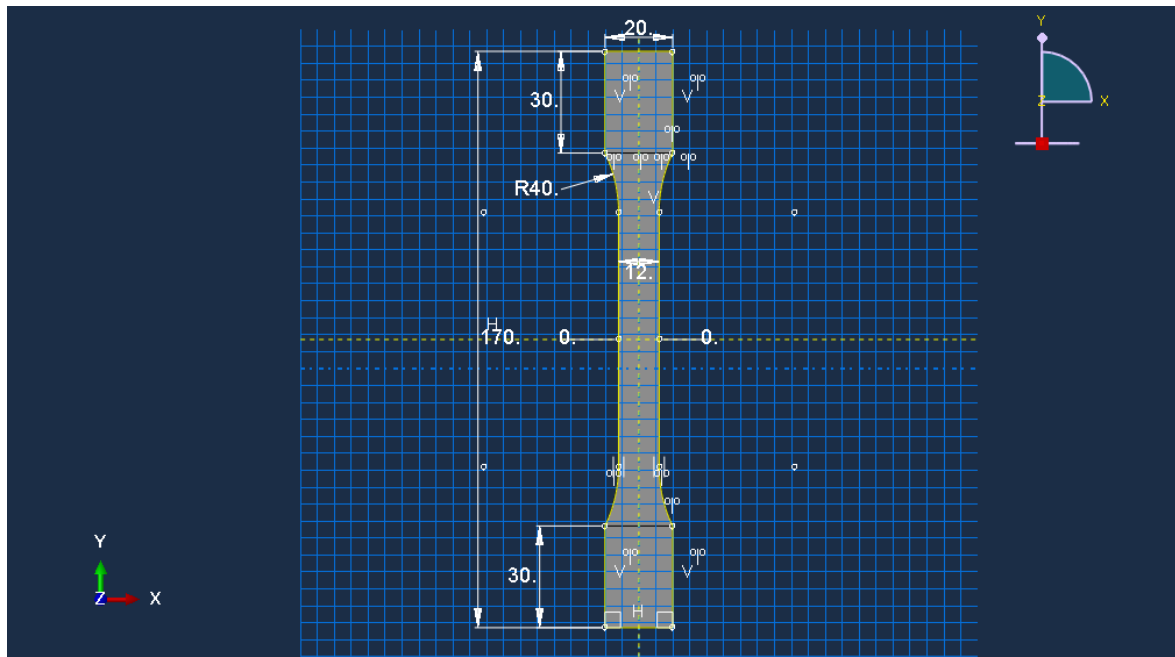


Figura 5-2 modificación de la geometría de la probeta a simular [elaboración propia]

Por otro lado, el espesor de la probeta se ha mantenido constante con un valor de 4 milímetros tanto para la Figura 5-1 como para la Figura 5-2, al igual que la norma UNE-EN ISO 527-2:2012 también contempla este valor.

5.2. Propiedades del material

5.2.1. Material tipo laminar

Como se ha visto anteriormente, el material a ensayar se puede asemejar al comportamiento de un material tipo compuesto laminar con fibras unidireccionales, por tanto es importante crear un sistema de referencia que permita variar las direcciones de las fibras que se desean estudiar.

Para ello en el ensayo experimental se hizo uso de la norma UNE 116005:2012 [32] que dictamina que se deberá registrar la orientación de las probetas y realizar ensayos atendiendo a las tres direcciones principales, donde se considera como dirección principal del laminado aquella donde se aplicará el esfuerzo. Las direcciones mencionadas se pueden apreciar en la Figura 5-3.

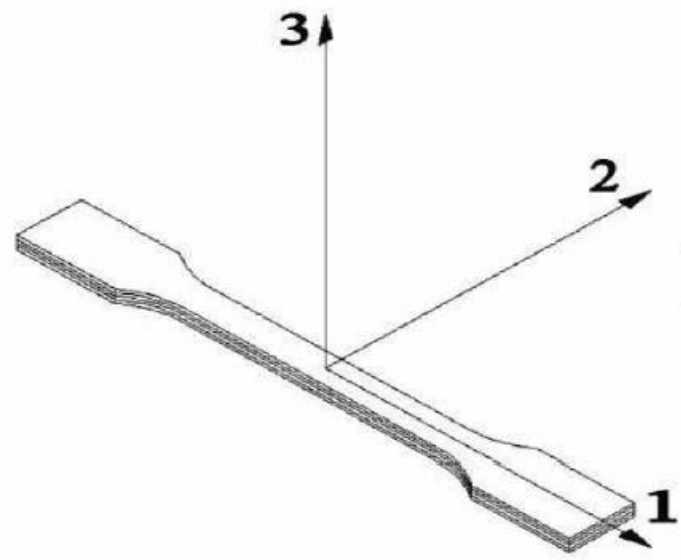


Figura 5-3 Sistema de referencia según la norma UNE 116005:2012. [32]

En el presente trabajo al estudiar un material ortótropo donde todas las láminas tendrán el mismo comportamiento mecánico, se ha considerado el estudio de una única lámina con el grosor total de la probeta de 4 milímetros. Para ello se ha hecho uso de la opción “*Create Composite Layup*”, que permite añadir elemento tipo “*Conventional Shell*”. La configuración de este tipo de lámina se definirá mediante la ventana que se ilustra en la Figura 5-4, donde se explicará la modificación de cada parámetro en función de esta imagen.

Layup Orientation

Definition:

Normal axis: Vector -- (0, 0, 1)

Primary axis: Vector -- (0, 1, 0)

Normal direction: ☐ Axis 1 ☐ Axis 2 ☒ Axis 3

Additional rotation: ☒ None ☐ Angle: ☐ Distribution:

Section integration: ☒ During analysis ☐ Before analysis

Thickness integration rule: ☒ Simpson ☐ Gauss

Plies **Offset** Shell Parameters Display

☐ Make calculated sections symmetric

	Ply Name	Region	Material	Thickness	CSYS	Rotation Angle	Integration Points
1 ✓	Ply-1	(Picked)	ABS0	4	<Layup>	0	3

Figura 5-4 Parámetros para la definición del material como tipo compuesto

Para la caracterización de la orientación de las fibras, tal como se mostraba en la Figura 5-3, se ha hecho uso del comando “*Layup Orientation*” que permite crear un sistema de ejes cartesianos en la posición que desea el usuario, definiendo el eje normal (n) y el principal ($ref1$), y considerando un sistema de ejes coordenados dextrógiros. El resultado se muestra en la Figura 5-5.

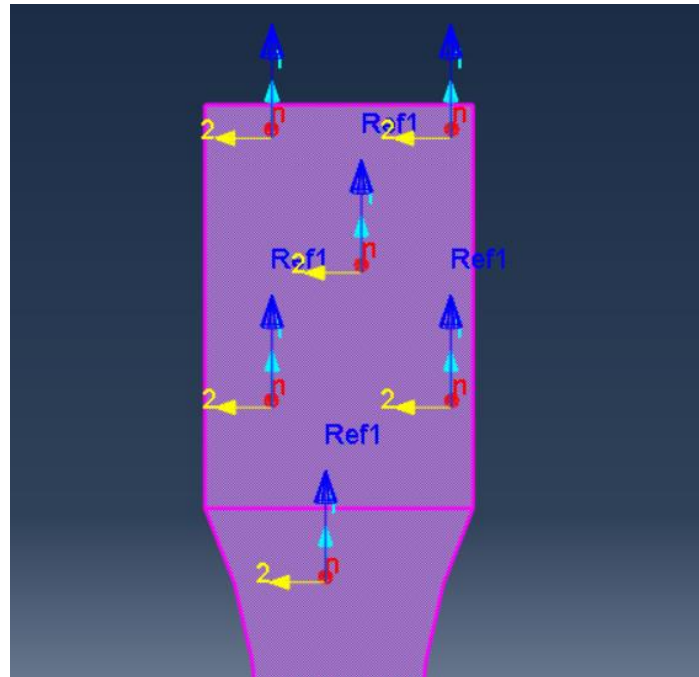


Figura 5-5 Captura y ampliación para la orientación del sistema de coordenadas local definido, y orientación de las fibras mediante la indicación Ref 1

Finalmente, se relaciona la lámina definida con la geometría que la compone (*Region*), se indica el material que se aplicará (*Material*) el espesor (*Thickness*) y la orientación de las fibras que se desea estudiar (*Rotation Angle*), la cual es una de las características principales de este comando debido a la posibilidad realizar estudios de fibras con orientaciones distintas únicamente modificando esta casilla, tal y como es el caso del presente trabajo donde se modificará para ver el comportamiento del material a diferentes ángulos.

5.2.2. Definición propiedades elásticas

De entre las posibilidades que ofrece Abaqus para definir un material elástico, se ha definido el tipo lámina para el presente estudio, puesto que es el más indicado para la

caracterización de materiales ortótropos laminares [21]. Los distintos parámetros que definirán este régimen son:

- **Módulo de elasticidad** en la dirección longitudinal y transversal E_1 y E_2
- **Coefficiente de Poisson principal** ν_{12}
- **Módulos de cizalladura** que, para el presente trabajo se ha realizado una simplificación por la cual trata al material como isótropo $G_{12} = G_{13} = G_{23}$

Todos ellos se muestran en la Figura 5-6.

Elastic

Type: Lamina

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term

☐ No compression

☐ No tension

Data

	E1	E2	Nu12	G12	G13	G23
1	2044.93	2018.37	0.37395	695.991	695.991	695.991

OK Cancel

Figura 5-6 Definición características elásticas

Para la definición del criterio de rotura, Abaqus proporciona una subopción de fallo por tracción o por compresión, en el que se definirá el primero mediante los parámetros definidos a continuación y expuestos en la Figura 5-7.

- **Ten stress fiber dir:** límite de tensión de tracción en la dirección de la fibra
- **Com stress fiber dir:** límite de la tensión de compresión en la dirección de la fibra

- **Ten stress transv dir:** límite de la tensión de tracción en dirección transversal
- **Com stress transv dir:** límite de la tensión de compresión en dirección transversal
- **Shear Strength:** esfuerzo de cortadura en el plano X-Y
- **Cross-prod term coef:** coeficiente para el término de producto cruzado. Su valor oscila entre -1 y 1. Usado para utilizar el criterio de Tsai-Wu
- **Stress limit:** límite de tensión biaxial. Usado para el criterio de Tsai-Wu, si este valor es cero el parámetro anterior es ignorado

Debido a que en el presente trabajo sólo se dispone de datos procedentes del ensayo de tracción, se despreciarán las tensiones de compresión, así como el esfuerzo de cortadura, de modo que se añadirá un valor elevado a estos miembros para que no influyan en el resultado. Por otro lado, el criterio de rotura que se utilizará será el de Tsai-Hill, por lo que los dos últimos parámetros son puestos a cero ya que no son necesarios.

Suboption Editor

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

	Ten Stress Fiber Dir	Com Stress Fiber Dir	Ten Stress Transv Dir	Com Stress Transv Dir	Shear Strength	Cross-Prod Term Coeff	Stress Limit
1	31.75	1000	24.9837	1000	100	0	0

OK Cancel

Figura 5-7 Definición características para el criterio de rotura

5.2.3. Definición propiedades plásticas

Como se ha visto en el apartado 4.11 se ha considerado el uso del modelo de Von Mises para la caracterización plástica del material. Para ello se ha determinado una calibración previa del material para caracterizar el régimen plástico, donde para evitar la caída de pendiente del tramo lineal se ha falseado el límite de fluencia hasta valores bajos, por lo que la definición del modelo resultante sigue en muy buena parte la curva del material [24] (Figura 5-8)

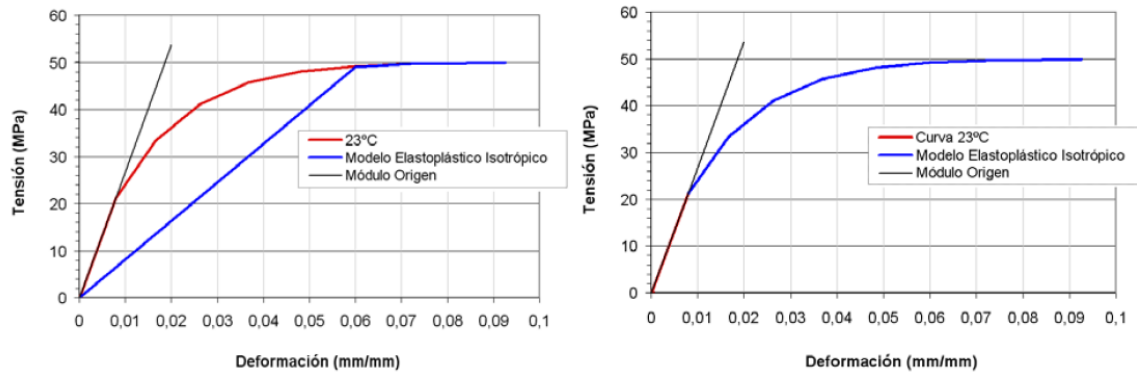


Figura 5-8 Modelo de cálculo inicial (izquierda) y con límite de fluencia falseado (derecha) [24]

Para calibrar el material se añaden los datos de la curva tensión-deformación del ensayo experimental, se ajusta el límite último de la curva, el límite de fluencia, y los puntos que se desean para definir el régimen plástico, tal y como se muestra en la Figura 5-9

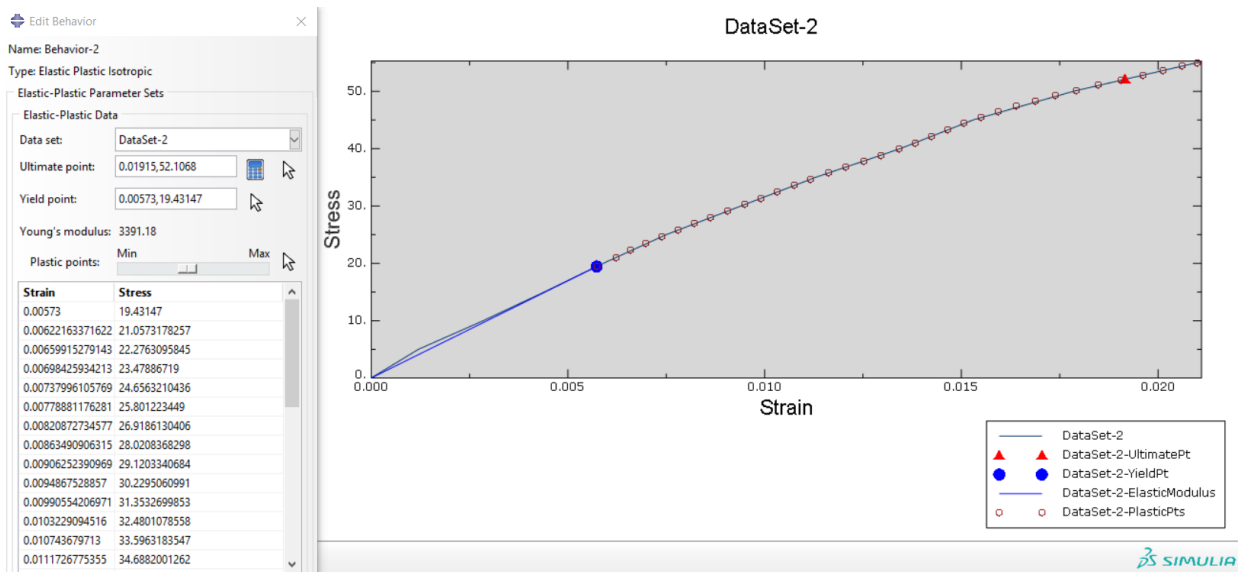


Figura 5-9 calibración del material

Una vez realizada la calibración se procede a añadir los datos de régimen plástico al modelo, continuando con la caracterización del comportamiento ortótropo añadiendo la regla potencial de Hill explicada en el apartado 4.7. Para ello, considerando como tensión de fluencia de referencia la tensión en la dirección de las fibras, se ha de añadir el coeficiente de ratio para la dirección 2 como se indica en la ecuación 55.

$$R_{22} = \frac{\sigma_{22}}{\sigma^0} \quad (55)$$

Considerando a σ^0 como la tensión de fluencia de referencia y σ_{22} como la tensión de fluencia en la dirección transversal. La definición de estos términos en el programa queda expuesta en la Figura 5-10.

Suboption Editor

Potential

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

	R11	R22	R33	R12	R13	R23	
1	1	0.86	1	1	1	1	

OK Cancel

Figura 5-10 Definición coeficientes para la función potencial

Donde el coeficiente $R11$ al ser la tensión de referencia, $R33$ por trabajar en tensión plana y $R12$, $R13$ y $R23$ al despreciarse la influencia de las tensiones cortantes, todos son de valor 1, modificando únicamente el parámetro $R22$.

