

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería de Tecnologías Industriales

Evaluación experimental de la influencia de las tensiones residuales en la iniciación de grietas en laminados cruzados de material compuesto

Autor: Jaime Gutiérrez García

Tutor: Israel García García

Vladislav Mantič Leščišin

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de Tecnologías Industriales

Evaluación experimental de la influencia de las tensiones residuales en la iniciación de grietas en laminados cruzados de material compuesto

Autor:

Jaime Gutiérrez García

Tutor:

Israel García García

Vladislav Mantič Leščišin

Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Carrera: Evaluación experimental de la influencia de las tensiones residuales en la iniciación de grietas en laminados cruzados de material compuesto

Autor: Jaime Gutiérrez García

Tutor: Israel García García
Vladislav Mantič Leščišin

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

En primer lugar, tengo que agradecerles a mis padres todo el apoyo que me han brindado a lo largo de estos años que me ha empujado en mi trayectoria hasta el día de hoy y sin el cual probablemente no estaría escribiendo estas líneas.

Quiero agradecer también a los profesores Israel García, mi tutor, por haberme guiado a lo largo de la realización de este trabajo y por su impecable atención cada vez que requería su ayuda; y Jesús Justo por poner su conocimiento y experiencia con los materiales compuestos a mi disposición cuando más lo necesité.

A todo el personal del LERM le estoy muy agradecido por su colaboración, que ha sido clave para llevar a cabo todo el trabajo experimental del presente estudio. Mención especial merecen Antonio Cañas, cuya experiencia y cercanía han contribuido a la fluidez de todo el trabajo de laboratorio y taller; y Miguel, quien me ha amenizado las largas mañanas en la sala limpia prestándome su ayuda en todo lo que estaba en su mano.

No podía acabar sin agradecer a mis amigos, los que conocía desde del colegio y los que encontré en las aulas de la ETSI, el estar ahí siempre tanto dentro como fuera de las bibliotecas.

Jaime Gutiérrez García

Sevilla, 2019

Resumen

Los laminados cruzados de material compuesto formado por una matriz polimérica reforzada con fibras largas, por su configuración de capas con la fibra a 0° intercaladas con capas con la fibra a 90° , presentan un fuerte contraste entre sus propiedades termomecánicas en dichas direcciones entre capa y capa. Esto es debido a la ortotropía característica de este tipo de compuestos. De este modo, la configuración especialmente desfavorable mencionada provoca, según los estudios existentes en la literatura, la aparición de tensiones residuales térmicas provocadas por el curado realizado en el proceso de fabricación de estos materiales.

El presente trabajo pretende comprobar experimentalmente la influencia de las dichas tensiones residuales de curado en la iniciación de grietas en laminados cruzados de compuestos de fibra de carbono/epoxy y contrastar las predicciones de los modelos de fallo existentes.

Para llevar a cabo este estudio se han fabricado varios laminados cruzados de diferentes grosores con configuraciones semejantes, de los que se han obtenido las correspondientes probetas para ser ensayadas a diferentes temperaturas, cubriendo un rango amplio que va desde temperaturas bajo cero (en la escala Celsius), pasando por temperatura ambiente, hasta temperaturas altas que se acercan más a la de curado.

Abstract

Cross-ply composite laminates made of a polymer matrix reinforced with long fibres present a high contrast between the thermoelastic properties from one layer to another due to the configuration of layers with the fibres oriented at 0° alternated with layers with the fibres at 90° . This is caused by the characteristic orthotropy of this kind of composites. Thus, the especially unfavorable configuration mentioned before, causes the appearance of residual thermal stresses provoked by the curing process during the fabrication of this material.

The present work aims to experimentally evaluate the influence of residual thermal stresses on transverse cracking in cross-ply laminates made of carbon fibre and epoxy resin and compare the results with the ones obtained with the existing theoretical models.

To carry out this study, various cross-ply laminates of different thicknesses and similar configurations have been fabricated from which several coupons have been machined in order to be tested at different temperatures, covering a large range of them which goes from negative temperatures ($^\circ\text{C}$), going through room temperature, to higher temperatures closer to the curing temperature.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xviii
1 Introducción	1
1.1 <i>Concepto de material compuesto</i>	1
2 Antecedentes y objetivos	3
2.1 <i>Objetivos y contexto</i>	3
2.2 <i>Estructura del trabajo</i>	3
3 Fabricación de probetas	5
3.1 <i>Diseño de probetas</i>	5
3.2 <i>Materiales empleados</i>	6
3.3 <i>Proceso de fabricación</i>	6
3.3.1 <i>Corte de las láminas de prepreg</i>	7
3.3.2 <i>Apilado de las láminas</i>	8
3.3.3 <i>Fabricación de bolsa de vacío para el curado en autoclave</i>	8
3.3.4 <i>Curado en autoclave de los paneles</i>	10
3.3.5 <i>Resanado de los paneles</i>	12
3.3.6 <i>Preparación y colocación de los refuerzos de fibra de vidrio</i>	13
3.3.7 <i>Corte de las probetas</i>	14
3.3.8 <i>Trazabilidad</i>	14
4 Ensayos	17
4.1 <i>Equipo empleado</i>	17
4.2 <i>Procedimiento experimental</i>	19
4.2.1 <i>Ensayos de probetas de laminados cruzados y de laminado unidireccional</i>	19
4.2.2 <i>Ensayo de caracterización termomecánica</i>	21
5 Resultados de los ensayos	23

5.1	<i>Ensayos de tracción</i>	23
5.1.1	Ensayos de laminado unidireccional a 0°	23
5.1.2	Ensayos a rotura de laminado unidireccional a 90°	27
5.1.3	Ensayos de laminados cruzados	33
5.1.4	Ensayo de caracterización termomecánica	40
6	Comparación de resultados experimentales con modelo teórico	43
6.1	<i>Introducción al modelo teórico</i>	43
6.2	<i>Criterio de tension considerando las tensiones residuales térmicas [2]</i>	44
6.3	<i>Criterio de energía considerando las tensiones residuales térmicas</i>	45
6.4	<i>Criterio acoplado para el modelo termo-mecánico de la mecánica de la fractura finita</i>	46
6.5	<i>Comparación de resultados teóricos y experimentales</i>	47
6.5.1	Comparación para el panel de configuración [0/90/0] (n1)	48
6.5.2	Comparación para el panel de configuración [0 ₅ /90 ₅ /0 ₅] (n5)	50
6.5.3	Comparación para el panel de configuración [0 ₁₀ /90 ₁₀ /0 ₁₀] (n10)	51
7	Conclusiones y líneas futuras	53
	Referencias	55
	Anexo A: gráficas de los ensayos de las probetas de laminados cruzados	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5-1. Dimensiones de las probetas de laminado unidireccional a 0°	24
Tabla 5-2. Resultados de E11 para las probetas unidireccionales a 0°	25
Tabla 5-3. Dimensiones de las probetas de laminado unidireccional a 90°	27
Tabla 5-4. Resultados de los ensayos	29
Tabla 5-5. Resultados estadísticos de E22	30
Tabla 5-6. Resultados estadísticos de Yt	31
Tabla 5-7. Resultados estadísticos de Y ϵ t	32
Tabla 5-8. Resultados de aparición de primera grieta según ha sido detectada	34
Tabla 5-9. Resultados de deformación crítica según el criterio de grietas sucesivas	35
Tabla 5-10. Resultados de aparición de primera grieta según ha sido detectada	36
Tabla 5-11. Resultados de deformación crítica según el criterio de grietas sucesivas	37
Tabla 5-12. Resultados de aparición de primera grieta según ha sido detectada	38
Tabla 5-13. Resultados de deformación crítica según el criterio de grietas sucesivas	39
Tabla 5-14. Resultados numéricos y del cálculo de los coeficientes de dilatación térmica	41
Tabla 6-1. Propiedades del material empleado en los ensayos	47
Tabla 6-2. Comparativa de pendientes para el panel n1	49
Tabla 6-3. Comparativa de pendientes para el panel n5	51
Tabla 6-4. Comparativa de pendientes para el panel n10	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1. Esquema de la geometría de los laminados [5]	6
Figura 3-2. Algunas de herramientas empleadas en el corte y apilado de las láminas	8
Figura 3-3. Rollos de material para la bolsa. De arriba a abajo: tejido aireador, plástico y teflón	9
Figura 3-4. De izquierda a derecha: cinta sellante de cromato y separadores autoadhesivos de corcho	9
Figura 3-5. Paso 6 de la fabricación de la bolsa	10
Figura 3-6. Ciclo de curado	11
Figura 3-7. Autoclave	12
Figura 3-8. Máquina de corte empleada en el resanado y corte de las probetas	13
Figura 3-9. Paneles con los tacones colocados antes del curado	14
Figura 3-10. Bolsa de vacío para el curado del adhesivo de los tacones	14
Figura 4-1. Máquina universal de ensayos con la cámara térmica instalada	18
Figura 4-2. Extensómetro	18
Figura 4-3. Banda extensométrica pegada sobre la probeta a ensayar	19
Figura 4-4. Banda extensométrica instalada y conectada al puente de Wheatstone para la medición de microdeformaciones	21
Figura 4-5. Horno utilizado para la caracterización termomecánica	22

Figura 5-1. Curvas σ - ϵ correspondientes a las probetas de laminado unidireccional a 0°	24
Figura 5-2. Resultados estadísticos de E11	26
Figura 5-3. Gráfico comparativo de resultados de E11 de las diferentes probetas con la media	26
Figura 5-4. Probeta 90p5 rota por la zona del tacón	27
Figura 5-5. Curvas σ - ϵ de los ensayos de las diferentes probetas del panel unidireccional a 90°	28
Figura 5-6. Ídem figura 5-4, con la curva correspondiente a la probeta 90p1 corregida	29
Figura 5-7. Gráfico comparativo de resultados de E22 de las diferentes probetas con la media	30
Figura 5-8. Gráfico comparativo de resultados de Y_t de las diferentes probetas con la media	31
Figura 5-9. Gráfico comparativo de resultados de Y_{et} de las diferentes probetas con la media	32
Figura 5-10. Resultados de aparición de primera grieta según ha sido detectada	34
Figura 5-11. Resultados de deformación crítica según el criterio de grietas sucesivas	35
Figura 5-12. Resultados de aparición de primera grieta según ha sido detectada	36
Figura 5-13. Resultados de aparición de primera grieta considerada según el criterio de grietas sucesivas	37
Figura 5-14. Resultados de aparición de primera grieta según ha sido detectada	38
Figura 5-15. Resultados de deformación crítica según el criterio de grietas sucesivas	39
Figura 5-16. Curvas $\mu\epsilon$ – T en dirección de las fibras y perpendicular a estas	40
Figura 6-1. Esquema ilustrativo de la superposición de problemas [2]	43
Figura 6-2. Comparativa con análisis de primera grieta detectada para panel n1	48
Figura 6-3. Comparativa con análisis según criterio para panel n1	49
Figura 6-4. Comparativa con análisis de primera grieta detectada para panel n5	50
Figura 6-5. Comparativa con análisis según criterio para panel n5	50
Figura 6-6. Comparativa con análisis de primera grieta detectada para panel n10	51
Figura 6-7. Comparativa con análisis según criterio para panel n10	52
Figura 0-1. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n1T-20p1	57
Figura 0-2. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n1T-20p2	58
Figura 0-3. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n1Ta	58
Figura 0-4. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n1T70p1	59
Figura 0-5. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n1T70p2	59
Figura 0-6. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n5T-20p1	60
Figura 0-7. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n5T-20p2	60
Figura 0-8. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n5Ta	61
Figura 0-9. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n5T70p1	61
Figura 0-10. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n5T70p2	62
Figura 0-11. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n10T-20p1	62
Figura 0-12. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n10T-20p2	63
Figura 0-13. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n10Ta	63
Figura 0-14. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n10T70p1	64
Figura 0-15. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n10T70p2	64

1 INTRODUCCIÓN

Es un hecho que en las últimas décadas los materiales compuestos han ido cobrando un protagonismo creciente en la industria en general y, de manera más acusada, en aquellas áreas en las que la ligereza y la resistencia específica de los materiales son elementos clave. Esta demanda de la industria ha llevado a una intensificación del estudio de esta familia de materiales, así como a un notable desarrollo del diseño y las técnicas de fabricación de estructuras y piezas de material compuesto.

Debido a la complejidad que entrañan estos materiales por su naturaleza heterogénea y su proceso de fabricación, se encuentra especial dificultad en la predicción de aparición de grietas y fallos en elementos fabricados con ellos. Esta dificultad representa la principal motivación para la realización del presente trabajo.

En este capítulo se introducirán conceptos básicos sobre los materiales compuestos, con el foco puesto en el tipo que se emplea en este proyecto.

1.1 Concepto de material compuesto

Un material compuesto se puede definir en términos generales como la combinación a escala macroscópica de dos o más materiales, con interfaces de separación entre ellos, para formar uno nuevo [1]. La estructura habitual de estos materiales consiste en una matriz en la que se embeben materiales de refuerzo con geometrías y naturalezas que pueden ser muy variadas. El resultado de esta combinación es un material que aúna las propiedades de los que lo forman, dando lugar además a propiedades nuevas de las que carecían los constituyentes por separado.

Aunque existe multitud de tipos de material compuesto, el foco del presente estudio se centrará en los materiales compuestos de matriz polimérica termoestable reforzados con fibras largas, más concretamente en el binomio carbono/epoxi. Este tipo concreto de material compuesto requiere que en la fabricación se lleve a cabo un proceso de curado de la resina que constituye la matriz, el cual consiste en el sometimiento de las piezas a alta temperatura y presión para que así la matriz alcance su rigidez final. Este proceso es el que lleva a la realización del presente trabajo pues es el que puede inducir tensiones residuales térmicas a las piezas fabricadas una vez estas alcanzan la temperatura de servicio (lógicamente siempre inferior a la de curado).

Algunas de las características destacables de estos materiales son las siguientes:

- Baja densidad.
- Excelente resistencia específica.
- Buena resistencia a la fatiga.
- Aislantes eléctricos y térmicos.
- Por su naturaleza heterogénea pueden ser fabricados optimizando la configuración del material de refuerzo según los esfuerzos a los que vaya a estar sometida la estructura o pieza a fabricar.

A pesar de las múltiples e interesantes propiedades que presentan los materiales compuestos, su complejidad y coste de fabricación hacen que actualmente sean empleados fundamentalmente en aplicaciones con alto nivel de exigencia tecnológica y proyectos con presupuestos altos, aunque la tendencia está evolucionando hacia un uso más generalizado.

2 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

En este capítulo se presentará el contexto en el que se desarrolla el trabajo dentro del estado del arte actual, así como el principal objetivo del mismo. Se dará también una visión general de la estructura del trabajo para facilitar su seguimiento.

2.1 Objetivos y contexto

Este trabajo es un estudio experimental que pretende comprobar de manera empírica el modo en que afectan las tensiones residuales térmicas provocadas por el proceso de curado en el fallo del material, concretamente en el caso de laminados cruzados, especialmente sensibles a este efecto debido a la gran diferencia entre las propiedades en la dirección de la longitud y la de la anchura.

Es de sobra conocida la dificultad que entrañan los materiales compuestos a la hora de ser caracterizados mecánicamente, y, por tanto, el establecimiento de un criterio general de fallo. A diferencia de otros materiales más sencillos y con más tradición de uso para la fabricación de estructuras y piezas, la característica complejidad de los materiales compuestos ha hecho que, a día de hoy, siga sin existir un criterio que permita predecir con exactitud el fallo de estos materiales. Este hecho se evidencia con la organización de varios “World-Wide Failure Exercises” recientemente [2], que son reuniones de expertos internacionales con el objetivo de analizar y discutir sobre los criterios de fallo existentes en la actualidad, estableciendo el nivel de confianza en ellos entre la comunidad de investigadores y diseñadores. De estas reuniones se han sacado dos conclusiones importantes [3]:

- 1- Hay una falta de certeza en los criterios de fallo actualmente empleados. No hay evidencias suficientes para concluir que los criterios actuales pueden predecir el fallo con suficiente exactitud más allá de en unas circunstancias concretas muy limitadas.
- 2- No hay una definición universal de lo que constituye el fallo de un material compuesto.

El estudio del fallo de los materiales compuestos continúa actualmente con el análisis de escenarios y posibles causas concretas. De este modo, el presente trabajo se centra en aspectos relacionados con la fabricación, como es el curado de la resina y pretende cotejar con ensayos experimentales el modelo para predecir el fallo de laminados cruzados, desarrollado por I. García, V. Mantič y A. Blázquez, profesores del Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, en [2]. Dicho modelo se basa en la satisfacción simultánea de los criterios de tensión y de energía, añadiendo la consideración de las tensiones residuales térmicas, mediante la introducción de una deformación debida a la diferencia de temperatura de servicio con la de curado.

2.2 Estructura del trabajo

Para comenzar, se describirán las probetas diseñadas justificando su elección para, a continuación, detallar los materiales empleados, así como el proceso de fabricación llevado a cabo. (Capítulo 3). Se continúa en el Capítulo 4 con la descripción de los ensayos realizados incluyendo todo el equipo y material empleado y el procedimiento experimental seguido. En el Capítulo 5 se presentan y comentan los resultados arrojados por los ensayos previamente descritos. Estos resultados son comparados en el Capítulo 6 con el modelo teórico

mencionado en el Subcapítulo 2.1. Finalmente, en el Capítulo 7 se expondrán las conclusiones obtenidas y las posibles líneas de futuro.

3 FABRICACIÓN DE PROBETAS

Dado que este trabajo se centra en la comprobación empírica del efecto de las tensiones residuales térmicas en la iniciación de grietas en laminados cruzados de material compuesto, es obvio que el primer paso para llevarlo a cabo es el diseño y la fabricación de las probetas correspondientes. Así pues, en este capítulo se tratará en detalle dicho proceso, el cual ha sido llevado a cabo en su totalidad en las instalaciones del Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla.

3.1 Diseño de probetas

Para llevar a cabo esta experiencia se realizarán ensayos con probetas de diferentes grosores, manteniendo la relación de espesores de las capas a 0° con las orientadas a 90° (t_0/t_{90}), a distintas temperaturas.

Se fabrican tres laminados de diferentes grosores con una configuración *cross ply* obteniéndose a partir de ellos tres series de probetas para la realización de los ensayos objeto del presente trabajo. Además de estos laminados, se fabrican dos unidireccionales de los que se obtendrán una serie de probetas con una configuración de fibras perpendicular a la aplicación de la carga, para la obtención de las propiedades mecánicas del material; así como una probeta cuadrada para la obtención de los coeficientes de dilatación, tanto en la dirección de las fibras, como en la dirección perpendicular a estas. Para obtener el módulo de elasticidad del material en la dirección de las fibras, también se fabrica un laminado con las fibras orientadas en la dirección de aplicación de la carga.

Para los laminados cruzados buscamos conseguir un abanico de espesores suficientemente representativos, de este modo, se elige una relación $t_0 = 2t_{90}$ para así poder partir del mínimo grosor posible para la configuración elegida, es decir $[0/90/0]$ (panel n1). Para los paneles de espesores intermedio y grueso se eligen unas configuraciones de $[0_5/90_5/0_5]$ (panel n5) y $[0_{10}/90_{10}/0_{10}]$ (panel n10), respectivamente.

Se fabrican tres paneles unidireccionales para la obtención de propiedades mecánicas y termomecánicas, dos de ellos con cinco láminas de espesor y el restante con cuatro. De uno de los de cinco láminas se cortan probetas con una configuración $[90]_5$ y del otro un cuadrado para la obtención de los dos coeficientes de dilatación térmica mencionados con anterioridad. Del panel más delgado, se cortan las probetas de configuración $[0]_4$, de las que se obtendrá E_{11} .

Todos los paneles son fabricados con unas medidas de 300 x 150 para mecanizar 5 probetas de cada uno de ellos de dimensiones 250 x 25 mm, exceptuando el panel $[0]_4$, del que se obtendrán probetas de 150 x 15 mm; y el panel cuadrado, con unas medidas de 150 x 150 mm. Para la elección de las dimensiones se ha tomado como referencia la norma ASTM D 3039/D 3039M [4].

Todas las probetas destinadas a ser ensayadas a tracción en la máquina universal de ensayos han sido reforzadas en sus extremos para evitar así roturas indeseadas debidas a las tensiones inducidas por el agarre de las mordazas, excepto las destinadas a la obtención del módulo de elasticidad en la dirección de las fibras, ya que no son ensayadas a rotura. El tamaño de dichos refuerzos se ha diseñado para ser suficientes en los ensayos más desfavorables, es decir, los de las probetas más gruesas y, por simplicidad, el resto de las probetas

han sido reforzadas de igual manera.