5.3. Definición del Step utilizado

La simulación del ensayo de tracción se hará mediante un análisis estático con no linealidad geométrica al verse sometida la pieza a grandes deformaciones.

El procedimiento de cálculo del programa se llevará a cabo mediante pasos de tiempo o incrementos, en los que el programa calculará en cada elemento con el tamaño de paso que le hayamos definido previamente. Si el análisis en un incremento es complejo y el programa no logra converger, automáticamente se reduce el paso de tiempo y se vuelve a iterar, así hasta que el problema converja. Al igual que el programa reduce el paso de tiempo si encuentra dificultades en el cálculo, también permite aumentarlo para acelerar el proceso. Para todo esto, Abaqus permite modificar estos incrementos de manera simple y rápida añadiendo en la interfaz un tamaño de incremento inicial del que partirá el cálculo, un paso de tiempo mínimo y uno máximo.

El aumento o disminución de estos incrementos, como se ha indicado depende de la convergencia de la solución, esto es debido a que el programa Abaqus utiliza un método iterativo para resolver sistemas lineales de ecuaciones, ya sea en un caso estático lineal o no lineal, cuasiestático, geostático, difusión de fluidos porosos o análisis de transferencia de calor. Para que el programa pase de una iteración a otra debe de convergir en cada incremento, esto es que los residuos sean inferiores a una tolerancia previamente definida. Por defecto para la mayoría de los casos el programa tiene una tolerancia de residuos para 10^{-3} para procedimientos no lineales [9].

En el presente trabajo se ha utilizado un paso de tiempo inicial de 0.01, un mínimo de $1E-5$, y un máximo de 0.01, debido a que si se añade un paso excesivamente elevado y el programa converge de manera sencilla aumentándolo, los resultados entre un incremento y otro si éste es muy grande se perderán, aumentando la inexactitud de los resultados.

Por otro lado, se han generado dos “set” para dos puntos de referencia definidos para la interacción de las mordazas (explicados más adelante), utilizándolos para definir dos “*history output*” y así obtener, por un lado el desplazamiento que sufre la mordaza superior, y por otro las reacciones sufridas en la mordaza inferior. El “*Field Output*” se ajusta a todo el modelo y se marcan las variables que se desean obtener en los resultados, tales como las tensiones, deformaciones, desplazamientos y principalmente los criterios de rotura, ya que las más habituales como son las primeras Abaqus las trae marcadas por defecto, no siendo así para las variables de daño las cuales se mostrarán a partir de la casilla “*CFAILURE*”, para los criterios de Tsai-Hill y Azzi-Tsai-Hill y criterio de máxima tensión.

5.4. Interacciones de las mordazas con el resto de la probeta

Al diseño de la probeta (Figura 5-2) se le ha añadido dos zonas que no sufrirán deformación ninguna al estar sujetadas por las mordazas de la máquina de tracción. Para simular este comportamiento se ha impuesto una restricción en ambas zonas de la probeta que van en contacto directo con las mordazas. Estas zonas se comportarán como cuerpo rígido, evitando que sufran cualquier tipo de deformación y repartiendo las cargas en el resto de la pieza de manera más uniforme.

Para ello se hace uso de la herramienta “*constraint*” en el módulo interacción, añadiendo previamente dos puntos de referencia, uno para cada zona rígida que se desea

generar. Se añade la superficie como se muestra en la Figura 5-11, el punto de referencia, y aunque en este caso es una simulación sencilla y la posición del punto de referencia no tendrá mayor relevancia en los resultados, se marca la casilla para ajustar este punto al centro de masa de la superficie escogida.

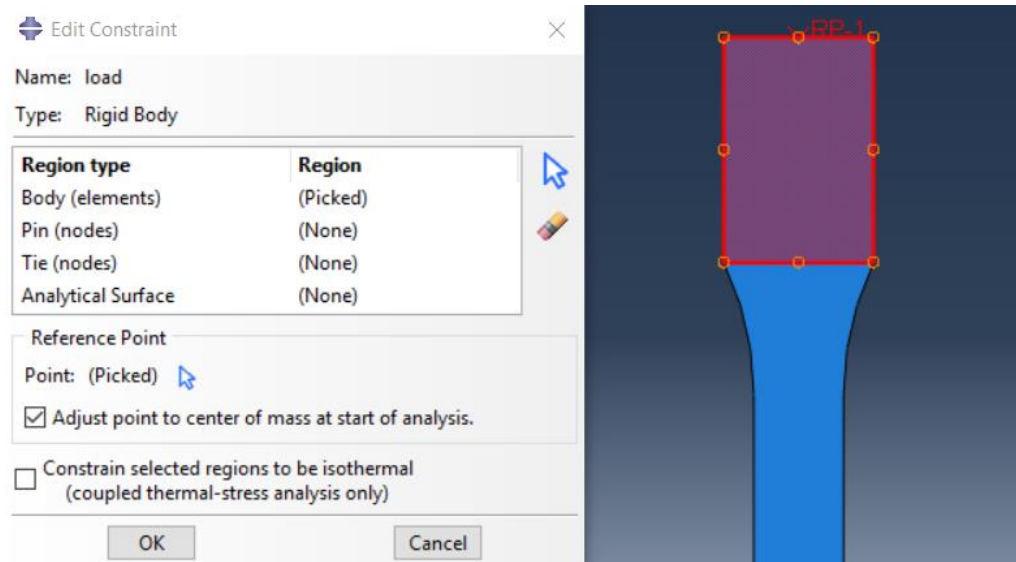


Figura 5-11 superficie superior impuesta como sólido rígido

5.5. Aplicación de las cargas

El presente estudio, como se ha indicado a lo largo del trabajo, pretende simular un ensayo de tracción, en el que se somete un material a un proceso de deformación unidimensional continuo mediante el desplazamiento de una de sus mordazas. Por tanto, en la simulación la carga a la que está sometida la probeta es debida a un desplazamiento continuo. Mediante el comando “*Create Boundary condition*” se pueden añadir distintos estados como pueden ser restricciones en ciertas direcciones, desplazamientos o velocidades, entre otros. En este caso se añadirá un desplazamiento lineal vertical en el punto de referencia conectado a la cara superior de la probeta, y una restricción de todos los grados de libertad en el punto conectado a la cara inferior, tal como se muestra en la Figura 5-12.

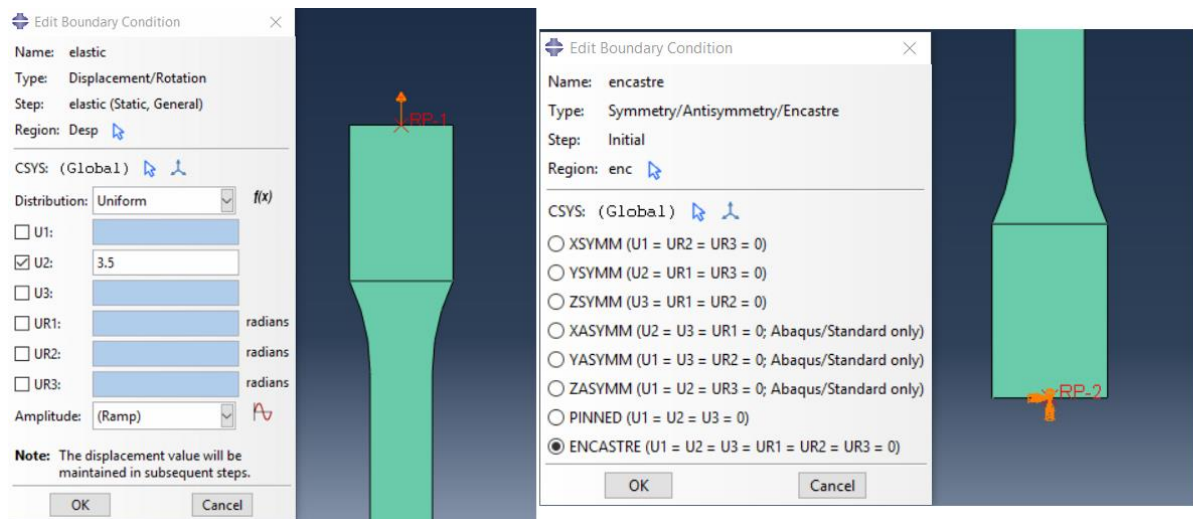


Figura 5-12 Definición de la condición de desplazamiento vertical (izquierda) y restricción de todos los grados de libertad (derecha)

En el presente estudio al conocer el desplazamiento en el cual cada material rompe se puede definir distintos desplazamientos, siempre superiores al de rotura, en función del material que se esté ensayando para conseguir un campo de estudio más específico.

5.6. Mallado y tipo de elemento

El tipo de elemento utilizado en esta simulación ha sido rectangular con forma estructurada como se muestra en la Figura 5-13, debido a que la pieza a modelar tiene un diseño simple, y siempre que se pueda es preferible usar elementos tipo rectangulares (o hexaédrico en tres dimensiones) a tipo triangulares (o tetraédrico) tal y como se concretó anteriormente.

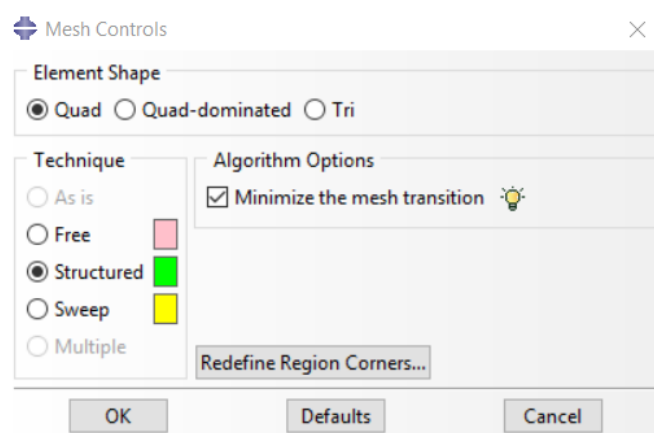


Figura 5-13 Definición tipo de elemento

Para el mallado se ha utilizado un tamaño de elemento progresivo (Figura 5-14), debido a que en la cara superior e inferior donde van definidas las mordazas han sido definidas como cuerpos rígidos, mientras que la zona central será la parte más interesante donde se concentrarán los resultados.

Aún eliminando estas dos partes del proceso de obtención de datos, en una primera instancia no se puede conocer la zona de mayor interés donde se concentrarán las cargas, por lo que el mallado de la probeta debe de ser sometido a un proceso de iteración para conseguir los elementos más finos en las mayores concentraciones de tensiones.

Para ello la forma más rápida de conocer estas zonas es mallando con un tamaño de elemento grande y continuo que proporcione unos resultados iniciales aproximados (Figura 5-15 izquierda), se lanza el análisis y se hace una rápida comprobación de la situación de las variables que interesen estudiar. Una vez conocida las zonas de interés de manera aproximada, se malla con elementos más pequeños en estas regiones (Figura 5-15 derecha), siempre que el problema lo permita para obtener mejores resultados en esas zonas.

Se ha utilizado el comando “*Seed Edges*”, que permite añadir un tamaño de elementos de manera progresiva desde uno máximo a uno mínimo, tanto en una dirección como en múltiples como se muestra en la Figura 5-14. El resultado final queda expuesto en la Figura 5-15.

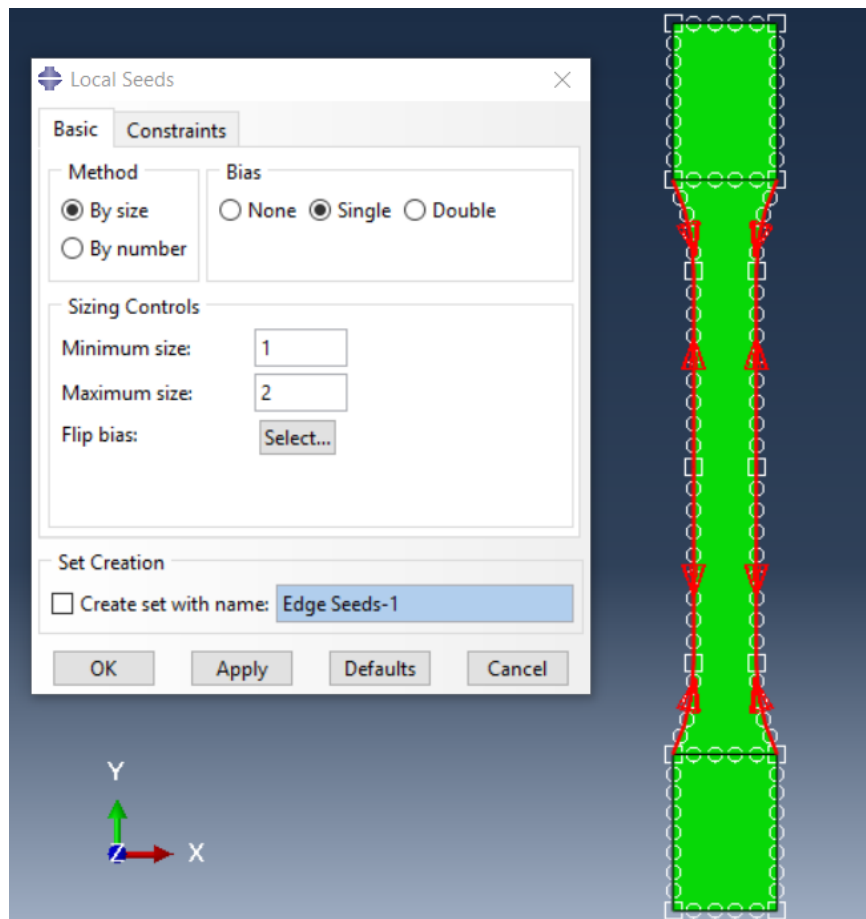


Figura 5-14 Mallado de la probeta de manera progresiva

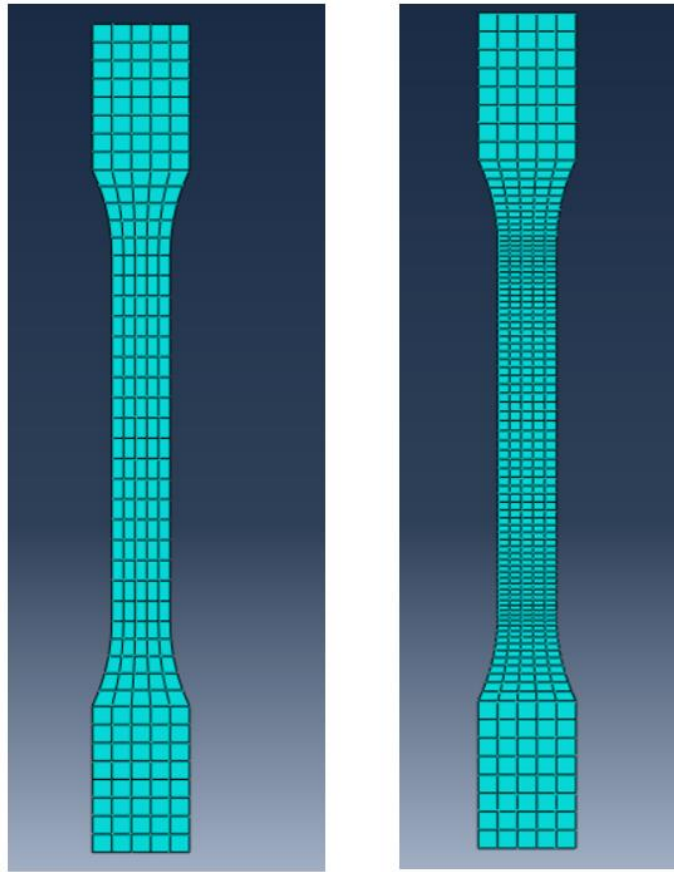


Figura 5-15 Mallado con elementos tipo quad estructurados, con tamaño uniforme (izquierda) y tamaño progresivo según la zona de interés (derecha)

La simulación quedará definida por elementos tipo Shell con orden de integración lineal, esto es, cuatro nodos por cada elemento con funciones de forma lineales, tal y como se explicó en el apartado 3.1. El método numérico empleado será el Standard, aunque tanto éste como el método explícito funcionarían bien para un problema estático, el primero es más robusto, siendo el segundo más orientado a la resolución de problemas dinámicos de impacto. Abaqus trae los controles de elemento predefinidos para una simulación general, donde para el presente estudio solo habrá que modificar la pestaña “*Membrane strains*”, siendo utilizada la opción “*Finite*” para análisis en tensión plana.