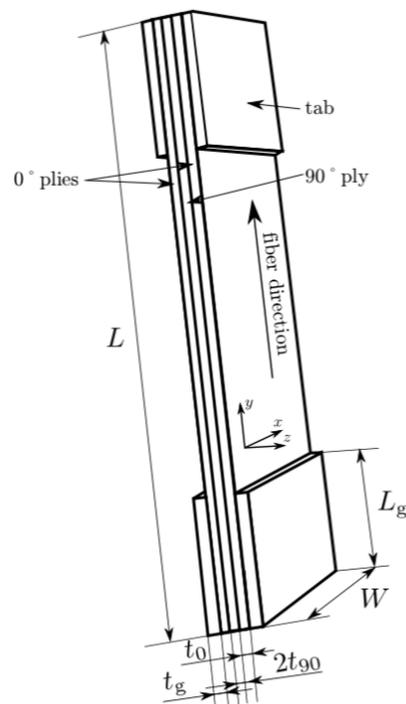


Figura 3-1. Esquema de la geometría de los laminados [5]

3.2 Materiales empleados

Para la fabricación de todos los laminados descritos anteriormente se han empleado láminas de fibra de carbono preimpregnadas con resina epoxy. En concreto hablamos de preimpregnados de tipo AS4/8552.

Los tacones han sido cortados de un laminado prefabricado de vidrio-epoxi con las fibras horientadas a $\pm 45^\circ$.

Los tacones de refuerzo han sido pegados mediante adhesivo estructural Z15429 curado en autoclave con los dos elementos a unir (laminado y tacón) estando ya previamente curados.

3.3 Proceso de fabricación

El proceso de fabricación de las probetas consta de las siguientes fases:

- Corte de las láminas de *prepreg*
- Apilado de las láminas
- Fabricación de bolsa de vacío para el curado en autoclave
- Curado en autoclave de los paneles

- Resanado de los paneles
- Preparación y colocación de los refuerzos de fibra de vidrio (cuando se requieran)
- Corte de las probetas
- Trazabilidad

3.3.1 Corte de las láminas de *prepreg*

Este procedimiento se realiza en una sala limpia, que es como habitualmente se denominan las salas cuyas condiciones de humedad, temperatura y contenido en partículas están controladas para evitar la contaminación de los materiales durante el proceso de fabricación.

Todos los cortes se han realizado a partir de un rollo de *prepreg* de 300 mm de ancho, de manera que no ha sido necesario empalmar láminas en ninguna de las configuraciones. Se han cortado las siguientes láminas dependiendo de la configuración en la que se fueran a apilar:

- Laminados *cross ply*: 32 láminas de 300 mm de largo que se han cortado por la mitad longitudinalmente para obtener el ancho deseado de 150 mm para las capas a 0° y 16 láminas de 150 mm de largo (medido en la dirección de las fibras) para las capas a 90°.
- Laminado unidireccional para probetas de tracción: 5 láminas de 150 mm de largo (medido en la dirección de las fibras), para el laminado de configuración [90]₅; y 2 láminas de 300 mm de largo, en la dirección de las fibras, para cortarlas a la mitad longitudinalmente obteniendo así las 4 capas necesarias para el laminado [0]₄.
- Laminado unidireccional para caracterización térmica del material: 3 láminas de 150 mm de largo (medido en la dirección de las fibras) que han sido cortadas por la mitad para obtener 5 cuadrados de 150x150 mm (sobra una de las láminas cuadradas).

Las herramientas empleadas durante esta etapa son: mesa con superficie dura para poder cortar sobre ella; cúter, para realizar cortes precisos y poder renovar filo cortante con asiduidad; regla metálica, empleada para medir y como guía para los cortes. Otros elementos empleados de manera auxiliar para facilitar el trabajo son: taco metálico, empleado como guía; gatos para fijar los tacos a la mesa; y escuadra y cartabón como ayuda puntual para las direcciones de corte.

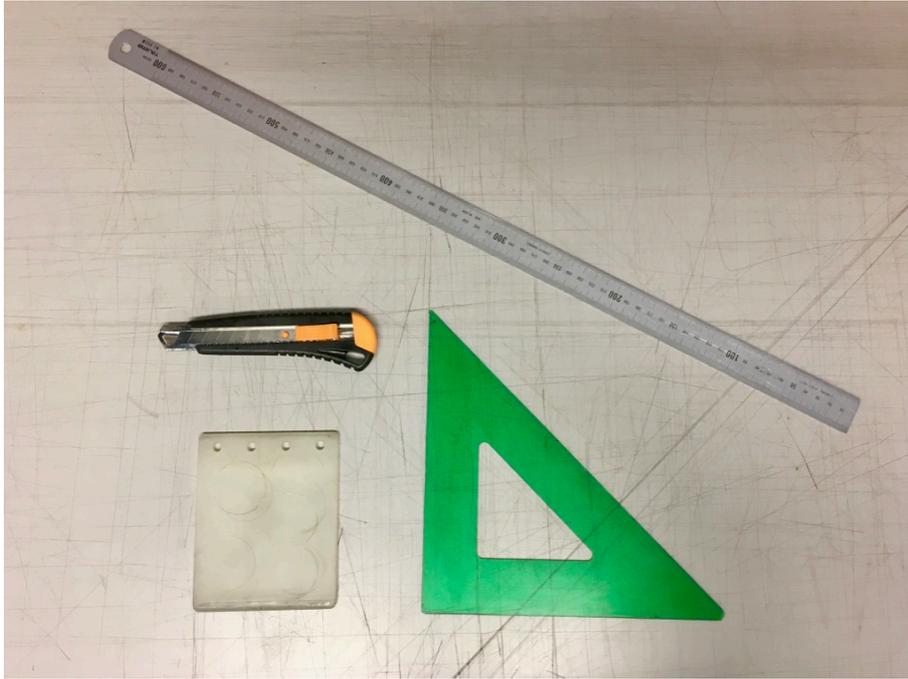


Figura 3-2. Algunas de herramientas empleadas en el corte y apilado de las láminas

3.3.2 Apilado de las láminas

Una vez cortadas todas las láminas con las dimensiones correspondientes, se procede al apilado de las mismas. Este procedimiento es muy delicado debido a la precisión que se requiere y a la problemática de corregir un error al colocar alguna de las láminas, puesto que habitualmente no es posible hacerlo y provoca tener que empezar un nuevo laminado.

Este proceso se realiza también dentro de la sala limpia anteriormente mencionada, sobre una mesa a la que preferiblemente se le colocan unos tochos metálicos rectangulares con la ayuda de unos gatos para facilitarnos el apilado con las direcciones correctas con una precisión adecuada. Para evitar la aparición de porosidad en el laminado, es necesario el empleo de espátulas con cada lámina que se coloque para aplicar presión y así eliminar las posibles burbujas de aire que hayan quedado ocluidas. Con el mismo objetivo que lo anterior, cada cuatro capas apiladas se introduce el laminado en una bolsa de vacío para realizar compactaciones intermedias.

3.3.3 Fabricación de bolsa de vacío para el curado en autoclave

La bolsa de vacío es la que permite controlar las condiciones de presión a las que se curarán los paneles. Como en este caso se están fabricando paneles planos, la bolsa se fabrica sobre una chapa plana de aluminio, que hace las veces de molde.



Figura 3-3. Rollos de material para la bolsa. De arriba a abajo: tejido aireador, plástico y teflón



Figura 3-4. De izquierda a derecha: cinta sellante de cromato y separadores autoadhesivos de corcho

La fabricación de la bolsa ha sido realizada siguiendo la secuencia descrita a continuación:

1. Corte de las láminas de teflón, plástico y tejido aireador al tamaño adecuado, Figura 3-1.
2. Pegado de la cinta sellante de cromato en todo el perímetro de la chapa de aluminio, Figura 3-2.
3. Colocación de una capa de teflón sobre la base de aluminio.
4. Colocación ordenada de los paneles teniendo en cuenta dejar suficiente espacio para la posterior colocación de las tomas de vacío.
5. Pegado de separadores de corcho autoadhesivos para evitar que la resina fluya al calentarse en el autoclave, Figura 3-2.
6. Los laminados se recubren con otra capa de teflón para que ambas caras estén en contacto con estas láminas desmoldeantes y puedan ser retirados con facilidad una vez finalizado el proceso de curado.
7. Se añade el tejido aireador y se colocan las bases de las tomas de vacío en las ubicaciones correspondientes, evitando situarlas encima de ninguno de los laminados.
8. Pegado de la capa de plástico empleando las cintas de sellante colocadas anteriormente cubriendo todo el conjunto. Esta capa es la encargada de que no entre aire del exterior.
9. Instalación de las tomas de vacío, perforando la bolsa para la posterior extracción del aire.

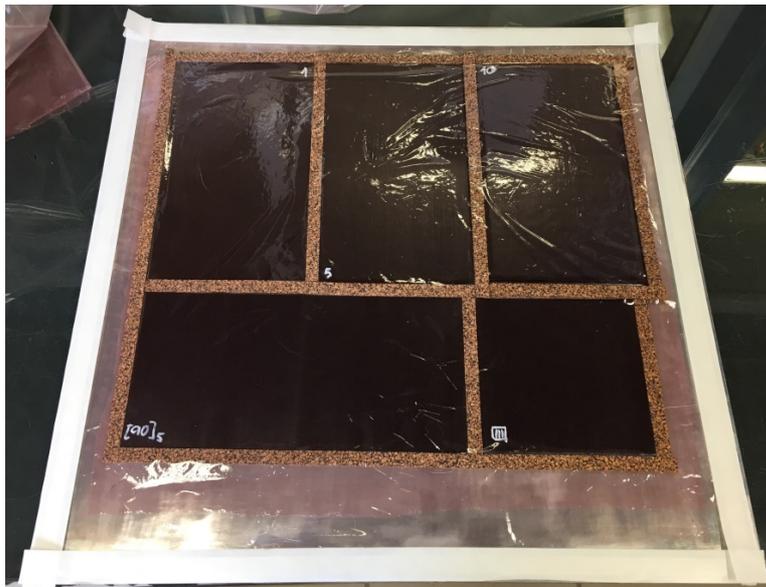


Figura 3-5. Paso 6 de la fabricación de la bolsa

3.3.4 Curado en autoclave de los paneles

Una vez preparada la bolsa de vacío y comprobado que no tiene fugas, ya pueden introducirse los paneles en el autoclave para ser curados. Este proceso consiste en la aplicación de temperatura y presión siguiendo las especificaciones del fabricante para que se produzca adecuadamente el proceso de polimerización y endurecimiento de la resina epoxy contenida en las láminas y así obtener una matriz sólida.

El autoclave es una máquina industrial que consiste en una cámara hermética que consta de dispositivos que permiten someter a diferentes temperaturas y presiones los elementos que en ella se introduzcan. El calentamiento de los laminados se realiza mediante convección forzada, y el enfriamiento mediante un

intercambiador de calor en el que se emplea agua fría que baja la temperatura del aire que se hará pasar por los laminados, enfriándolos igualmente por convección forzada. Un sistema de control permite establecer las condiciones de presión y temperatura, aplicando los ciclos requeridos según el material a curar. En el caso concreto este trabajo las características del ciclo aplicado se pueden observar en la gráfica que se muestra a continuación.

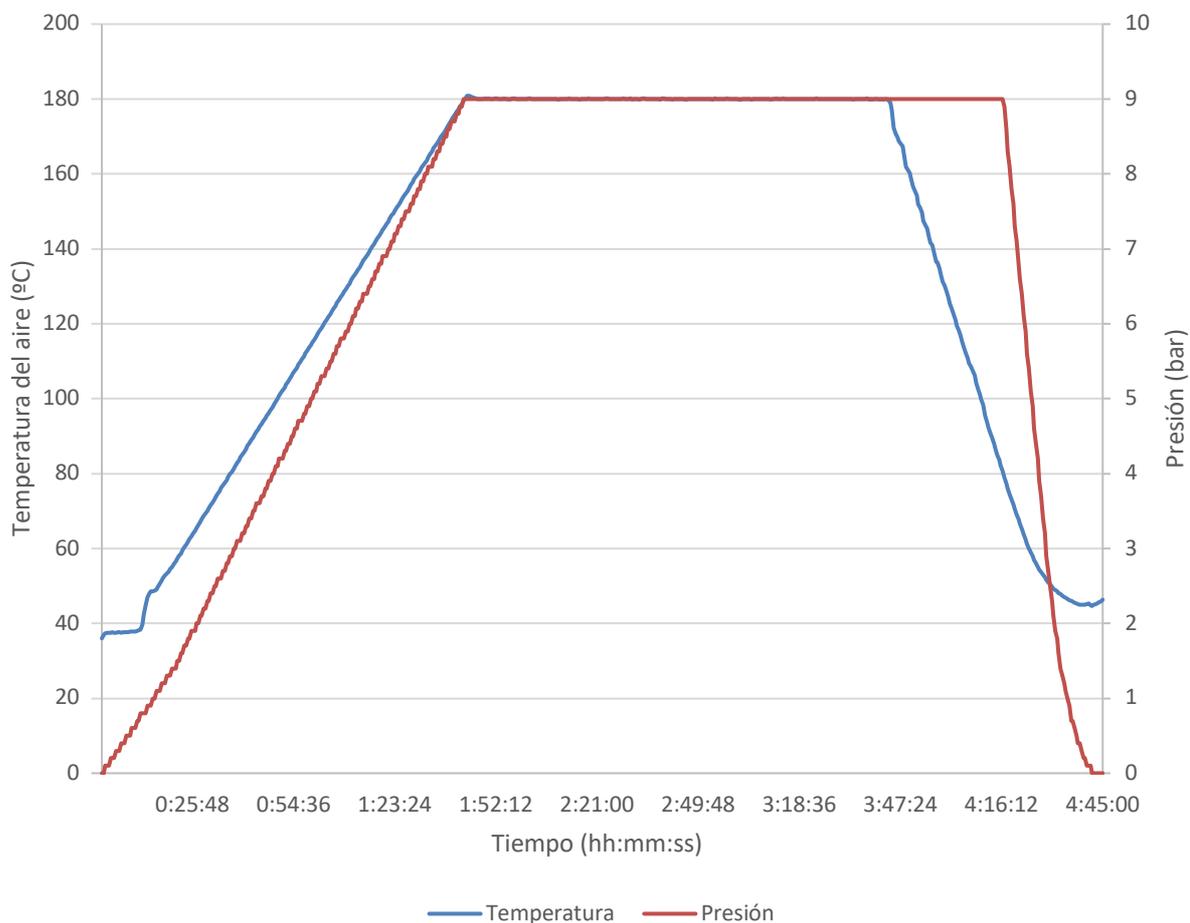


Figura 3-6. Ciclo de curado



Figura 3-7. Autoclave

3.3.5 Resanado de los paneles

Debido a la forma en que se fabrican los paneles, las zonas cercanas a los bordes no tienen la misma calidad ni características que el resto. Esto se produce por tres motivos fundamentalmente:

- Al cortar y medir las láminas de manera completamente artesanal, resulta prácticamente imposible que todas las capas tengan exactamente el mismo tamaño.
- El apilado manual implica pequeñas imprecisiones al ir colocando una lámina sobre otra.
- Durante el proceso de curado, la resina se fluidifica y tiende a desplazarse en cierta medida hacia los bordes.

Como consecuencia de estos inconvenientes descritos, los paneles son diseñados con creces de forma que puedan eliminarse las zonas defectuosas que se prevee que aparecerán una vez fabricados.

Para llevar a cabo este proceso de resanado se ha empleado una sierra eléctrica de precisión que emplea discos de diamante para realizar los cortes. Los paneles se colocan sobre una mesa móvil que cuenta con una guía que, con ayuda de un pie de rey que tiene acoplado, nos permite regular de forma precisa la cantidad de material que vamos a cortar.



Figura 3-8. Máquina de corte empleada en el resanado y corte de las probetas

3.3.6 Preparación y colocación de los refuerzos de fibra de vidrio

Tal y como se ha explicado con anterioridad, las probetas que vayan a ser ensayadas a tracción han de reforzarse con unos tacos en sus extremos para así evitar una posible rotura indeseada por la zona donde son agarradas por las mordazas. Por simplicidad y eficiencia, estos refuerzos de fibra de vidrio son colocados sobre los paneles antes de cortar las probetas.

Una vez curados y resanados los paneles de fibra de carbono, es necesario preparar las superficies de los extremos donde irán los refuerzos de forma que la adhesión de estos sea óptima. Para ello se ha empleado una máquina de proyección de chorro de arena en lugar de un lijado convencional, debido al mejor resultado y mayor rapidez que se obtiene con este método. La misma operación ha de realizarse sobre la superficie del panel de fibra de vidrio del que se vayan a cortar los tacones, por la cara que irá pegada al laminado de fibra de carbono. De nuevo, por agilidad del proceso, la preparación de la superficie de fibra de vidrio se ha llevado a cabo antes de realizar los cortes, que también se han realizado en la misma máquina empleada en el proceso de resanado de los paneles de fibra de carbono.

Con todas las superficies debidamente acondicionadas y los tacones cortados al ancho diseñado, se procede a la aplicación de adhesivo estructural. El adhesivo está presentado en forma de láminas, que se recortan con ayuda de un cúter al tamaño requerido y se colocan sobre las tiras de fibra de vidrio únicamente.

El paso siguiente, después de colocar los tacones donde corresponde con ayuda de cinta adhesiva de alta temperatura, se emplea de nuevo el autoclave, en esta ocasión para curar el adhesivo.

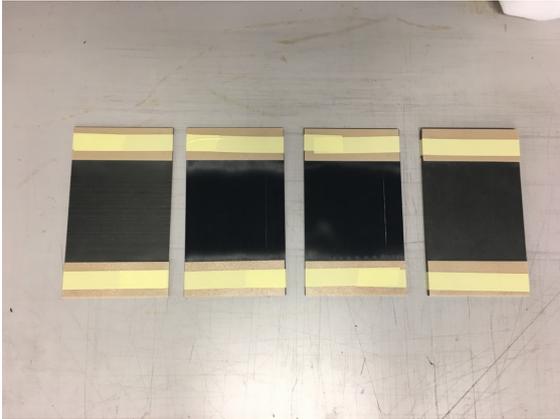


Figura 3-9. Paneles con los tacones colocados antes del curado



Figura 3-10. Bolsa de vacío para el curado del adhesivo de los tacones

3.3.7 Corte de las probetas

Con los tacones de refuerzo ya debidamente adheridos a los paneles de fibra de carbono, se procede al corte de las probetas con las dimensiones diseñadas. Para esta operación se emplea la misma máquina de corte descrita con anterioridad. Se comienza realizando cortes transversales obteniendo de este modo el largo de diseño, para a continuación realizar todos los cortes longitudinales con el ancho de las probetas. Para asegurar la perpendicularidad y exactitud en las medidas se ha repasado por ambos lados cada una de las probetas una vez cortadas, comprobando que el ancho es constante con la longitud realizando medidas con un pie de rey.

3.3.8 Trazabilidad

Para un poder llevar a cabo un seguimiento adecuado de los ensayos y para un correcto tratamiento posterior de los resultados obtenidos, se han nombrado todas las probetas con un código de identificación unívoco.

- En el caso de las probetas de laminados cruzados la estructura es la siguiente:

$$nxTypz$$

Donde x se refiere al número de láminas por capa (todas las capas tienen el mismo número de láminas), y hace referencia a la temperatura de ensayo, y z es el número de probeta con las características físicas y de ensayo especificadas.

- Para las probetas de laminado unidireccional el código es más corto, ya que todas las probetas de este tipo son ensayadas a temperatura ambiente. Se sigue en este caso la siguiente estructura:

$$Opz$$

Donde O informa sobre la orientación de las fibras, pudiendo ser 0 ó 90 según se refiera a la serie de

probetas de laminado con configuración $[0]_4$ ó $[90]_5$ y z se refiere de nuevo al número de probeta dentro de la serie.

4 ENSAYOS

En este capítulo se describe detalladamente el núcleo fundamental del presente trabajo. Mediante la realización de diferentes ensayos sobre las probetas fabricadas se pretenden obtener unos resultados experimentales que se compararán con los modelos teóricos existentes. De este modo, se pretende comprobar su ajuste a la realidad a la hora de predecir el fallo.