5.7. Ejecución de la simulación

Una vez llevado a cabo todos los procesos anteriores se crea un trabajo nuevo a partir del módulo “Job”, en el que al pretender realizar un análisis completo no hay que modificar ningún parámetro. Aun así, a veces el programa puede tener dificultades a la hora de encontrar el “*Set Work Directory*” definido para el guardado de todos los archivos necesarios

para la simulación. Si esto ocurriera, dentro de la definición del “*Job*” es conveniente indicar el directorio donde se desea guardar los archivos de visualización, añadiendo la carpeta deseada en “*Scratch directory*”. Finalmente se lanzan los cálculos para que genere el archivo “*.odb*” que será el que se abrirá posteriormente para visualizar los resultados.

6. INTERPRETACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Este capítulo se dividirá en los resultados obtenidos para los materiales poliméricos PLA y ABS para una orientación de las fibras laminares a 0 y 90 grados, analizando su comportamiento elastoplástico y su régimen de rotura, además de comprobar la exactitud de la simulación comparando los resultados con los ensayos experimentales.

Para la caracterización de las probetas impresas se estudió en un principio el modelo constitutivo de Drucker-Prager extendido, analizando y buscando en diferentes referencias bibliográficas los parámetros que intervienen en el proceso para diferentes materiales.

Por ejemplo, se estudió el caso del material ABS para una orientación de 0 grados con sus parámetros del modelo Drucker-Prager expuestos en la tabla 6-1 [33].

E_1 [GPa]	2.3
ν	0.39
β	57.17
$\sigma_{t,max}$ [MPa]	36

Tabla 6-1 Parámetros del modelo Drucker-Prager para el material ABS [33]

Se ha utilizado una regla de flujo asociada, esto implica que el ángulo de dilatación es el mismo que el ángulo de fricción interna del material.

La regla de endurecimiento caracterizaba la tensión límite del material σ_y que marca el estado último elástico y el inicio de la fluencia y plastificación. Este parámetro se obtiene de los resultados experimentales.

Se realizó una caracterización paramétrica de los diferentes parámetros que constituyen el modelo para conocer la influencia de estos parámetros en el modelo, y conocer qué valores se ajustan mejor a los ensayos experimentales. Para ello se utilizó el modelo lineal de Drucker-Prager, con un número de parámetros modificables total de 4, reduciéndose a 3 al tomar el ángulo de dilatación el mismo valor que el ángulo de fricción interna del material para caracterizar el comportamiento del modelo con una regla de flujo asociada (apartado 4.5.).

Este modelo fue utilizado en el primer diseño que se creó para la probeta (Figura 5-1), donde al encontrar los primeros problemas descritos en el apartado 5.1, se optó por disminuir la sección de la zona central de manera que las tensiones se concentraran en ésta y así conseguir que las regiones cercanas a las mordazas no afecten a los resultados finales. La geometría de la probeta modificada en este caso queda como muestra la Figura 6-1.

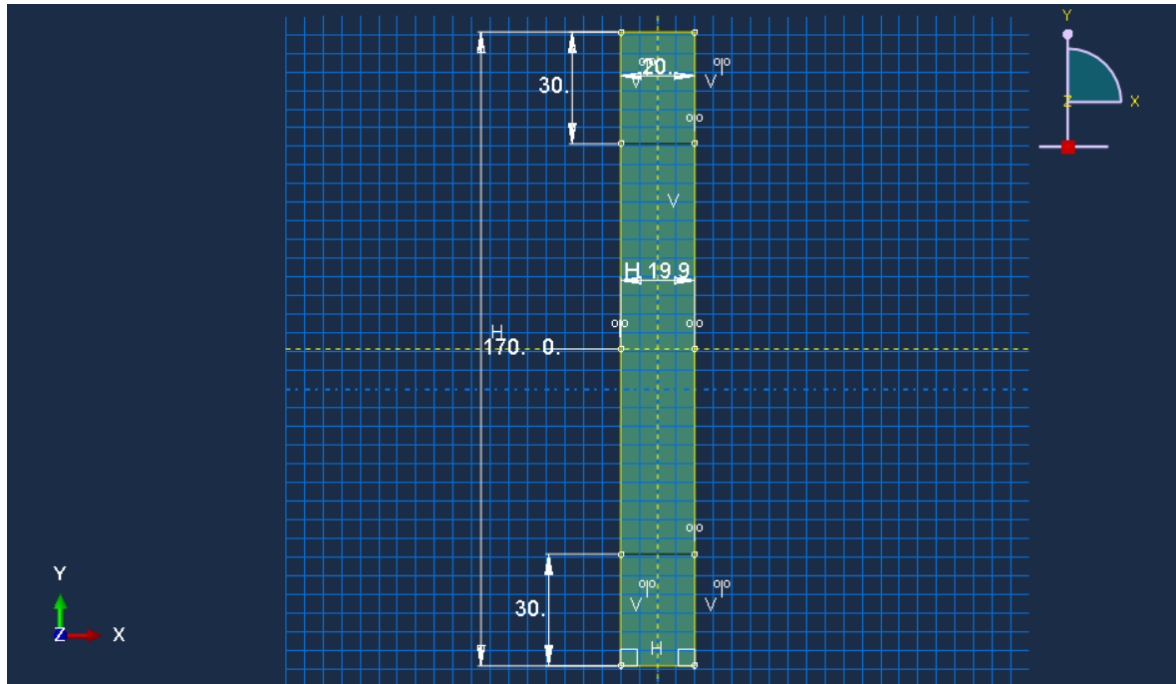


Figura 6-1 Disminución del centro de la probeta para concentrar las tensiones en esta zona

Los distintos resultados simulados variando los parámetros para conocer cómo se comportan en el modelo se mostraron en la curva tensión-deformación, quedando para todas las situaciones de cambio de los valores de estos parámetros superpuestos, sin llegar a caracterizar el comportamiento del material de manera adecuada. Además, frente a los resultados experimentales tomaban un error cada vez mayor a medida que entraba en el régimen plástico. Esto es debido a que no se tienen datos para caracterizar el endurecimiento isótropo, parámetro principal para analizar el comportamiento plástico para el cual habría que realizar un ensayo triaxial como se indicó en el apartado 4.11. Los resultados expresados en la curva tensión-deformación se muestran en la figura 6-2.

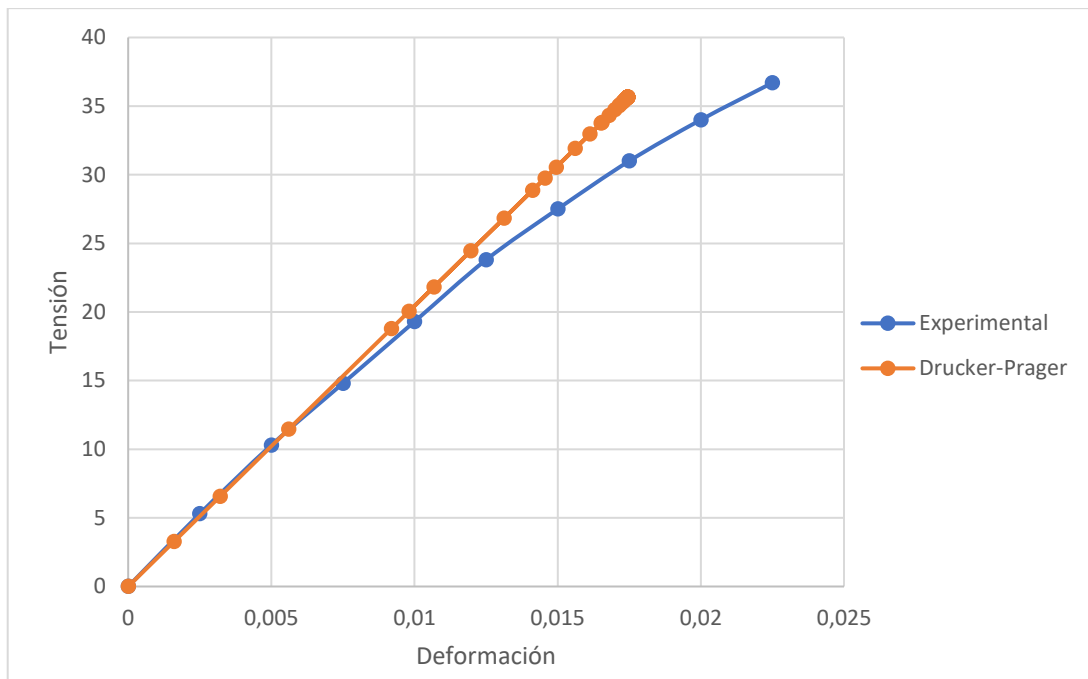


Figura 6-2 Comportamiento material mediante modelo numérico Drucker-Prager y posterior comparación con resultados experimentales

Por consiguiente, al no disponer de ensayos de tensiones triaxiales para la caracterización del régimen plástico, se descarta el modelo Drucker-Prager en el presente trabajo.

A continuación, se procedió a realizar el estudio del criterio de Von Mises y de Hill para la caracterización plástica anisótropa del material, tal como se aclaró en el apartado 4.11.

Se muestran las características principales de la simulación para el primer caso (PLA a 0 grados), tales como la presentación de simetría de resultados en el modelo o comportamiento dúctil del análisis, y la extrapolación de las conclusiones para los ensayos posteriores.

Para ambos materiales con ángulo de orientación 0 grados (carga alineada con la dirección de impresión) se añadirán las propiedades de las que partirá el problema, y así analizar en función de éstas los comportamientos mencionados en el párrafo anterior.

Por otro lado, para el estudio del ángulo de orientación de 90 grados (carga perpendicular a la dirección de impresión) de ambos materiales se analizarán las tensiones

de referencia y los coeficientes de anisotropía empleados para la caracterización de la ortotropía del material.

6.1. PLA orientación 0°

Las propiedades del material para ambas orientaciones de las fibras se detallan en la tabla 6-2.

Propiedades PLA	
Módulo de elasticidad longitudinal E_1 [MPa]	3281.7
Módulo de elasticidad transversal E_2 [MPa]	3306.89
Coeficiente de Poisson ν_{12}	0.3486
Módulo de cizalladura general G [MPa]	1214.13
Tensión de fluencia longitudinal σ_y [MPa]	26.78
Tensión de fluencia transversal σ_y [MPa]	26.78
Tensión de rotura longitudinal σ_{R1} [MPa]	52.51
Tensión de rotura transversal σ_{R2} [MPa]	36.3
Tensión máxima longitudinal σ_{Max1}	52.51
Tensión máxima transversal σ_{Max2}	36.3
Desplazamiento ensayo 0 grados [mm]	3.5
Desplazamiento ensayo 90 grados [mm]	3.5

Tabla 6-2 Propiedades del material para ambas orientaciones de las fibras [30]

La probeta queda definida por un campo de tensiones en el contorno deformado tal como se muestra en la Figura 6-3.

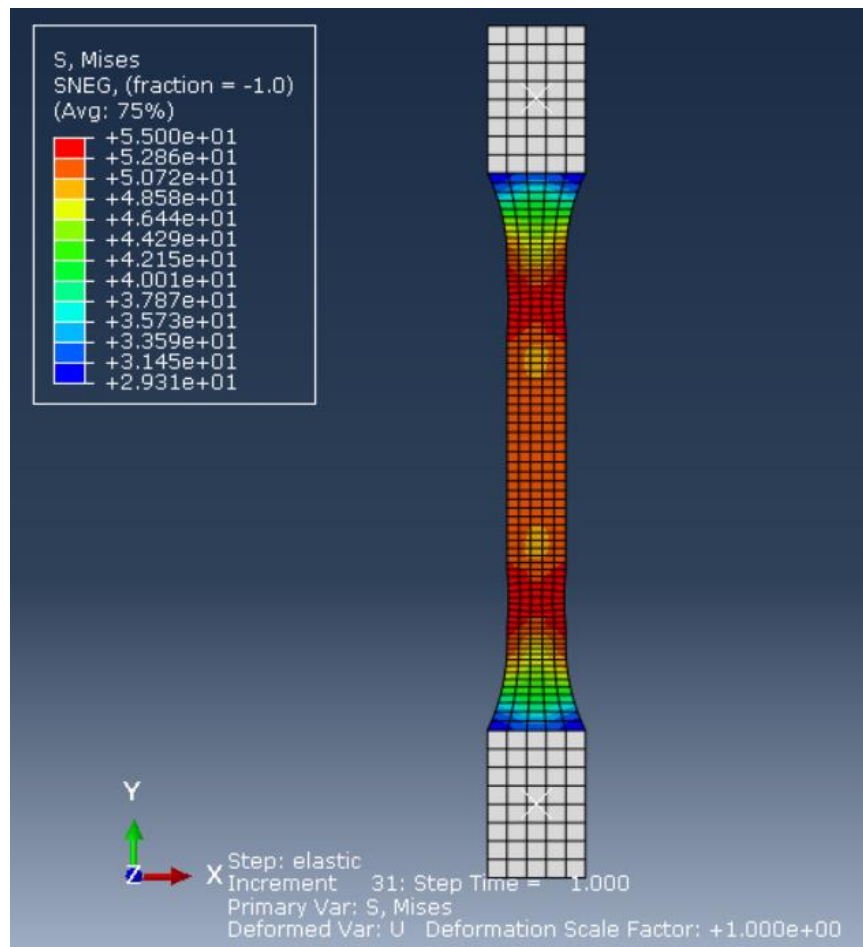


Figura 6-3 Resultados del ensayo para las tensiones equivalentes de Von Mises

La Figura 6-3 muestra dos zonas simétricas, debidas a que el análisis para cada elemento simétrico proporcionará los mismos resultados al ser estos iguales. Esto no es lo más ajustado a la realidad, ya que en un ensayo real la probeta concentra las tensiones en una única zona, debido a múltiples parámetros a causa de los defectos que pueda presentar el material por diferentes motivos (fabricación, estructura de la pieza, material empleado, entre otros). Conociendo el motivo por el que se da esta situación, se puede trabajar con una única zona para el estudio de sus propiedades mecánicas.

El campo de deformaciones plásticas y el criterio de rotura de Tsai-Hill quedan definidos en las Figuras 6-4 y 6-5, donde se aprecia que para el desplazamiento impuesto la probeta entra en régimen plástico, concentrándose la fluencia en una zona y siendo ésta por donde el material falla.