Los ensayos mecánicos que se realizan son de la misma naturaleza que los realizados tradicionalmente para caracterizar los materiales isótropos, como el acero, empleados desde hace décadas en la industria. Mientras que la caracterización de estos materiales isótropos es relativamente sencilla y no requiere de una gran variedad de ensayos, este no es el caso de los materiales compuestos debido principalmente a la anisotropía que presentan sus propiedades mecánicas y su heterogeneidad característica. Esta heterogeneidad conlleva una variada paleta de posibles mecanismos de fallo, lo que dificulta de manera extraordinaria su caracterización.

Este trabajo pretende aportar luz sobre la caracterización de los materiales compuestos, analizando concretamente cómo afectan las tensiones residuales de curado según la temperatura de servicio. Cuanto mejor sea la caracterización de los materiales, mejores y más eficientes diseños podrán realizarse y más seguras serán las estructuras que se fabriquen con ellos.

Los ensayos que se han realizado son los siguientes:

- Ensayos de tracción a diferentes temperaturas de las probetas de laminados cruzados con las configuraciones descritas con anterioridad: $[0/90/0]$, $[0_5/90_5/0_5]$ y $[0_{10}/90_{10}/0_{10}]$. Se pretende obtener la deformación crítica, es decir, aquella a la que se produce la aparición de la primera grieta.
- Ensayos de tracción a rotura de las probetas con la configuración $[90]_5$ para la obtención del módulo de elasticidad (E_{22}) y de la resistencia a la tracción en dirección perpendicular a las fibras (Y_t).
- Ensayos de tracción de las probetas de configuración $[0]_4$ para obtener el módulo de elasticidad en la dirección de las fibras (E_{11}).
- Obtención de los coeficientes de dilatación térmica en dirección de las fibras y en dirección perpendicular a estas, sometiendo el laminado cuadrado con configuración $[90]_5$ a incrementos de temperatura en un horno de laboratorio y analizando las deformaciones que provocan en ambas direcciones mencionadas.

En los apartados siguientes se procede a detallar el equipo empleado y el procedimiento llevado a cabo en los diferentes ensayos, así como los resultados obtenidos.

4.1 Equipo empleado

Todos los ensayos de tracción han sido realizados en una máquina universal de ensayos Instron 4482 empleando una célula de carga de 150 kN. Para registrar las deformaciones se ha empleado un extensómetro Instron 2630-112, con una separación entre patillas de 50 mm y para el registro de las apariciones de grietas se ha utilizado un micrófono de contacto. Los ensayos a diferentes temperaturas han sido realizados con una cámara térmica Instron con posibilidad tanto de aumentar la temperatura como de disminuirla mediante la

expansión de CO₂. Los datos han sido obtenidos mediante un ordenador equipado con una tarjeta de adquisición de datos y con un software específico de Gestión de Máquinas Universales de Ensayos Instron, *Test Control Instron Series 44 V17-6*. También ha sido necesario el empleo de un programa de grabación de audio para grabar los sonidos registrados por el micrófono de contacto, en este caso, el programa de código abierto *Audacity*.



Figura 4-1. Máquina universal de ensayos con la cámara térmica instalada



Figura 4-2. Extensómetro

Por otra parte, para el ensayo de caracterización termomecánica se ha utilizado un horno, para someter a la probeta a los incrementos de temperatura deseados, y para la medición de las microdeformaciones provocadas por dichos incrementos de temperatura se ha optado por el uso de una banda extensométrica bidireccional conectada a un puente de Wheatstone.



Figura 4-3. Banda extensométrica pegada sobre la probeta a ensayar

4.2 Procedimiento experimental

4.2.1 Ensayos de probetas de laminados cruzados y de laminado unidireccional

El objetivo de estos ensayos es determinar la deformación de los laminados a la que aparece la primera grieta, es decir, la deformación crítica. En estos ensayos se han empleado la máquina universal de ensayos, la cámara térmica, el extensómetro y el micrófono de contacto, así como el ordenador con el software correspondiente para la obtención de datos.

En esta fase se han de realizar ensayos a diferentes temperaturas de modo que, por conveniencia, se ha procedido llevando a cabo los ensayos por bloques de temperaturas, esto es, para cada temperatura se ensayan todas las probetas correspondientes en una misma sesión.

El proceso de realización de los ensayos consta de:

- Medición del grosor de las probetas.
- Preparación de la máquina universal de ensayo.
- Montaje de la cámara térmica.
- Colocación de las probetas y el instrumental de medida.
- Ensayos.

El primer paso para comenzar con los ensayos es medir el grosor de las probetas por la zona de los tacones para así elegir las mordazas adecuadas para su correcto agarre al ser montadas en la máquina de ensayos. Para ello se emplea un pie de rey digital.

Se procede a continuación a preparar la máquina según las necesidades concretas de los ensayos que se llevarán a cabo. El primer elemento a instalar es la célula de carga, que permitirá medir la fuerza a la que se someten las probetas durante los ensayos. En este caso concreto se empleará una célula de 150 kN. Con la célula de carga ya instalada, se colocan las mordazas adecuadas para la probeta a ensayar.

Como realizarán ensayos a diferentes temperaturas, es imprescindible instalar una cámara térmica que nos lo permita. Esta cámara se monta sobre un soporte metálico con raíles que posibilitan su colocación en la zona de ensayo cuando es necesaria, y retirarla hacia atrás cuando no lo es. Para que la cámara pueda posicionarse para ensayar, hay que emplear un prolongador en la mordaza inferior que salve la base de la misma (figura 3-1).

Una vez preparada la máquina de ensayos y con la cámara térmica lista para su uso, se calibra y balancea la máquina haciendo uso de su panel de control y a continuación se procede a colocar la probeta. Es fundamental que esta se coloque perfectamente alineada con el eje en el que se va a traccionar, para así evitar la aparición de tensiones y efectos indeseados. Las mordazas deben cubrir preferiblemente la zona de los tacones por completo, de manera que el agarre sea lo más firme posible para evitar que haya deslizamiento entre mordaza y probeta. Ya colocada la probeta en la posición adecuada, se le da un apriete inicial a las mordazas, que después aumentará a medida que se realice el ensayo, pues están diseñadas para cerrarse a medida que se va traccionando la probeta.

Se continúa ahora con la instalación de los instrumentos de medida, que permitirán recoger los resultados. Concretamente, en este caso, además de de un extensómetro, como suele ser habitual en los ensayos de tracción, se instalará también un micrófono de contacto, que será el encargado de registrar el sonido producido por la aparición de grietas, cuya detección es el objetivo principal de esta experiencia. Es muy importante colocar en el extensómetro unas patillas adecuadas al grosor de la probeta para que no se produzcan deslizamientos que falseen las medidas.

Con todo el instrumental de ensayo y medida preparados y con la probeta debidamente colocada, se procede a iniciar el ensayo, que se controlará mediante el ordenador al que está conectado la máquina de ensayos. En el caso de los ensayos realizados a temperatura diferente a la del ambiente, lo primero es colocar la cámara térmica en posición de ensayo y fijar la temperatura de consigna deseada empleando el control propio de la cámara. Una vez alcanzada dicha temperatura, se espera un tiempo de 5 minutos para asegurar el atemperamiento de la probeta, así como de las mordazas. Ya que los ensayos se han realizado por bloques según temperaturas, todas las probetas se introducen en la cámara térmica desde el principio para que así ya se encuentren debidamente atemperadas al llegar su turno para ser ensayadas, agilizándose así el proceso.

Para iniciar el ensayo, hay que habilitar el ordenador para controlar la máquina pulsando el botón "IEEE488" del panel de control de esta. Se selecciona el tipo de ensayo en el software controlador de máquina, así como los datos que han de registrarse. En este caso serán necesarios la carga, el desplazamiento, la apertura del extensómetro y el tiempo. A continuación, se procede a desplazar levemente la mordaza móvil (la superior) para de esta manera conseguir comenzar el ensayo con una fuerza sobre la probeta nula.

Es necesario también para la obtención del sonido recogido por el micrófono de contacto inicializar el programa de edición de sonido, para así grabar los resultados en una pista de audio para su posterior análisis. Como ayuda para la identificación de las apariciones de grietas se ha empleado adicionalmente un cronómetro, para poder registrar los momentos exactos en los que se produce la aparición de grietas.

Para la realización de todos los ensayos de este trabajo se ha fijado una velocidad de desplazamiento de 0,5 mm/min.

En esta fase del proyecto se realizan ensayos a tres temperaturas diferentes: alta temperatura (70 °C), temperatura ambiente (24 °C) y baja temperatura (- 20 °C).

4.2.2 Ensayo de caracterización termomecánica

Este ensayo difiere completamente de los anteriormente descritos puesto que las propiedades que se pretenden determinar son de diferente naturaleza: los coeficientes de dilatación lineal en la dirección de las fibras y en la dirección perpendicular a ellas. Para llevarlo a cabo, se empleará la probeta de laminado unidireccional con configuración [90]_s anteriormente descrita, un horno y una banda extensométrica bidireccional, que nos permita medir las microdeformaciones en ambas direcciones.

En primer lugar, se coloca la banda unidireccional sobre la cara con acabado más liso de la probeta. Para conseguir una adhesión óptima se prepara la superficie lijándola levemente. A continuación, se limpia y se marcan dos líneas perpendiculares con las direcciones de interés que servirán de guía para la colocación. Una vez pegada la banda correctamente se procede a soldar con minucioso cuidado los cables que se conectarán al puente de Wheatstone a través del cual se obtendrán los datos de microdeformaciones.



Figura 4-4. Banda extensométrica instalada y conectada al puente de Wheatstone para la medición de microdeformaciones

El presente ensayo consiste en someter la probeta a incrementos de temperatura e ir registrado las microdeformaciones que se van produciendo en la dirección de la fibra y perpendicular a ella. La probeta es introducida en un horno en el que se aumenta la temperatura de consigna de forma escalonada. Al igual que en los ensayos anteriores en los que se empleaban temperaturas diferentes a las del ambiente, es necesario

asegurarse de que la probeta se encuentra debidamente atemperada, por lo que se ha esperado un tiempo de 10 minutos para cada cambio de temperatura de consigna.

Con los datos obtenidos se representa una nube de puntos y una recta de regresión para cada una de las dos direcciones a partir de las cuales se obtienen las propiedades buscadas.