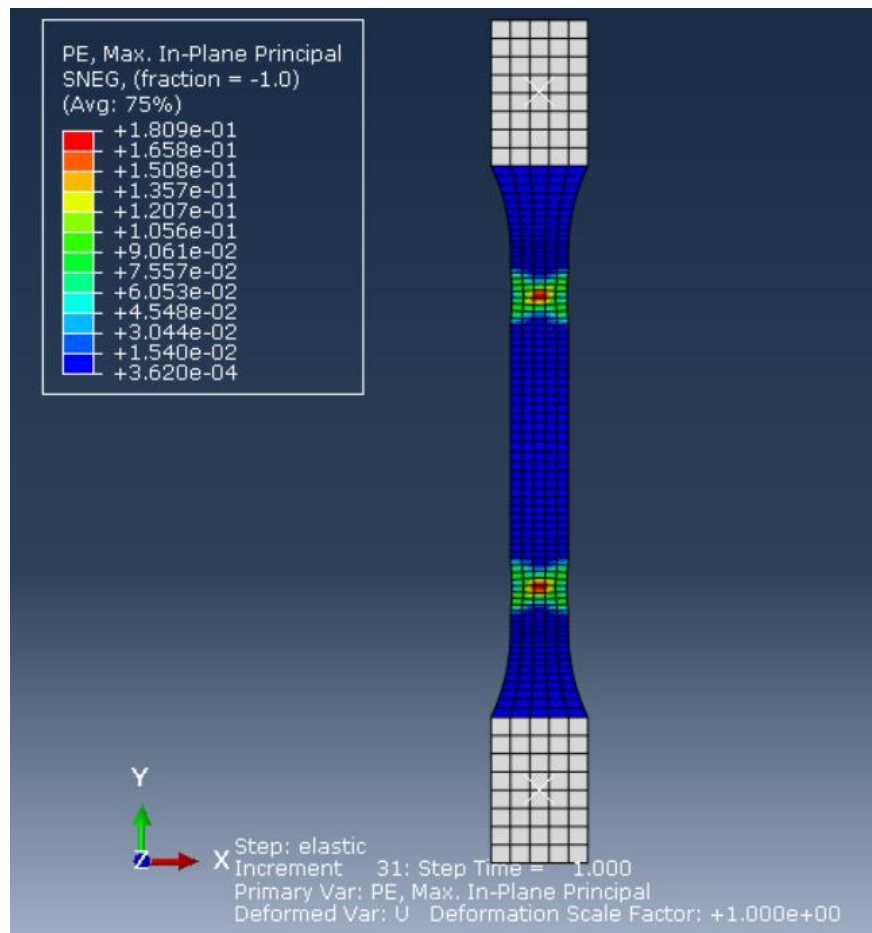


Figura 6-4 Contorno de deformación plástica para PLA 0°

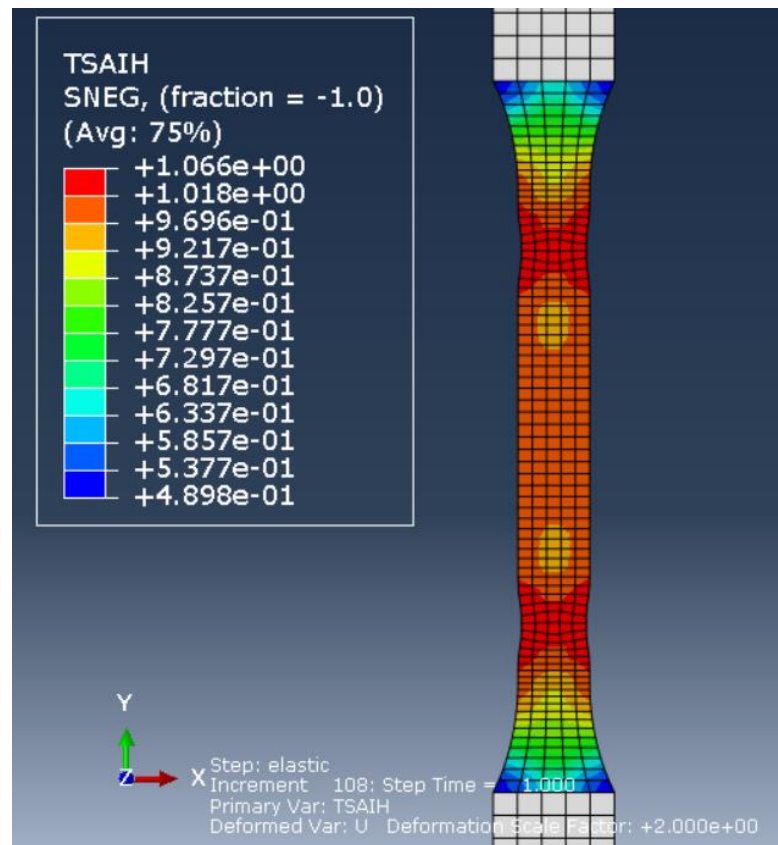


Figura 6-5 Contorno del criterio de rotura Tsai-Hill para PLA 0°

La Figura 6-6 muestra la utilización de un factor multiplicador de la deformación que permite ver de manera más clara cómo se lleva a cabo la deformación en la probeta.

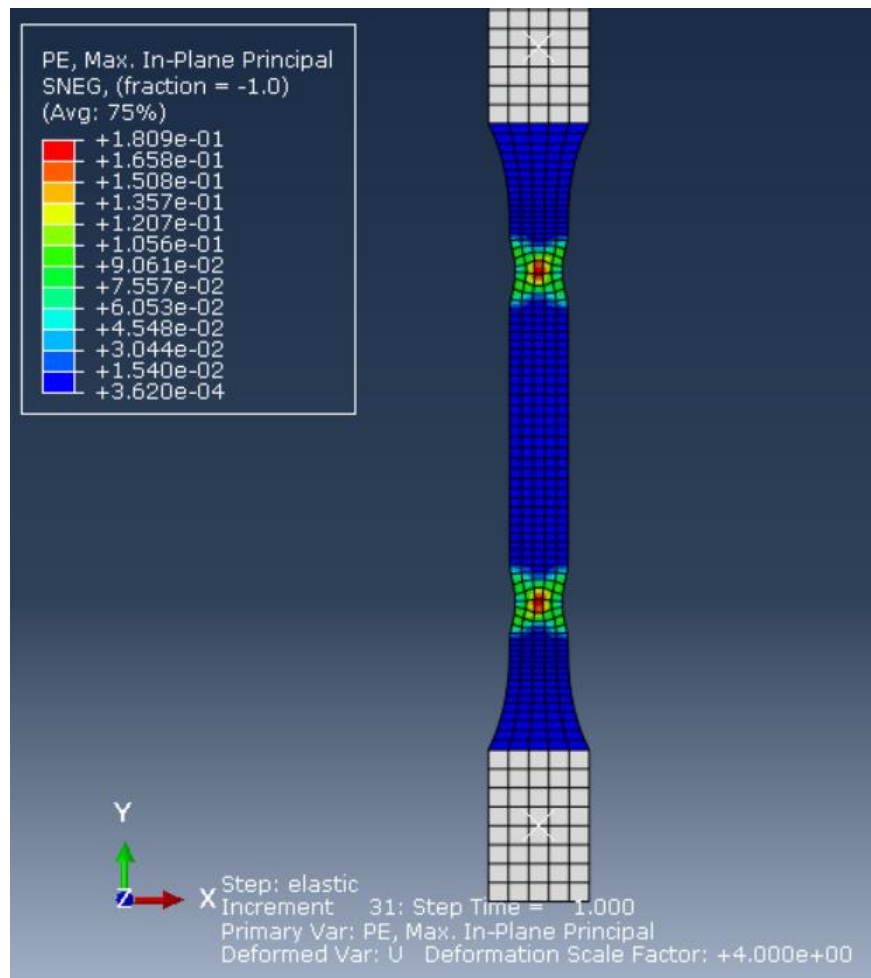


Figura 6-6 Utilización de un factor de escalado de la deformación de la probeta

La comprobación de la veracidad del análisis se realizará mediante la comparación de los resultados numéricos que se han obtenido y los resultados experimentales. Estos últimos se han obtenido mediante la media de los resultados recopilados en el apartado 4.2. como se muestra en la Figura 6-7.

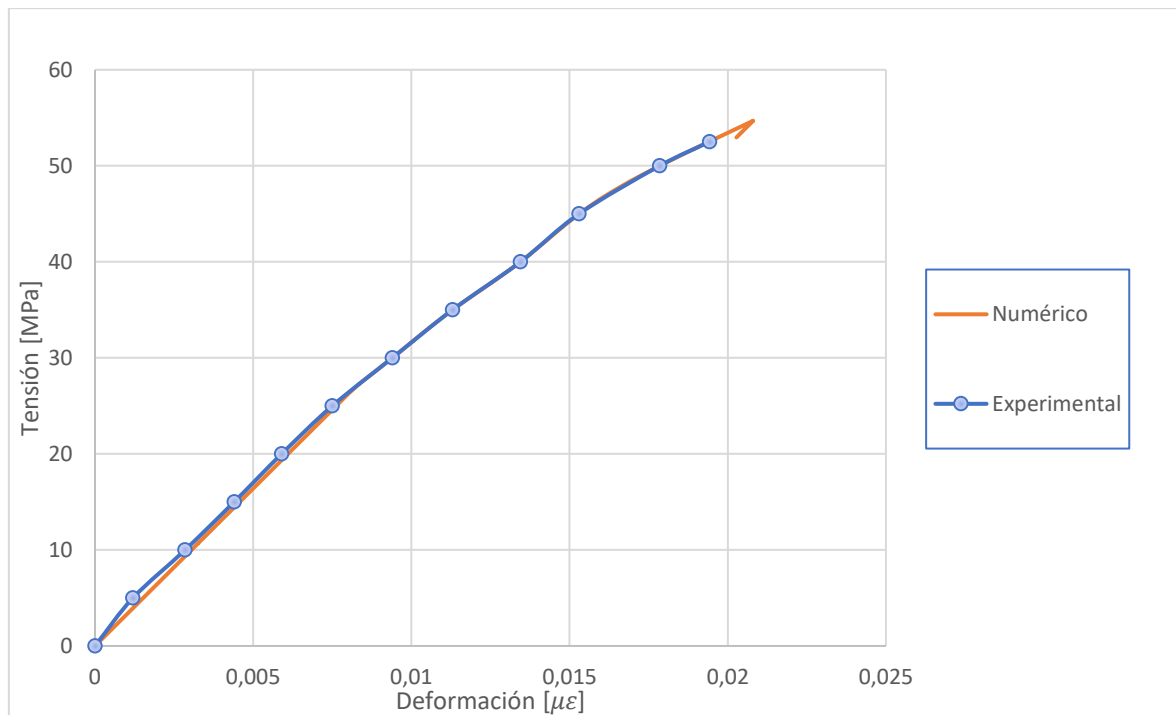


Figura 6-7 Comprobación ensayo numérico para el PLA a 0°

Se comprueba que los resultados se ajustan prácticamente por completo al ensayo experimental por lo que se valida el modelo numérico para orientación de 0 grados. Por otro lado, la curva del ensayo numérico sobrepasa la curva experimental, por lo que habrá que hacer uso del criterio de rotura para conocer el estado último de la probeta.

Para ello habrá que comprobar cuál es el punto de máxima tensión de la probeta simulada, donde se hará uso de una secuencia de imágenes del campo de deformaciones totales y del criterio de rotura de Tsai-Hill, proporcionando el progreso del estado de fallo.

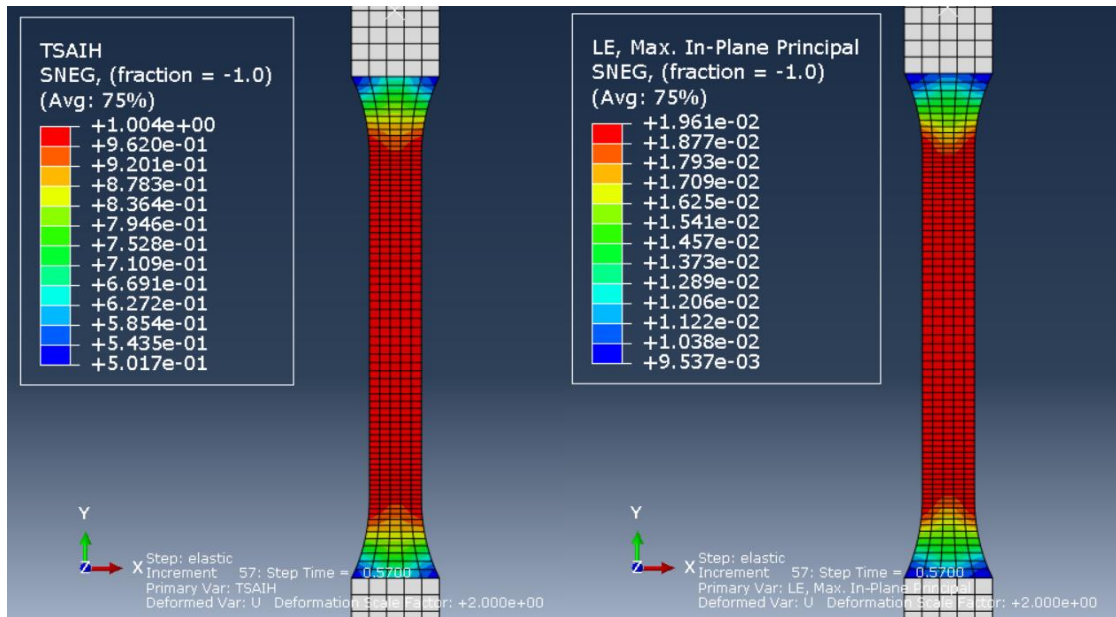


Figura 6-8 Secuencia 1

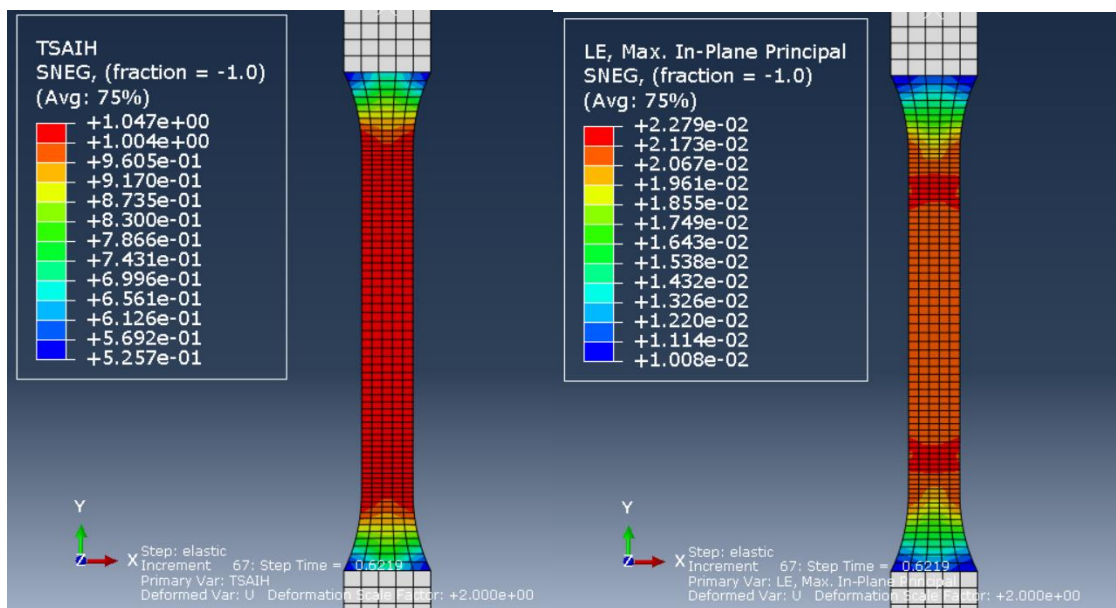


Figura 6-9 Secuencia 2

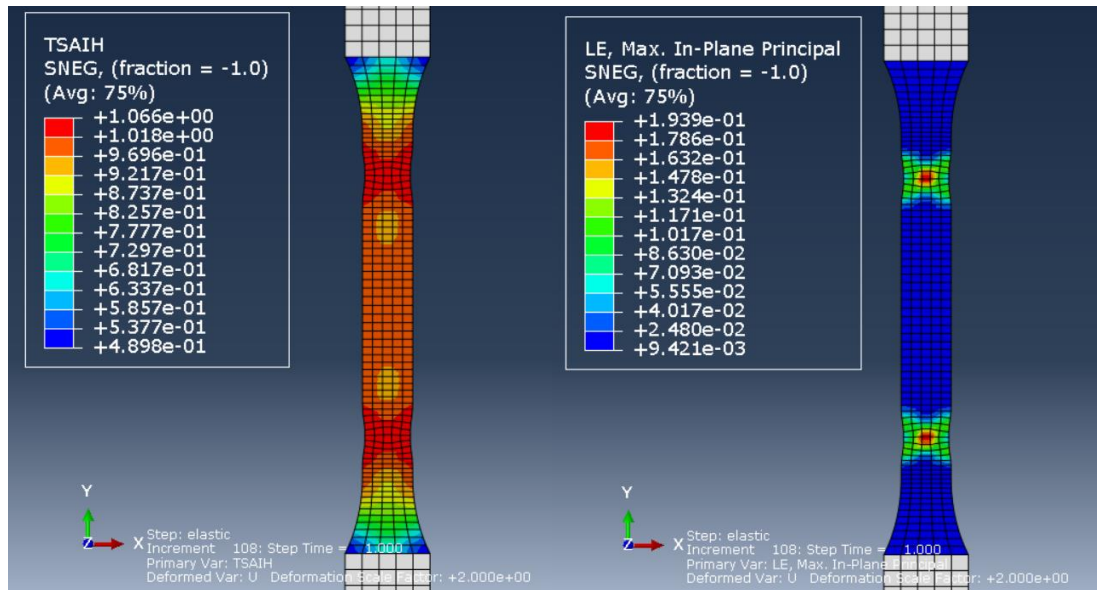


Figura 6-10 Secuencia 3

Secuencia de imágenes 6-1 Evolución del criterio de rotura y deformación total del elemento

La pieza entra en régimen de fallo para una deformación total de $0.019\mu\epsilon$ (Figura 6-8) en el incremento 57 de la simulación, estando el criterio de rotura de manera homogénea en prácticamente toda la probeta. Esto es debido a que por la geometría de la pieza (mismo espesor dentro de la zona estrechada) la rotura puede ocurrir en cualquier parte de esta zona, donde al ser un criterio de rotura sin degradación del material, el análisis tomará un criterio dúctil, continuando su deformación hasta que termine la carga simulada. Es vital conocer este comportamiento de la simulación ya que a partir de la secuencia 1 (Figura 6-8) se está analizando un estado que no es propio del material. Aun así, se ha representado dos secuencias más para proporcionar al lector información de cómo se concentran las deformaciones plásticas cuando se trabaja con un programa de simulación numérica, repercutiendo notablemente en el criterio de rotura del material. A partir de la secuencia 1 (Figura 6-8) las deformaciones empiezan a concentrarse al reducirse el espesor de la pieza debido a las estricciones causadas (Figura 6-9), donde aún el criterio de fallo de Tsai-Hill es bastante homogéneo en la zona estrecha de la pieza. Finalmente se aprecia que las deformaciones en la zona crítica son mucho más elevadas que en el resto de la pieza, indicando el criterio de rotura empleado por dónde rompe la probeta (Figura 6-10).