Figura 4-5. Horno utilizado para la caracterización termomecánica

5 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

5.1 Ensayos de tracción

Con los resultados de los ensayos de tracción se pretende dar respuesta a la pregunta principal que se plantea en el presente trabajo: ¿en qué medida afectan las tensiones residuales de curado en la aparición de grietas en laminados cruzados de material compuesto?

Se han realizado tres bloques bien diferenciados de ensayos de tracción, que son: ensayos hasta rotura de probetas de laminado unidireccional con fibras orientadas perpendicularmente a la carga, ensayos sin llegar a rotura de las probetas de laminado unidireccional con las fibras en la dirección de la carga y ensayos de probetas de laminados cruzados hasta la aparición de la primera grieta. Para la consideración de primera grieta se han tomado dos criterios diferentes, que se explicarán más adelante en el apartado correspondiente.

Del software de control y obtención de datos de los ensayos se obtienen la fuerza aplicada (N), la apertura del extensómetro (mm) y el tiempo del ensayo (s). Para que sea posible comparar los datos de los diferentes ensayos se habrán de expresar los datos en términos de tensiones y deformaciones. Para ello se emplearán las ecuaciones

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5-1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (5-2)$$

En estas expresiones A es el área de la sección transversal de la probeta¹, F es la fuerza de tracción ejercida por la máquina de ensayos; ΔL es la apertura del extensómetro partiendo de L_0 , que es la separación inicial de las patillas del extensómetro (en este caso $L_0 = 50 \text{ mm}$).

5.1.1 Ensayos de laminado unidireccional a 0°

A partir de esta serie de ensayos se obtiene el módulo de elasticidad en la dirección de las fibras. Los datos obtenidos serán de utilidad para comparar los resultados experimentales obtenidos en este trabajo con los resultados teóricos existentes en la materia.

Se han ensayado un total de 5 probetas de laminado de configuración $[0]_4$, cuyas dimensiones de la sección transversal se detallan en la tabla siguiente:

¹ Se obtiene midiendo el ancho y el espesor de la probeta por tres zonas representativas y realizando la media aritmética según se especifica en la norma UNE-EN 2561:1996 [8].

Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)
0p1	15.02	1.16	17.42
0p2	15.11	1.16	17.43
0p3	14.97	1.17	17.51
0p4	14.89	1.17	17.42
0p5	15.02	1.17	17.57

Tabla 5-1. Dimensiones de las probetas de laminado unidireccional a 0°

Los resultados obtenidos para las cinco probetas ensayadas son los siguientes:

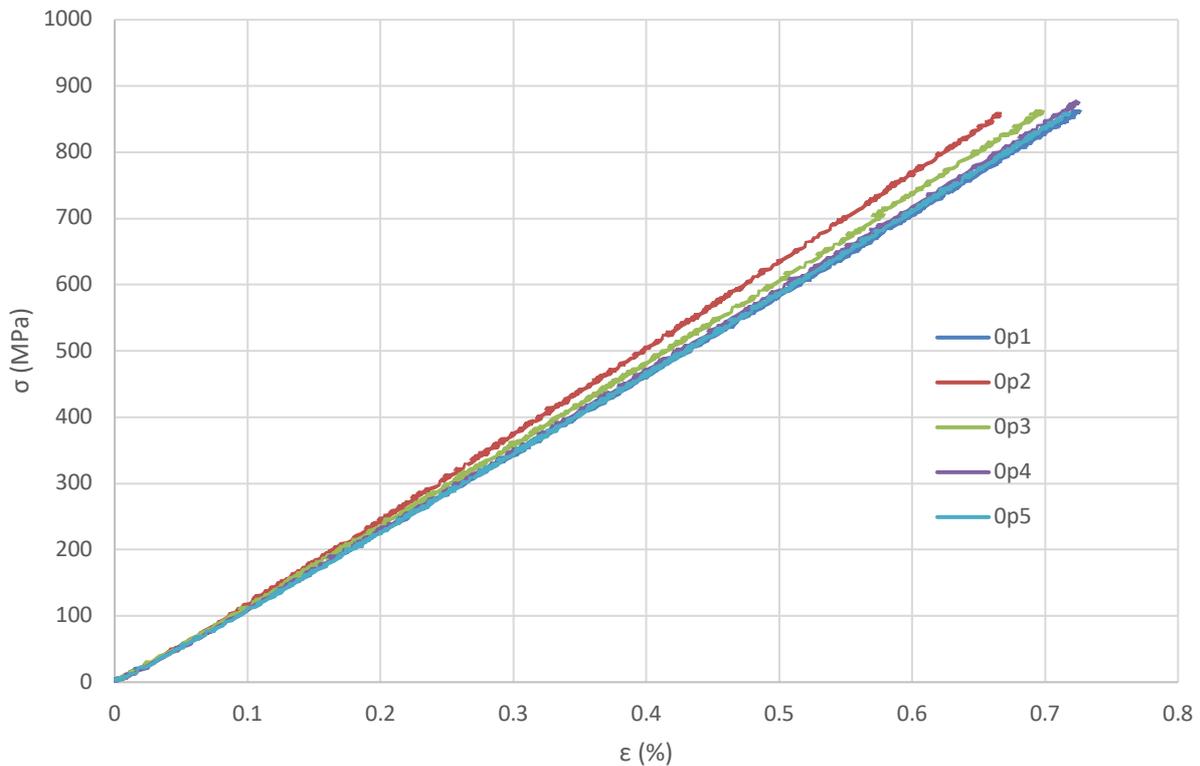


Figura 5-1. Curvas σ - ϵ correspondientes a las probetas de laminado unidireccional a 0°

Probeta	Área (mm ²)	E_{11} (GPa)
0p1	17.42	119.753
0p2	17.43	130.753
0p3	17.51	124.530
0p4	17.42	121.699
0p5	17.57	120.971

Tabla 5-2. Resultados de E_{11} para las probetas unidireccionales a 0°

Se muestra a continuación un análisis estadístico de los resultados obtenidos para comprobar la dispersión de los mismos, empleando las ecuaciones de debajo de estas líneas. Se añade también un gráfico comparativo del resultado de las diferentes probetas con la media.

Media
$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5-3)$$

Desviación típica
$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (5-4)$$

Coefficiente de variación
$$C_V = \frac{s}{\bar{X}} \quad (5-5)$$

Error relativo
$$\varepsilon_R = \frac{|x_i - \bar{X}|}{\bar{X}} \quad (5-6)$$

E_{11}	
\bar{E}_{11} (GPa)	123.541
s (GPa)	4.397
C_v (%)	3.56
$\varepsilon_R(0p1)$ (%)	3.07
$\varepsilon_R(0p2)$ (%)	5.84
$\varepsilon_R(0p3)$ (%)	0.80
$\varepsilon_R(0p4)$ (%)	1.49
$\varepsilon_R(0p5)$ (%)	2.08

Figura 5-2. Resultados estadísticos de E_{11}

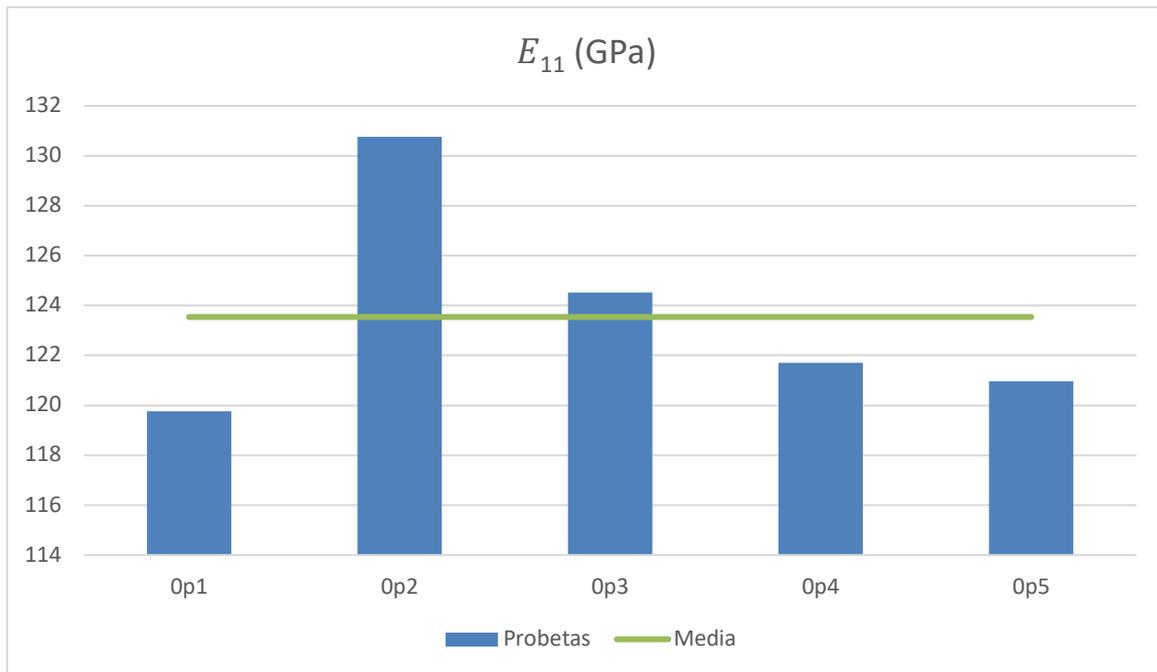


Figura 5-3. Gráfico comparativo de resultados de E_{11} de las diferentes probetas con la media

El resultado medio obtenido para (123.541 GPa) queda por debajo del especificado por el fabricante, en este caso, 141 GPa [6]. Este resultado puede ser debido a un mal estado de la matriz, que se encarga de distribuir las tensiones por el material, dado que el material empleado no estaba en óptimas condiciones de conservación.

5.1.2 Ensayos a rotura de laminado unidireccional a 90°

Con estos ensayos se pretenden obtener tanto la resistencia a tracción como el módulo de elasticidad en la dirección perpendicular a las fibras. Estos datos son importantes ya que en la capa con las fibras orientadas a 90° con respecto a la carga es donde aparecerán las grietas a estudiar en los laminados cruzados que se ensayan en este trabajo.

Se han ensayado un total de 5 probetas de laminado unidireccional $[90]_5$ a rotura. Finalmente, sólo han sido tenidos en cuenta los resultados de 4 de las 5 probetas ensayadas debido a que una de ellas (90p5) rompió por la zona pegada a uno de los dos tacones, anulando la validez del ensayo.