La importancia de la anterior secuencia radica en el inicio de rotura (Figura 6-8), ya que es ésta la que nos muestra los resultados de la tensión última del material. Después de ese instante la pieza romperá de manera frágil.

Por tanto, se concluye que la información que muestran las Figuras 6-3, 6-4, 6-5, 6-6, no son fieles al ensayo experimental, pues muestran el estado de la pieza para la última secuencia de la simulación, esta es, el desplazamiento total impuesto en el módulo de carga, la cual sobrepasa al estado último de la probeta real. A continuación, se muestra en las Figuras 6-11 y 6-12 el contorno de tensiones y deformaciones plásticas del incremento 57 para el estado último de la pieza considerando el criterio de rotura.

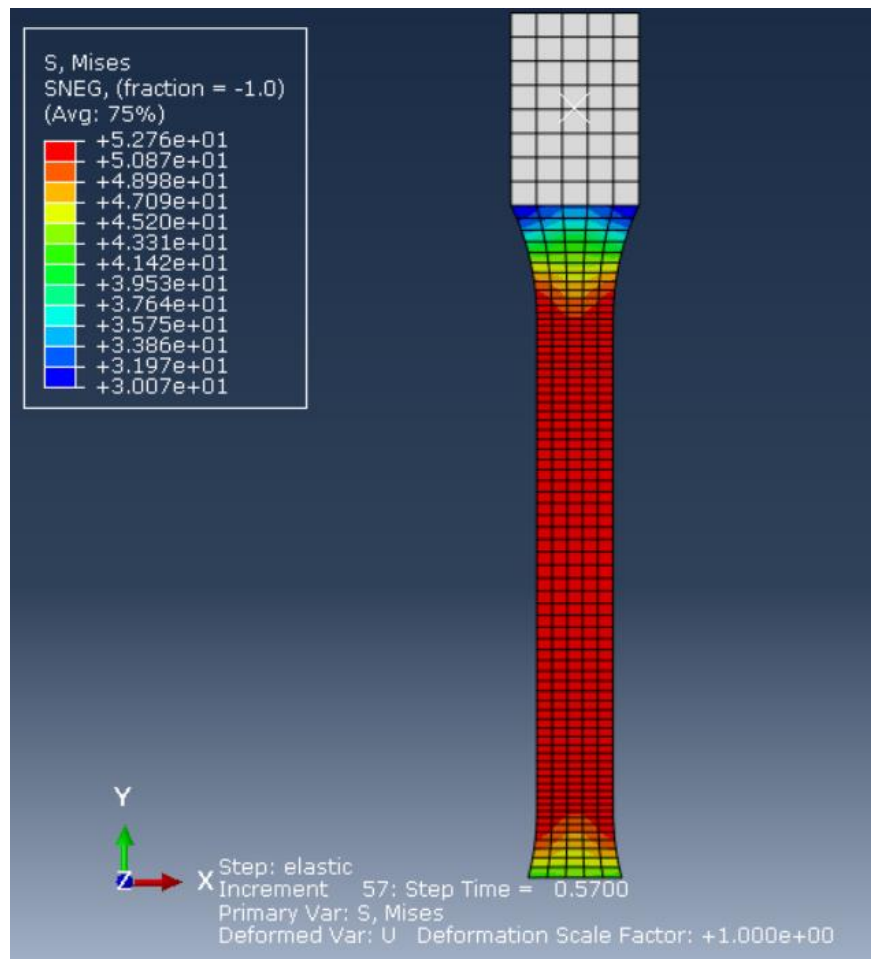


Figura 6-11 Contorno de tensiones para el incremento de fallo para PLA 0°

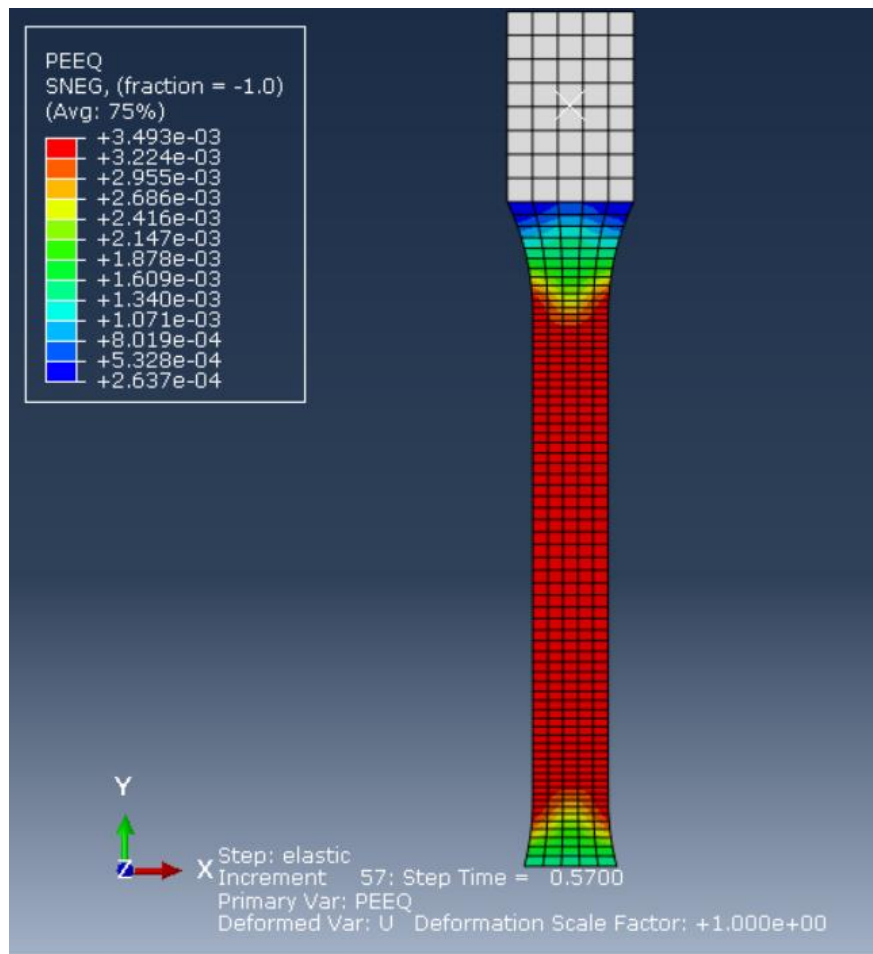


Figura 6-12 Contorno de deformaciones plásticas para el incremento de fallo para PLA 0°

Se ha actualizado la Figura 6-7 para definir el criterio de rotura de la curva simulada, obteniendo así la Figura 6-13, donde se comprueba que el criterio utilizado corrobora fielmente los resultados simulados comparados con los experimentales.

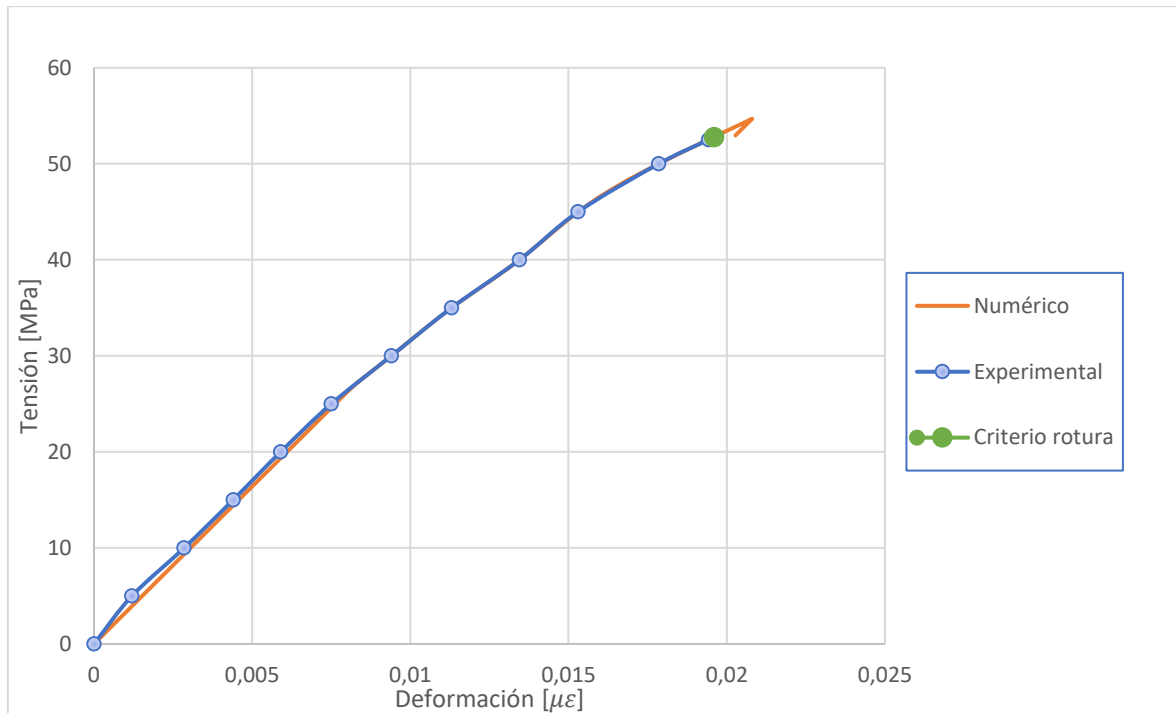


Figura 6-13 Introducción del criterio de rotura a la curva del ensayo numérico, coincidiendo éste con la tensión última del ensayo experimental

En la Figura 6-13 se aprecia que para la curva del ensayo numérico cuando alcanza la tensión máxima, ésta toma un pico y se descarga, disminuyendo su deformación y tensión. Esto es debido a la metodología de obtención de datos, ya que se ha usado un elemento nodal centrado como se muestra en la Figura 6-14. Llegado a un punto (pico de tensión máxima), las tensiones se concentran en la zona de rotura al deformarse plásticamente esta zona, por lo que el resto del material se descarga ligeramente. Esto es debido únicamente en el ensayo numérico por la propiedad dúctil que ya se ha mencionado, por consiguiente, al no llegar el interés del estudio hasta ese punto (el límite de rotura se alcanza antes), todo este tramo es despreciado.

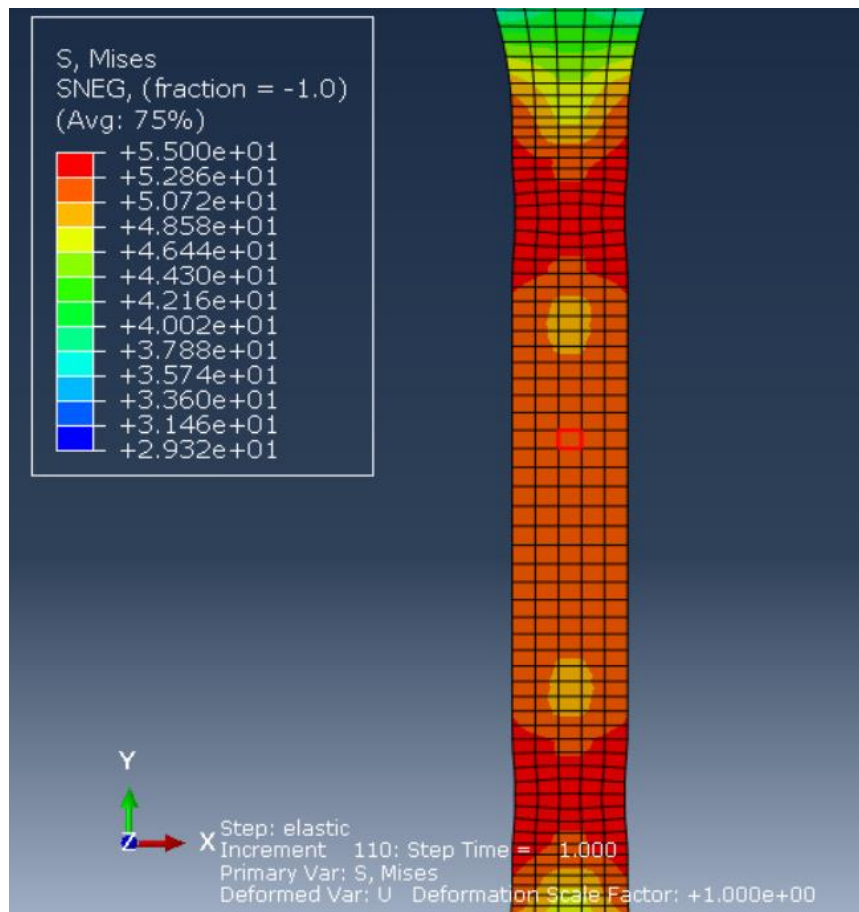


Figura 6-14 Representación del elemento escogido para la creación de la curva tensión-deformación

Para los posteriores resultados se hará uso directo del criterio de rotura para analizar exclusivamente el incremento donde sucede la tensión última de rotura del material.

Los datos del punto último considerado por el criterio de Tsai-Hill se muestran en la tabla 6-3.

Deformación [$\mu\epsilon$]	Tensión [MPa]
0.01961	52.76

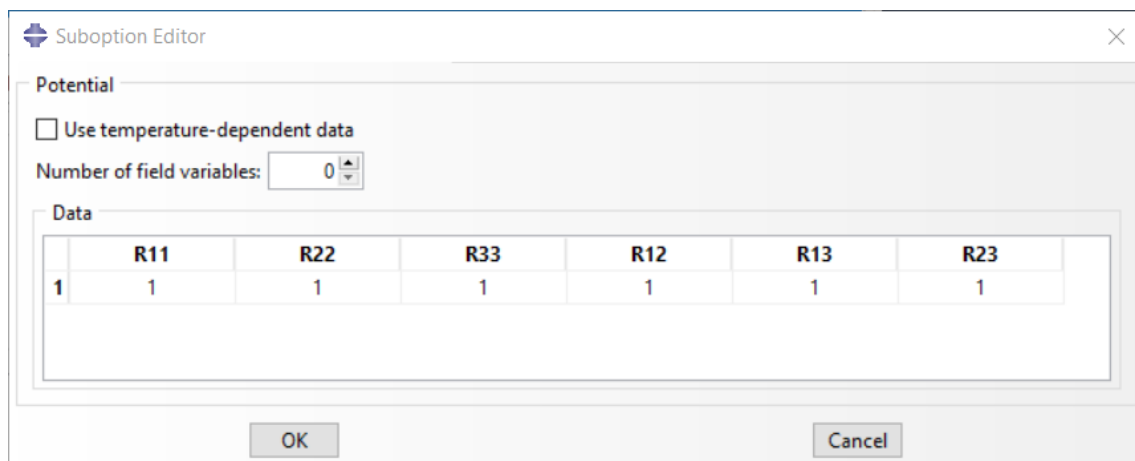
Tabla 6-3

6.2. PLA orientación 90°

El coeficiente de anisotropía que se modificará y el valor que toma queda expresado en la ecuación 56.

$$R_{22} = \frac{\sigma_{22}}{\sigma^0} = \frac{26.78}{26.78} = 1 \quad (56)$$

En el caso del PLA se ha comprobado de manera experimental que tiene unos límites de fluencia muy similares entre sí para orientaciones de 0 y 90 grados, por lo tanto, para el presente estudio se ha simplificado al mismo límite, caracterizando la regla potencial mediante los distintos parámetros como muestra la Figura 6-15.



Suboption Editor

Potential

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data

	R11	R22	R33	R12	R13	R23
1	1	1	1	1	1	1

OK Cancel

Figura 6-15 Definición Ley potencial para caracterización plástica ortótropa del material

La tensión de rotura última se conocerá a partir de la secuencia de imágenes 6-2.