Figura 5-4. Probeta 90p5 rota por la zona del tacón

Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)
90p1	24.75	1.40	34.65
90p2	25.12	1.39	34.92
90p3	24.91	1.40	34.87
90p4	24.86	1.42	35.30

Tabla 5-3. Dimensiones de las probetas de laminado unidireccional a 90°

A continuación, se muestra una gráfica con los resultados de los ensayos de las cuatro probetas. Es importante recalcar que, debido a la dificultad para empezar los ensayos con carga exactamente nula, se ha hecho una pequeña corrección en cada curva, desplazándola hacia la derecha para que partan del punto (0,0), de forma que el tramo añadido resultante tenga la misma pendiente que la propia curva. Esta corrección sólo afectaría a la deformación de rotura, que se obtendría con mayor precisión; quedando exactamente igual tanto la tensión de rotura como el módulo de elasticidad.

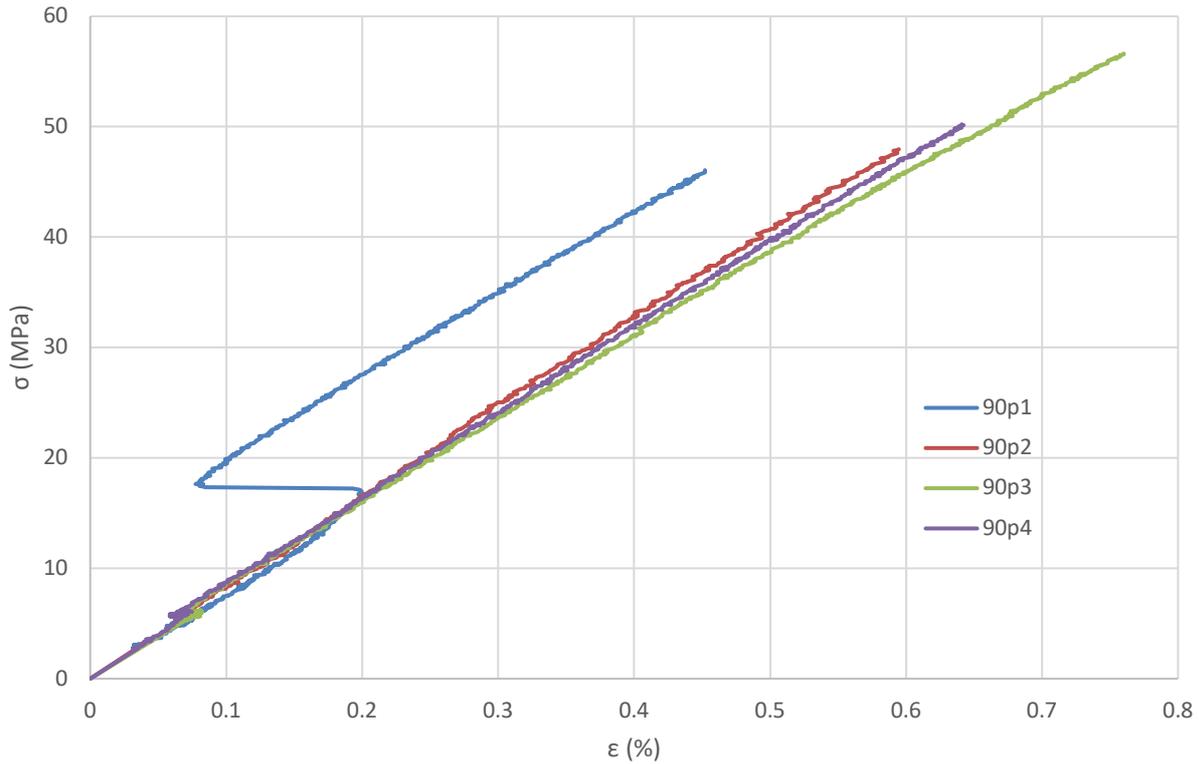


Figura 5-5. Curvas σ - ϵ de los ensayos de las diferentes probetas del panel unidireccional a 90°

En la figura anterior se puede observar que las pendientes de todas las curvas son bastante similares, por lo que la dispersión será pequeña en la obtención del módulo de Young. En cambio, en el caso de los valores de tensión y deformación de rotura puede apreciarse que la dispersión es mayor.

Observando la curva de la probeta 90p1 puede advertirse una llamativa anomalía en torno al 0.2 % de deformación que sugiere que se ha producido un resbalamiento de las patillas del extensómetro durante la realización del ensayo. Esto afecta directamente al resultado de la deformación crítica, provocando que disminuya de manera considerable y haciendo que sea bastante diferente del que cabría esperar. Esta situación puede ser abordada de dos formas: eliminando la probeta 90p1 de los resultados, o bien, haciendo una corrección en el segundo tramo de la curva para suprimir en la medida de lo posible el efecto del resbalamiento en los resultados.

A la vista de la similitud con el resto de las curvas y teniendo en cuenta que la muestra de probetas ensayadas no es muy grande, menos aún después de la eliminación de la probeta 90p5 a causa de su rotura por la zona adyacente al tacón de refuerzo, se ha considerado que el resbalamiento puede ser subsanado satisfactoriamente con un mero desplazamiento horizontal hacia la derecha del tramo siguiente a la anomalía.

La gráfica corregida queda de la siguiente manera:

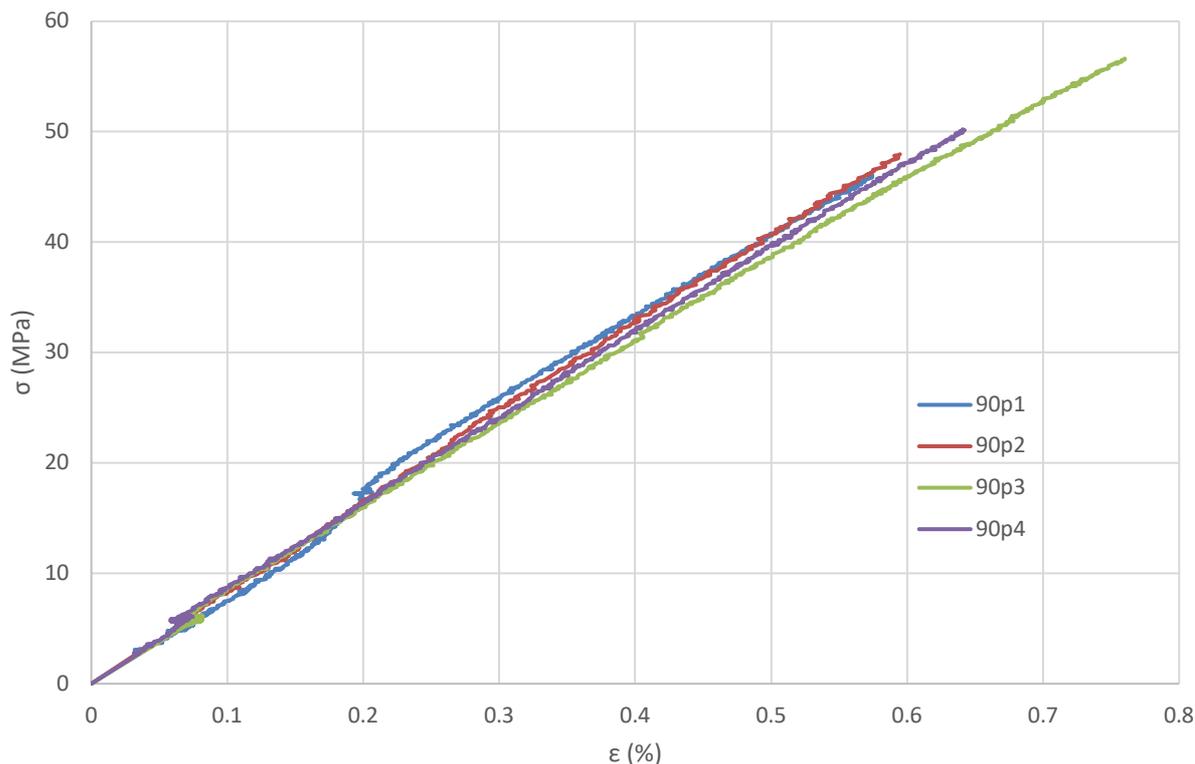


Figura 5-6. Ídem figura 5-4, con la curva correspondiente a la probeta 90p1 corregida

En la tabla siguiente se muestran los resultados obtenidos para cada una de las probetas de fuerza máxima soportada (F_{max}), módulo de elasticidad (E_{22}), resistencia a tracción (Y_t) y deformación de rotura ($Y_{\epsilon t}$). También se ha incluido la deformación crítica obtenida a partir de la expresión (5-3) como referencia.

$$Y_{\epsilon t} = \frac{Y_t}{\epsilon} \quad (5-7)$$

Probeta	Área (mm ²)	E_{22} (GPa)	Y_t (MPa)	$Y_{\epsilon t}$	Y_t/ϵ
90p1	34.65	7.345	46.063	0.005743	0.006271
90p2	34.92	8.159	47.958	0.005947	0.005878
90p3	34.87	7.567	56.625	0.007601	0.007483
90p4	35.30	7.770	50.271	0.006423	0.006470

Tabla 5-4. Resultados de los ensayos

Se presentará a continuación un análisis estadístico de los resultados de E_{22} , Y_t e $Y_{\epsilon t}$ como comprobación de la

dispersión resultante, para lo que se vuelven a emplear las ecuaciones de la (5-3) a la (5-6). Asimismo, se añadirán unos gráficos comparativos de los resultados obtenidos para las diferentes probetas con los valores medios correspondientes.