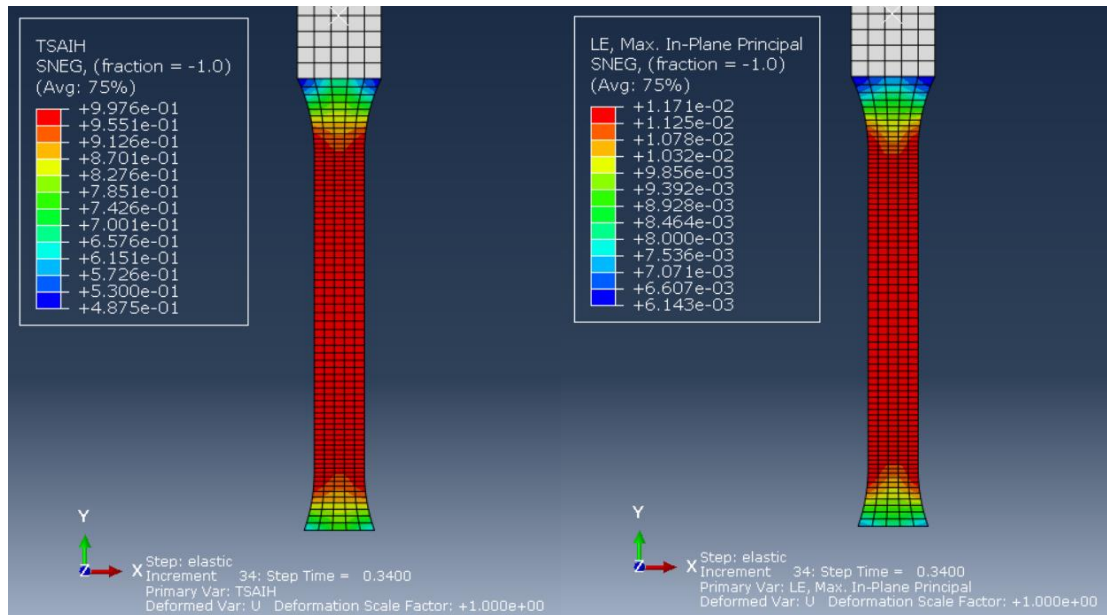


Figura 6-16 Secuencia 1

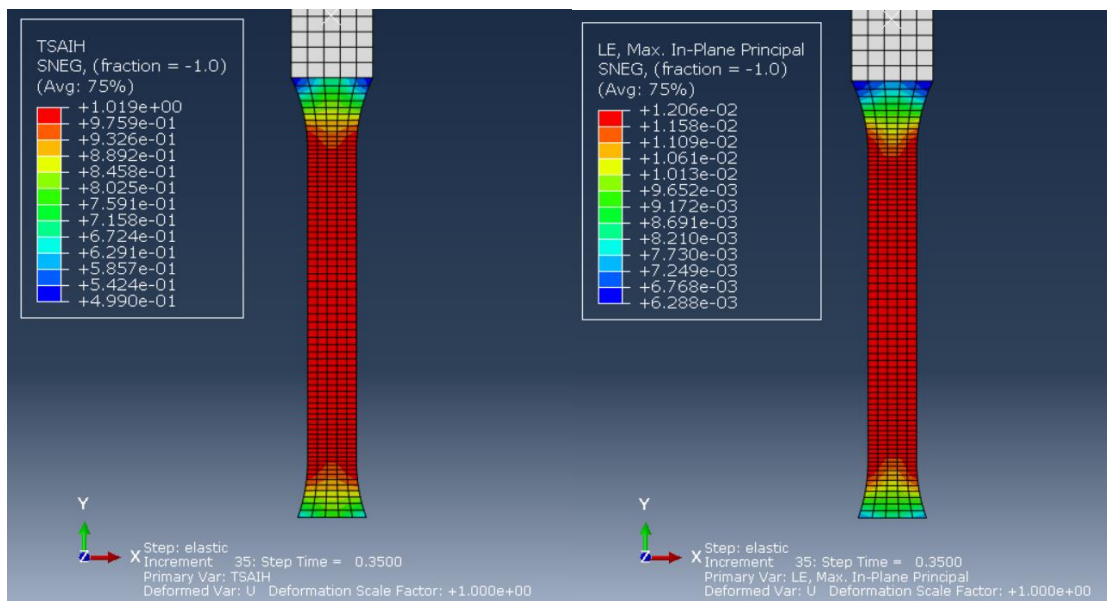


Figura 6-17 Secuencia 2

Secuencia de imágenes 6-2 Análisis del estado último del material para PLA 90°

El material estando en régimen plástico (Figura 6-16) alcanza el límite de rotura en el incremento 35 de la simulación (Figura 6-17) para una deformación total de $0.012 \mu\epsilon$. Por tanto, el contorno de tensiones y deformaciones plásticas que lo definen se muestran en las Figuras 6-18 y 6-19.

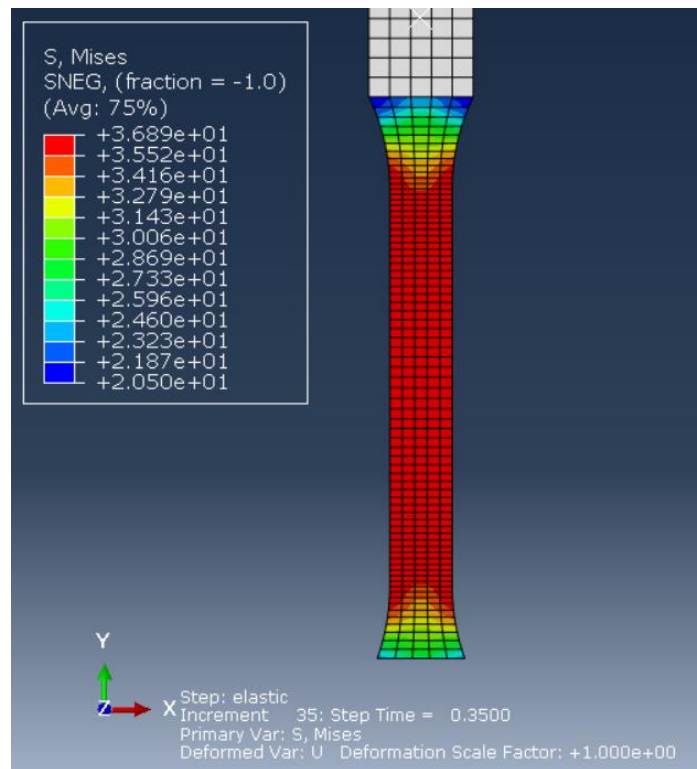


Figura 6-18 Contorno de tensiones para el incremento de fallo para PLA 90°

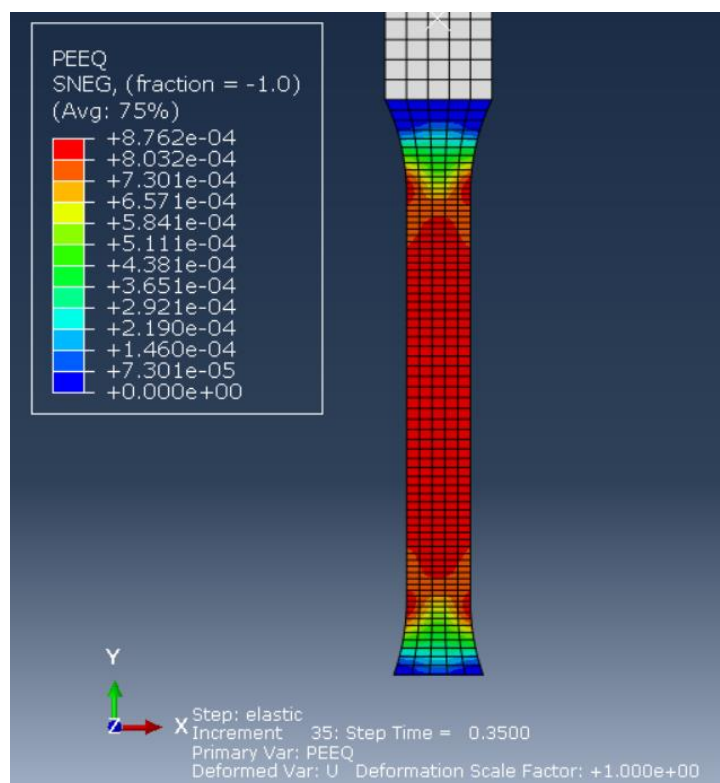


Figura 6-19 Contorno de deformaciones plásticas para el incremento de fallo para PLA 90°

La Figura 6-20 muestra la gráfica que compara el ensayo experimental con el ensayo numérico, añadiendo el punto de rotura para este último.

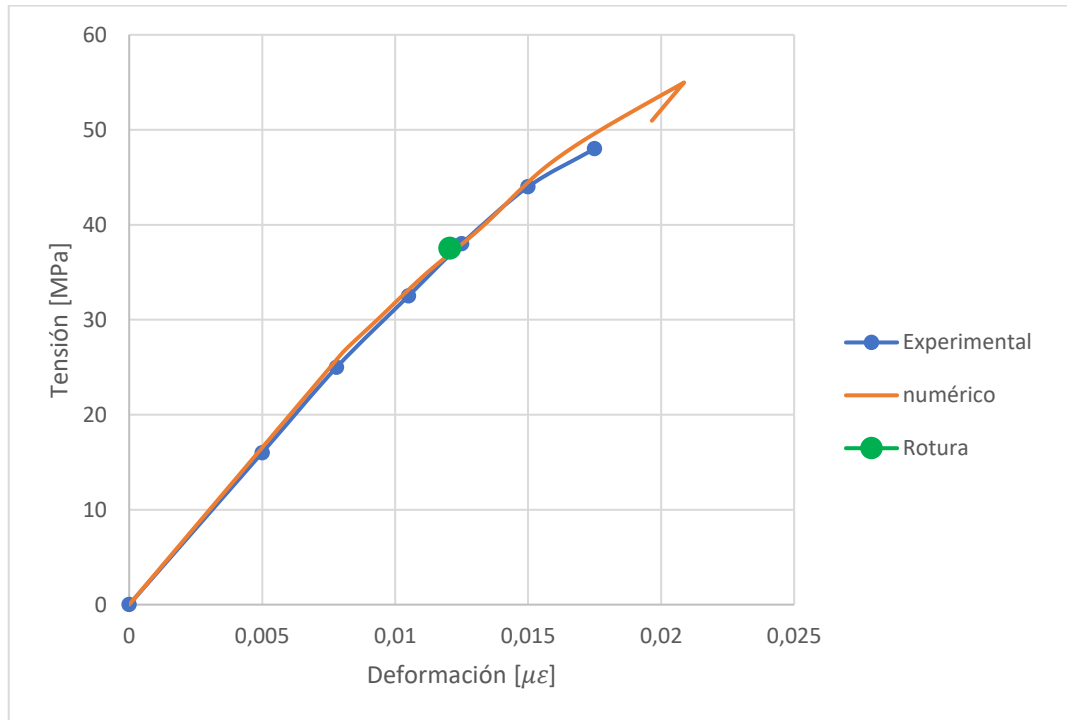


Figura 6-20 Comparación ensayo numérico y experimental para PLA 90°

En esta gráfica se muestra que la tensión última simulada mediante el criterio de rotura no coincide con la experimental, sino que es inferior a ésta última. Esto es debido a que en el ensayo experimental el principal problema que se interpuso fue la rotura de las probetas a causa de la adherencia de las láminas que lo conformaban [30], el cual no se tiene en cuenta en el presente trabajo. Este motivo dio resultados muy dispares entre sí donde la determinación de unos valores únicos se llevó a cabo mediante la media de los distintos ensayos. Este defecto se aprecia en la Figura 4-5, donde las curvas tensión-deformación de las 5 probetas ensayadas experimentalmente alcanzan distintos criterios de rotura.

Los datos del punto último considerando el criterio de rotura se muestran en la tabla 6-4.

Deformación [$\mu\epsilon$]	Tensión [MPa]
0.0121	37.5

Tabla 6-4

6.3. ABS orientación 0°

Las propiedades que definen al material quedan expuestas en la tabla 6-5.

Propiedades ABS	
Módulo de elasticidad longitudinal E_1 [MPa]	2044.93
Módulo de elasticidad transversal E_2 [MPa]	2018.37
Coeficiente de Poisson ν_{12}	0.3739
Módulo de cizalladura general G [MPa]	695.99
Tensión de fluencia longitudinal σ_y [MPa]	11.06
Tensión de fluencia transversal σ_y [MPa]	10.52
Tensión de rotura longitudinal σ_{R1} [MPa]	31.75
Tensión de rotura transversal σ_{R2} [MPa]	24.98
Tensión máxima longitudinal σ_{Max1}	37.40
Tensión máxima transversal σ_{Max2}	24.98
Desplazamiento ensayo 0 grados [mm]	3.5
Desplazamiento ensayo 90 grados [mm]	3

Tabla 6-5 Propiedades mecánicas material ABS para 0 y 90 grados [30]

El criterio de rotura marca la tensión última del material, siendo la deformación total a la que ocurre estudiada en la secuencia de imágenes 6-3.

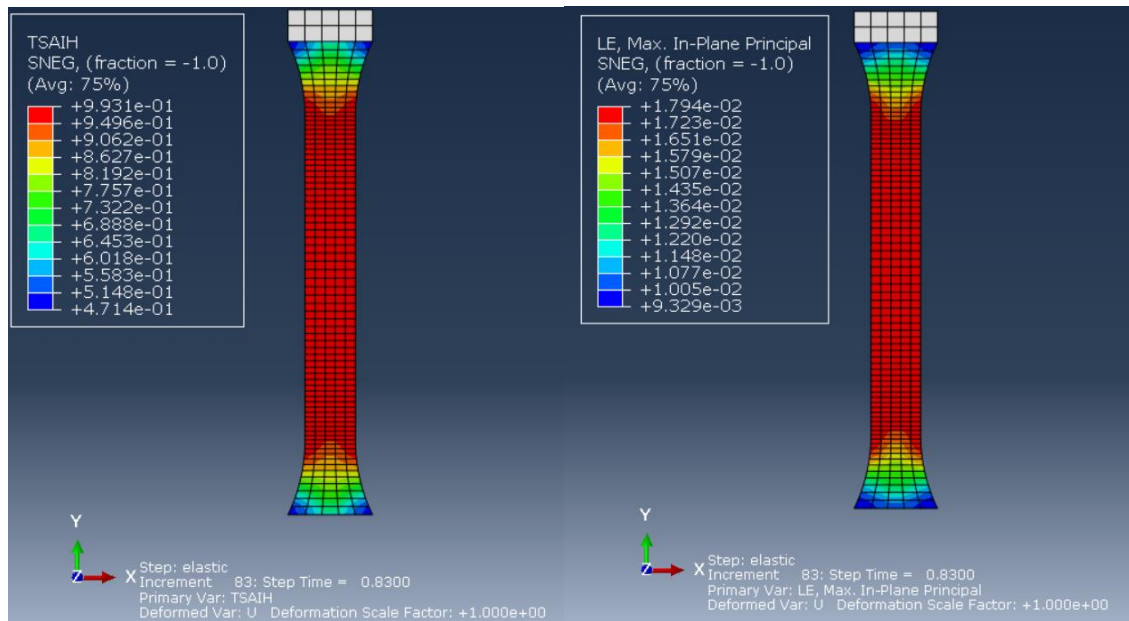


Figura 6-21 Secuencia 1

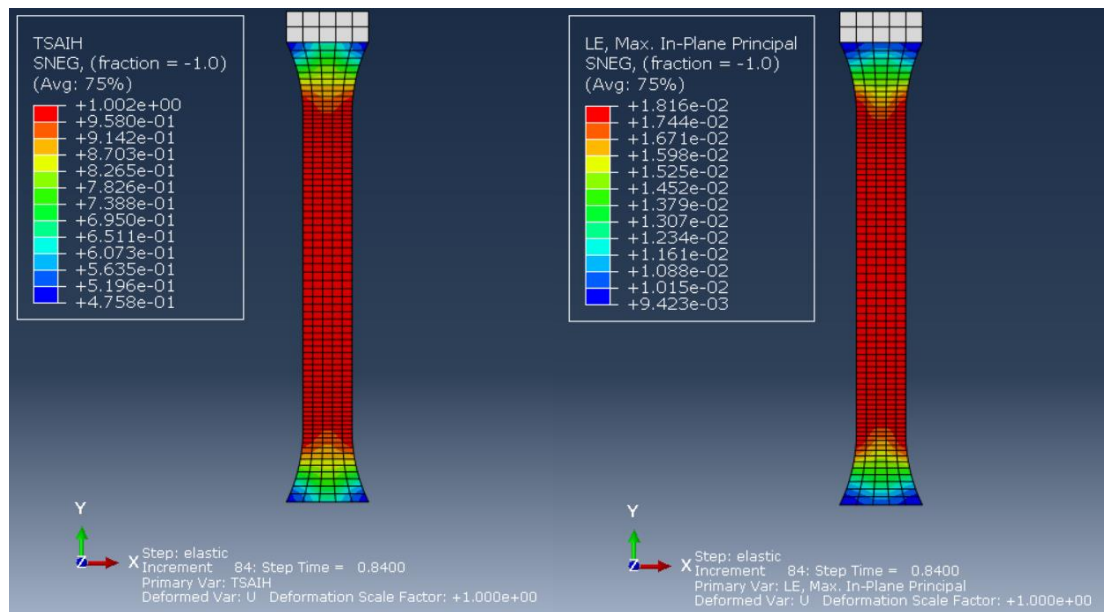


Figura 6-22 Secuencia 2

Secuencia de imágenes 6-3

El material queda en el régimen plástico en el incremento 83 (Figura 6-21), tomando valor unidad el criterio de Tsai-Hill en el incremento 84 (Figura 6-22) para una deformación total de $0.0182 \mu\epsilon$. Por tanto, se toma este incremento último como partida para el estudio del comportamiento mecánico último del material.

Los contornos de tensiones y deformaciones plásticas que definen a la probeta se muestran en las Figuras 6-23 y 6-24.

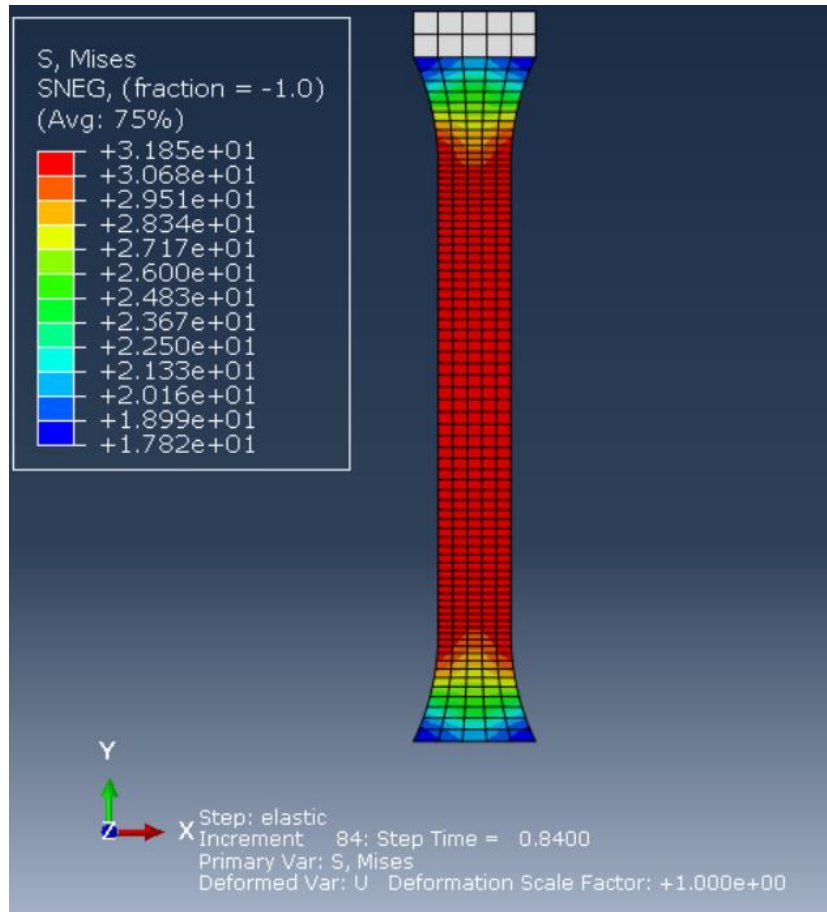


Figura 6-23 Contorno de tensiones para el incremento de fallo para material ABS orientación 0°

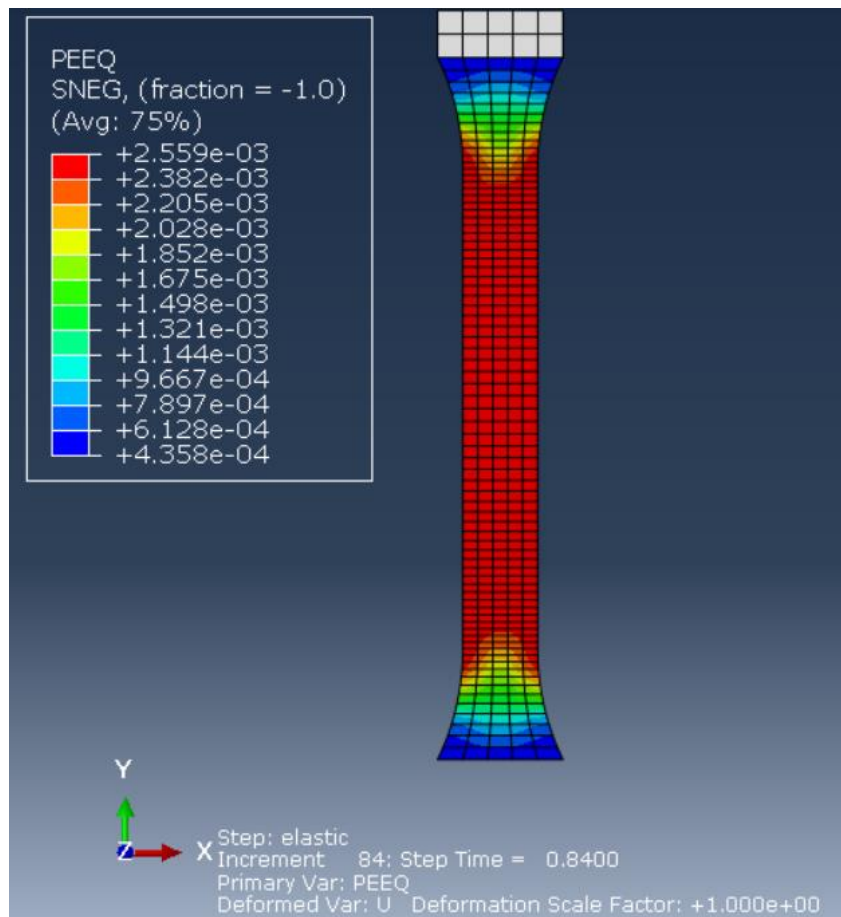


Figura 6-24 Contorno de deformaciones plásticas para el incremento de fallo para material ABS orientación 0°

La Figura 6-25 muestra la validación del ensayo numérico comparándolo con los resultados experimentales, añadiendo la curva tensión-deformación y punto último de la misma.

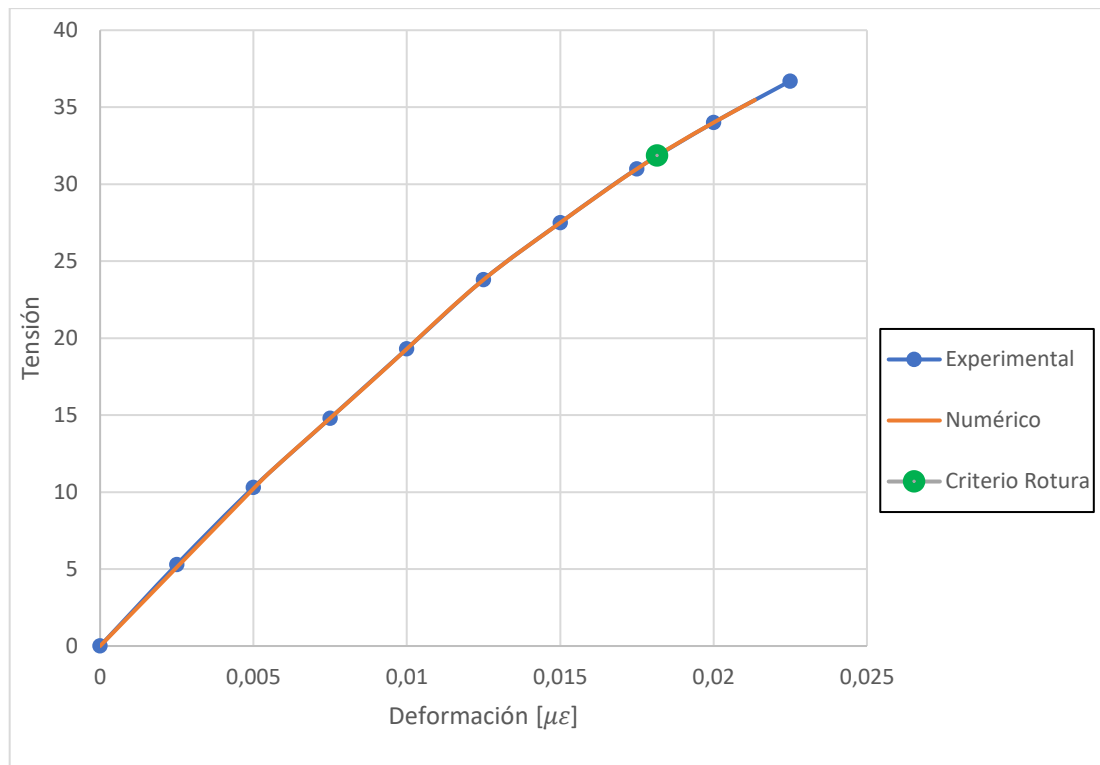


Figura 6-25 Comparación ensayo numérico y experimental para ABS 0°

En este caso la curva simulada se ajusta perfectamente a la numérica, sin embargo, el criterio de rotura de la simulación no se ajusta al último punto de la curva experimental. Esto es debido a que la probeta real en el ensayo de tracción sufre una rotura a 31.75 MPa (para la cual el ensayo numérico se ajusta adecuadamente), pero el material sufre una plastificación que le permite deformarse plásticamente aún después de haber superado el criterio de fallo. Por consiguiente, es capaz de resistir una carga superior a la de rotura.

El presente estudio se ha centrado en la tensión de fallo del material, es decir, la tensión en la que se presenta una fisura en la pieza, por lo que considerando este criterio la simulación puede validarse como correcta.

Los datos del punto último se muestran en la tabla 6-6.

Deformación [$\mu\epsilon$]	Tensión [MPa]
0.0182	31.9

Tabla 6-6

6.4. ABS orientación 90°

Para la determinación de la ortotropía de nuevo se ha hecho uso de los coeficientes de anisotropía de la regla potencial de Hill. Para ello se ha determinado el coeficiente que concreta las propiedades de la fibra transversal como se indica en la ecuación 57.

$$R_{22} = \frac{\sigma_{22}}{\sigma^0} = \frac{10.52}{11.06} = 0.951 \quad (57)$$

El criterio de rotura será proporcionado por la secuencia de imágenes 6-4.

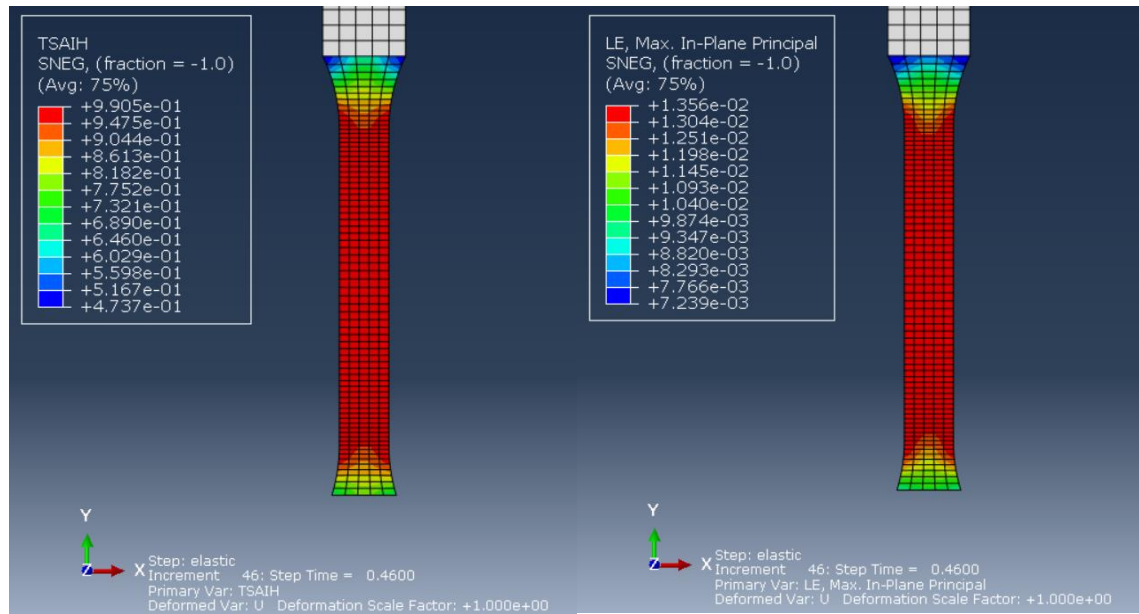


Figura 6-26 Secuencia 1

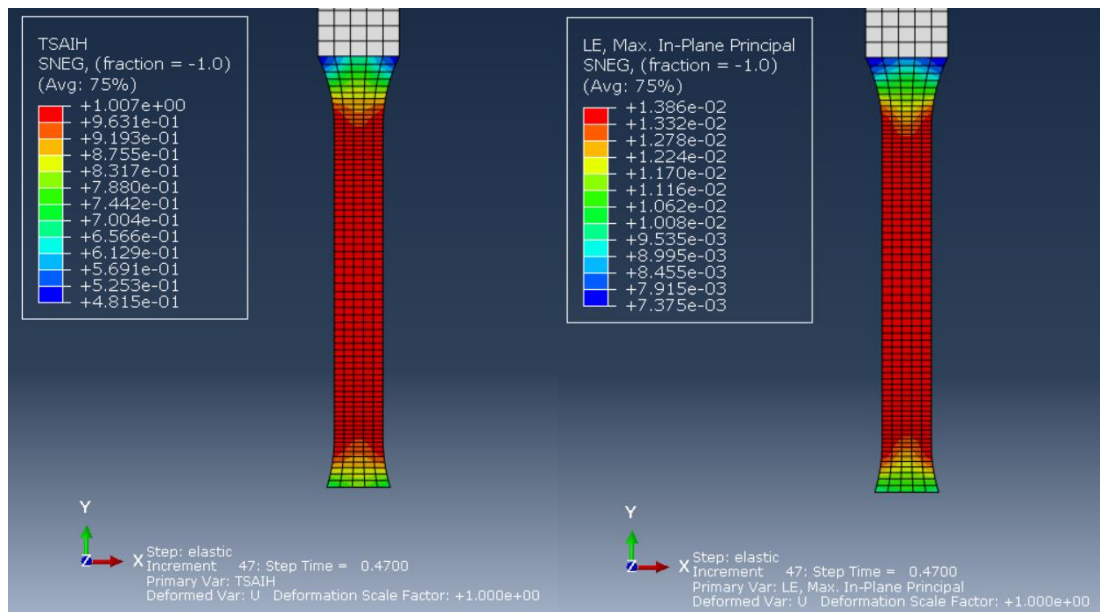


Figura 6-27 Secuencia 2

Secuencia de imágenes 6-4

La probeta trabajo en rango plástico en el incremento 46 (Figura 6-26), llegando al criterio de rotura para el incremento 47 (Figura 6-27) donde la deformación total a la que la probeta fallo será de $0.0138 \mu\epsilon$. Analizando este incremento se obtiene los contornos de tensiones y deformaciones plásticas en las Figuras 6-28 y 6-29.

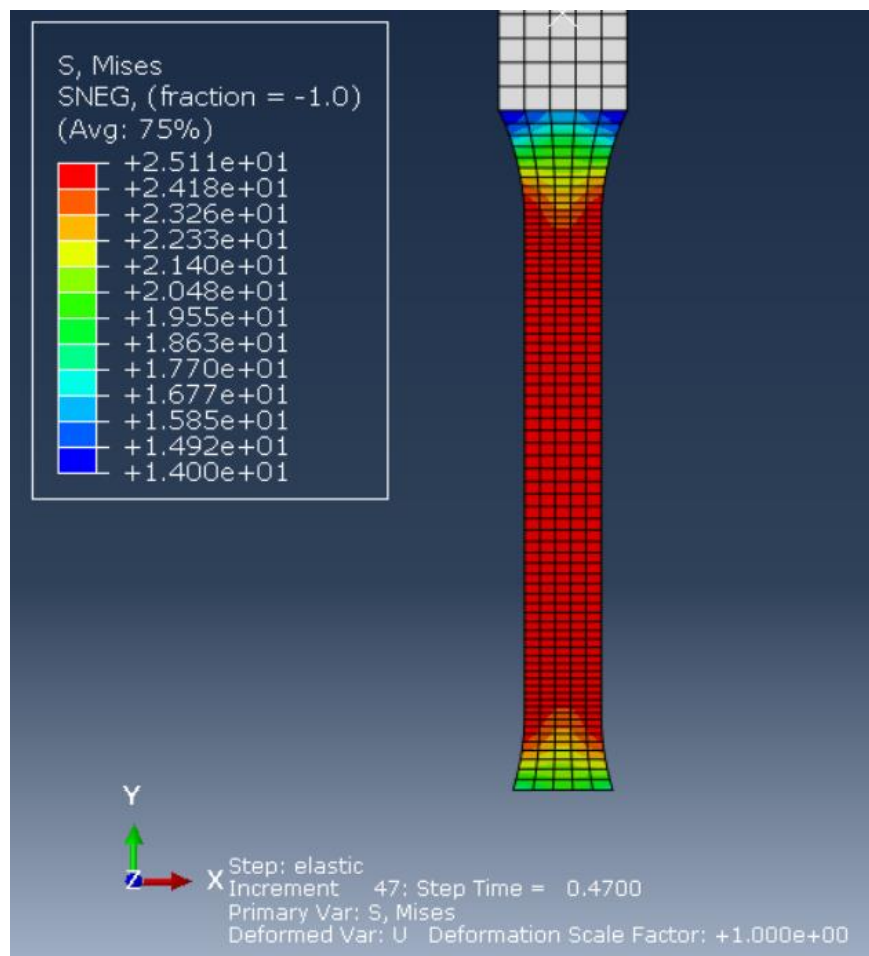


Figura 6-28 Contorno de tensiones para el incremento de fallo para material ABS orientación 90°

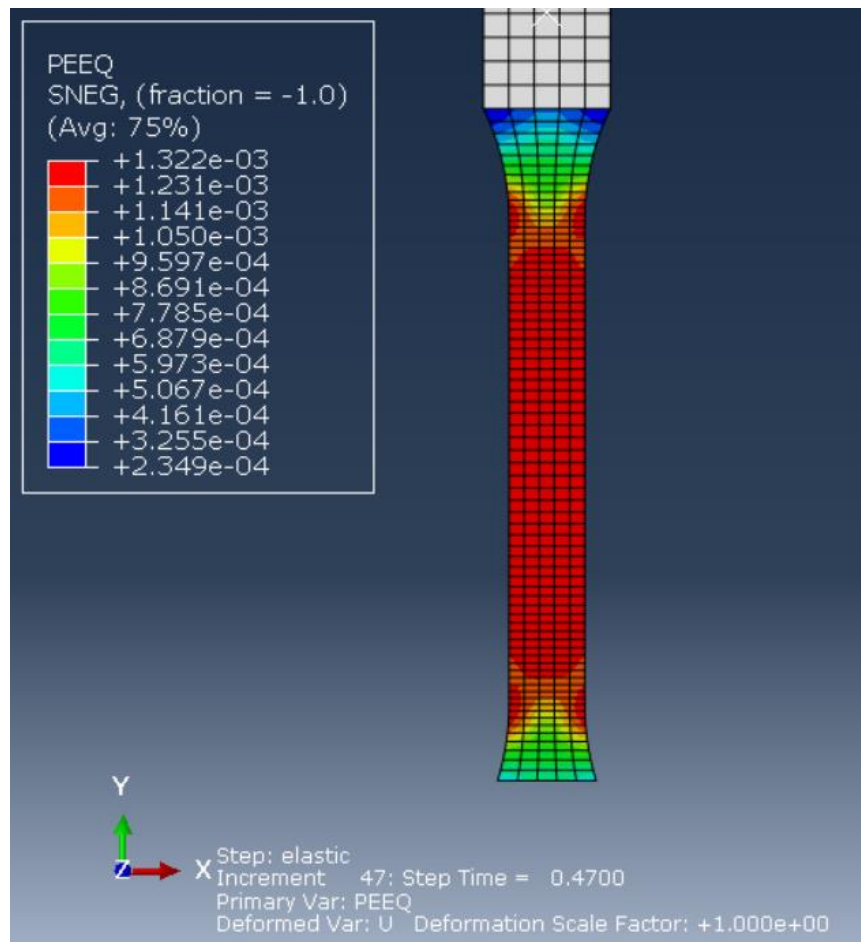


Figura 6-29 Contorno de deformaciones plásticas en el incremento de fallo para material ABS orientación 90°

La comprobación del análisis se muestra en la Figura 6-30 mediante la comparación de este con el ensayo experimental.

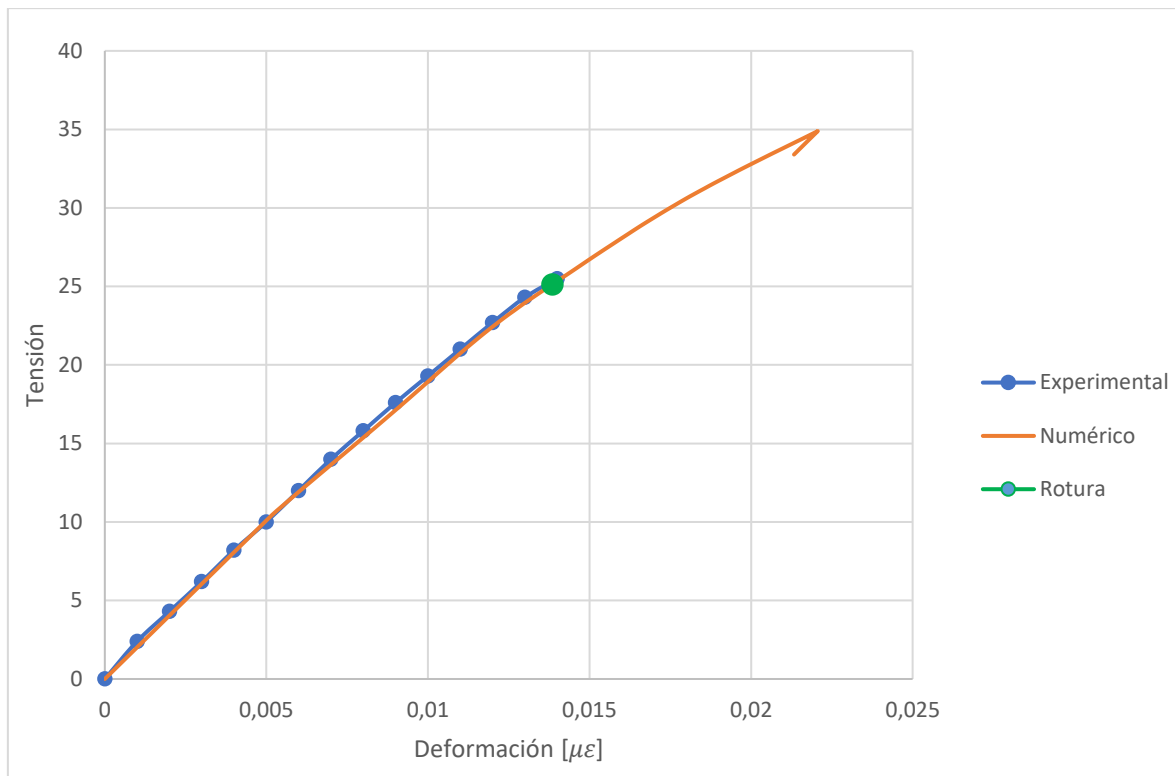


Figura 6-30 Comparación ensayo numérico y experimental para ABS 90°

Para orientación de 90 grados el ensayo numérico se ajusta en su totalidad al ensayo experimental, superponiéndose ambas curvas y tomando como punto último en la simulación prácticamente el mismo que en la parte experimental.

Los datos del punto último de la curva del ensayo simulado se representan en la tabla 6-7.

Deformación [$\mu\epsilon$]	Tensión [MPa]
0.0182	31.9

Tabla 6-7

7. CONCLUSIONES

El objetivo del presente trabajo ha sido realizar un modelo numérico para polímeros usados en impresión aditiva, donde se han analizado los distintos modelos existentes y elegido según los parámetros pertinentes el más adecuado para este caso. De todo el trabajo recopilado se pueden sacar varias conclusiones que lo resumen de la siguiente manera:

- La fabricación aditiva está abriendo una nueva etapa en el ámbito industrial por sus múltiples ventajas. El ser un tipo de tecnología aún joven, genera una serie de inconvenientes debidas a la novedad y al desconocimiento.
- Las propiedades anisótropas de una pieza fabricada mediante impresión aditiva son similares a las de piezas de materiales compuestos laminares, por tanto, el estudio teórico y numérico pueden realizarse apoyándose en la teoría que existe para este último caso.
- Actualmente existen distintas maneras de llevar a cabo el estudio numérico elastoplástico y fallo de materiales con alto nivel de anisotropía, donde en el presente trabajo se ha hecho una recopilación de las distintas maneras de abordar el problema propuestas por diversos autores.
- Abaqus tiene implementado diversos modelos para la caracterización de materiales compuestos como el Drucker-Prager extendido, pensado inicialmente para modelos geotécnicos y posteriormente para polímeros y materiales compuestos.
- Se ha utilizado el modelo de Drucker-Prager para la modelización elastoplástica del material, donde se ha utilizado referencias bibliográficas para determinar los parámetros necesarios, pero mostrando diferencias respecto a los ensayos experimentales debido a la necesidad de realizar un ensayo triaxial para la determinación del endurecimiento isótropo
- El modelo constitutivo de Von Mises para materiales isótropos está inicialmente pensado para metales, pero según la bibliografía consultada es válido también para materiales poliméricos [24], además de ser un modelo más simple que permite realizarse con los de los que sí se disponen en este trabajo.

- La ortotropía del material se ha definido mediante una regla potencial de Hill, con unos coeficientes que modifican las propiedades del material para distintas orientaciones.
- Para el criterio de fallo en principio se estudió el modelo de Hashin al ser el más empleado para materiales compuestos, ya que permite caracterizar el material a tracción y compresión por separado. Se desechó este modelo ya que el comportamiento del material no dañado debe ser definido mediante un modelo elástico lineal.
- Se han utilizado el criterio de Tsai-Hill que es un indicador de fallo sin degradación del material.
- Los materiales estudiados han sido PLA y ABS con orientaciones de fibras a cero y noventa grados. La determinación de estas orientaciones en el preprocesado es rápida, habiendo predefinido un eje de coordenadas local, con el eje principal en dirección de las fibras a cero grados.
- Se ha realizado un proceso iterativo para el mallado de la pieza, analizando las regiones de interés y mallando en estas zonas de manera más final.
- Los resultados numéricos para cada simulación se han contrastado con los ensayos experimentales, obteniendo buenas similitudes y corroborando el trabajo llevado a cabo.
- En la simulación del material PLA a 90 grados se han encontrado las principales diferencias, debidas a que en el ensayo experimental las probetas fallaron por la delaminación de las capas del material, en vez de por su comportamiento mecánico.
- Debido al criterio de rotura empleado el material toma en todo el análisis un comportamiento dúctil, por consiguiente, se deben recopilar los resultados de la simulación en el incremento donde el material falla, siendo éste donde el criterio de Tsai-Hill toma valor la unidad.
- El material ABS con orientaciones de sus fibras a 0 grados tiene un comportamiento real frágil, pero cuando empieza a romper se deforma plásticamente, soportando más carga hasta fallar por completo. En la simulación se ha considerado el inicio de rotura como criterio de fallo despreciando la plasticidad generada después, siendo éste criterio más conservador.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Fundación Cotec, “Fabricación aditiva”. ISBN: 987-84-92933-15-0. 2011.
- [2] Página web cadtech. <https://cadtech.es/reinventar-la-fabricacion-aditiva-la-simulacion/> Accedido en Julio de 2018
- [3] Página web interempresas <https://www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/Articulos/210048-Simulacion-y-fabricacion-aditiva-el-futuro-es-colaborativo.html> Accedido en Julio de 2018
- [4] Apuntes asignatura Métodos Avanzados en Diseño Mecánico. Grado en Ingeniería Mecánica
- [5] Nápoles, E., González, R., Olivares, E. “Una introducción al análisis por elementos finitos” , disponible en https://www.researchgate.net/publication/283151622_Una_introduccion_al_Analisis_por_Elementos_Finitos_aplicaciones_y_ejemplos.html
- [6] Cook, R., Malkus, D., Plesha, M. & Witt, R. (2001). “Concepts and applications of finite elements analysis”. New York: John Wiley & Sons.
- [7] Zienkiewicz, O. & Taylor, R. (2005). “The finite element method for solid and structural mechanics”. Oxford: Butterworth-Heinemann
- [8] Turner, M.J. [et al.]. “Stiffness and deflection analysis of complex structures”. Journal of Aeronautical Sciences. 1956, vol. 23, nº 9, p. 805-824.
- [9] Abaqus Analysis User’s manual. V 2016
- [10] Página web bibing <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70238/fichero/Capitulo+3.pdf> Accedido en Julio de 2018
- [11] Luccioni, Bibiana M.; Martín, P. E.. "Modelo elastoplástico para materiales ortótropos". Revista internacional de métodos numéricos, 1997, Vol. 13, núm. 4

[12] Robert Sayre III. “A Comparative Finite Element Stress Analysis of Isotropic and Fusion Deposited 3D Printed Polymer”. Rensselaer Polytechnic Institute Hartford, Connecticut December, 2014

[13] James, F., “Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros”. Edición 6. Madrid: Prentice Hall. 2005

[14] Puigoriol, J. “Una metodología para caracterización elastoplástica cuasi-estática simplificada de materiales termoplásticos inyectados en proceso industrial para simulación estructural”. Tesis doctoral, Universitat Ramon Llull

[15] Car, E., Oller, S., Oñate, E., “Tratamiento Numérico de los Materiales Compuestos” Primera edición. Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, 2000.

[16] Miravete, A., “Materiales compuestos I”. Barcelona: Editorial Reverté, 2007

[17] Apuntes asignatura Elasticidad 2. Grado en Ingeniería Mecánica

[18] Página web bibing

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70085/fichero/tesis+Master+Daniane%252F08+plasticidad+teoria.pdf>

[19] De la Rosa, A., “Ajuste del modelo de Drucker-Prager extendido para la simulación de la respuesta mecánica de un vertisol mediante el método de elementos finitos”. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.

[20] Lorenzo, M., et al. “Análisis del efecto Bauschinger en aceros de alta resistencia” disponible en https://www.researchgate.net/publication/238767756_ANALISIS_DEL_EFECTO_BAUSCHINGER_EN_ACEROS_DE_ALTA_RESISTENCIA

[21] Abaqus Theory Guide. V 2016

[22] Ortiz, L., “Elasticidad”. Tercera edición. Aravaca (Madrid): McGraw-Hill. 1998

[23] Payandehpeyman, J., Hossein, G., Bagueri Reza., “Determination of the extended Drucker-Prager parameters using the surrogate-based optimization method for polypropylene nanocomposites”. The journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2016, 51 (3), 220-232.

[24] Puigoriol, J., “Una caracterización elastoplástica de materiales poliméricos inyectados en proceso industrial para simulación estática estructural” disponible en: https://www.researchgate.net/publication/267095050_Una_caracterizacion_elastoplastica_de_materiales_polimericos_inyectados_en_proceso_industrial_para_simulacion_estatica_e_structural

[25] Hashin, Z., Rotem, A., “A Fatigue Criterio for Fiber Reinforced materials” J. Comp. Mat., 1973

[26] Hashin, Z., “Failure Criterio for Unidirectional Fiber Composites” J. of Applied Mechanics, 1980.

[30] Quevedo, F., “Parametrización mecánica de materiales para impresión 3D” Trabajo final de Grado. Escuela Politécnica Superior de Linares.

[31] UNE-EN ISO 527. Determinación de las propiedades en tracción. ISO 527:2012. Noviembre 2012.

[32] UNE 116005:2012. Fabricación por adición de capas en materiales plásticos. Fabricación aditiva. Preparación de probetas. Abril 2012

[33] Dean, G., Wright, L., “An evaluation of the use of finite element analysis for predicting the deformation of plastics under impact loading” Polym Test, 2003, 22 (6), 625-631

[34] UNE-EN ISO 6892. materiales metálicos en ensayo de tracción. ISO 6892:2009

[35] UNE-ISO 5893 Aparatos de ensayo para plásticos y caucho. Tipos para ensayos de tracción, flexión y compresión (a velocidad de desplazamiento constante). Especificaciones. ISO 5893:2012

[36] Suárez, F., "Estudio de la rotura en barras de acero. Aspectos experimentales y numéricos". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.