Primero se muestra el análisis de los resultados de E_{22} :

E_{22}	
\bar{E}_{22} (GPa)	7.710
s (GPa)	3.456
C_V (%)	4.48
$\epsilon_R(90p1)$ (%)	4.74
$\epsilon_R(90p2)$ (%)	5.81
$\epsilon_R(90p3)$ (%)	1.86
$\epsilon_R(90p4)$ (%)	0.78

Tabla 5-5. Resultados estadísticos de E_{22}

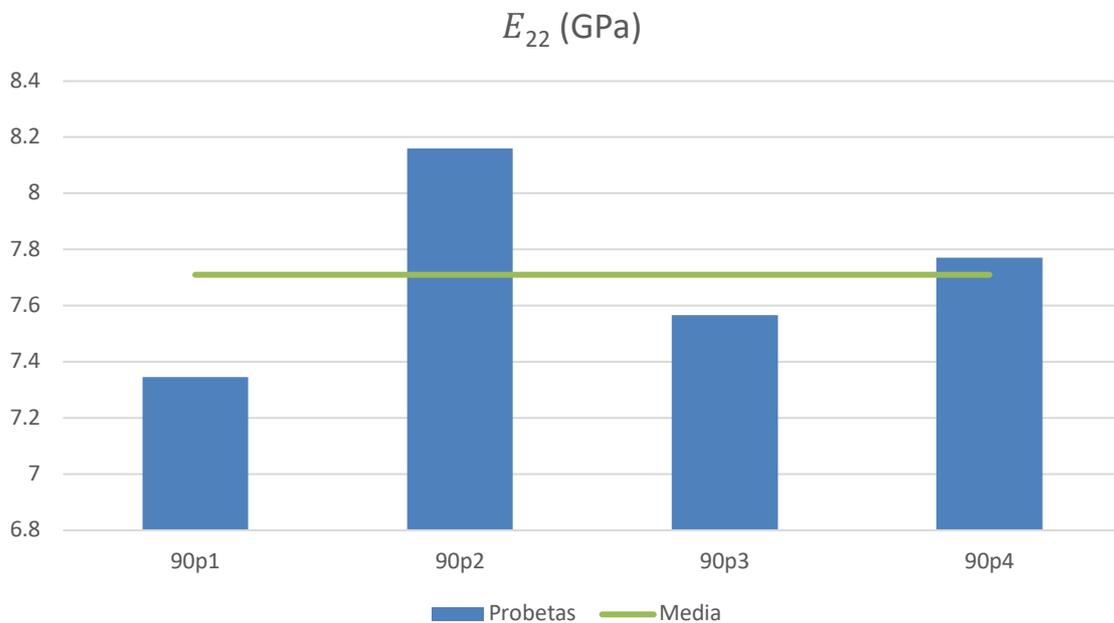


Figura 5-7. Gráfico comparativo de resultados de E_{22} de las diferentes probetas con la media

En segundo lugar, se presenta el mismo análisis, esta vez aplicado a los resultados de Y_t :

Y_t	
\bar{Y}_t (MPa)	50.230
s (MPa)	4.598
C_v (%)	9.15
$\epsilon_R(90p1)$ (%)	8.29
$\epsilon_R(90p2)$ (%)	4.52
$\epsilon_R(90p3)$ (%)	12.73
$\epsilon_R(90p4)$ (%)	0.08

Tabla 5-6. Resultados estadísticos de Y_t

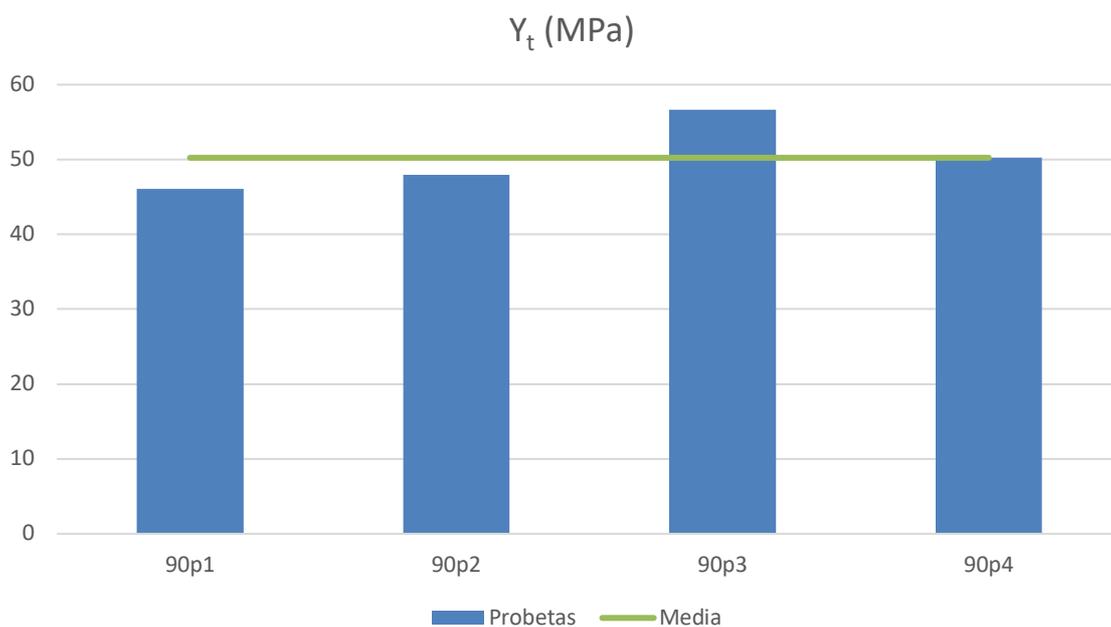
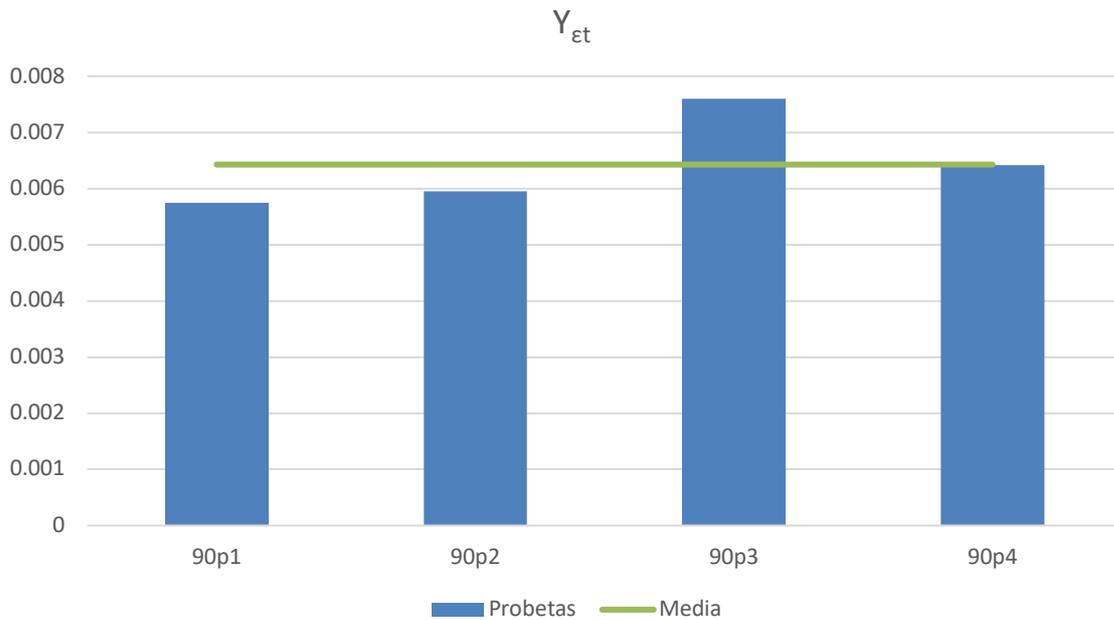


Figura 5-8. Gráfico comparativo de resultados de Y_t de las diferentes probetas con la media

Por último, se analizan los resultados de $Y_{\epsilon t}$:

$Y_{\varepsilon t}$	
$\bar{Y}_{\varepsilon t}$	0.006429
s	0.00083193
C_V (%)	12.94
$\varepsilon_R(90p1)$ (%)	10.66
$\varepsilon_R(90p2)$ (%)	7.49
$\varepsilon_R(90p3)$ (%)	18.24
$\varepsilon_R(90p4)$ (%)	0.09

Tabla 5-7. Resultados estadísticos de $Y_{\varepsilon t}$ Figura 5-9. Gráfico comparativo de resultados de $Y_{\varepsilon t}$ de las diferentes probetas con la media

Para concluir este apartado, es importante comentar que los resultados tanto de E_{22} (7.710 GPa) como de Y_t (50.230 MPa) son sensiblemente inferiores a los especificados por el fabricante: 10 GPa y 81 MPa, respectivamente. Esto puede ser debido, como ya se ha mencionado en el apartado anterior, al mal estado de conservación del material empleado, ya que en estas propiedades la matriz juega un papel fundamental y es precisamente esta la que más deterioro sufre con el tiempo y las condiciones de conservación del material.

5.1.3 Ensayos de laminados cruzados

En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos de deformación crítica (correspondiente a la aparición de la primera grieta) para los diferentes espesores, tanto en tablas con los datos numéricos, como las correspondientes representaciones gráficas. Estos resultados son fruto de dos enfoques diferentes: por un lado, se considera primera grieta aquella que se detecta primero, y por otro, la primera grieta es considerada como tal cuando está sucedida por más grietas, según el siguiente criterio [5]:

- Una segunda grieta aparece en los 5 segundos subsiguientes (correspondiendo a un incremento aproximado en la deformación de un 0.0026%).
- Una tercera en los 10 segundos subsiguientes (correspondiendo a un incremento aproximado en la deformación de un 0.0052%).
- Una cuarta en los 30 segundos subsiguientes (correspondiendo a un incremento aproximado en la deformación de un 0.00156%).

Se analizan estos dos casos porque, aunque a priori parezca que únicamente es de interés la aparición de la primera grieta detectada, cuando dicha grieta aparece de manera aislada sin estar sucedida por más grietas, hace que no esté claro que efectivamente se haya alcanzado la deformación crítica buscada. En estos casos, la primera grieta podría estar favorecida por un defecto en el laminado inusualmente grande provocado, por ejemplo, por algún fallo en el proceso de fabricación. Este tipo de fallos se salen del análisis que se lleva a cabo en el presente trabajo, ya que nada tienen que ver con las tensiones residuales térmicas de curado y pueden aparecer a una carga muy inferior a la que el material comienza realmente a fallar. La aparición de estas grietas es más probable cuanto más grueso sea el laminado del que constituya la probeta analizada, ya que en estas es más probable la existencia de defectos. Además, cabe destacar que la aparición de la primera grieta debido a defectos del material entre probetas de las mismas características puede variar sustancialmente. Por estos motivos, en muchos casos la aparición de la primera grieta no es representativa del fallo de las probetas, especialmente de las de mayor grosor. Todo esto se pondrá de manifiesto cuando se comparen los resultados de ambos escenarios para cada uno de los tipos de probetas ensayadas.

5.1.3.1 Panel de configuración [0/90/0] (n1)

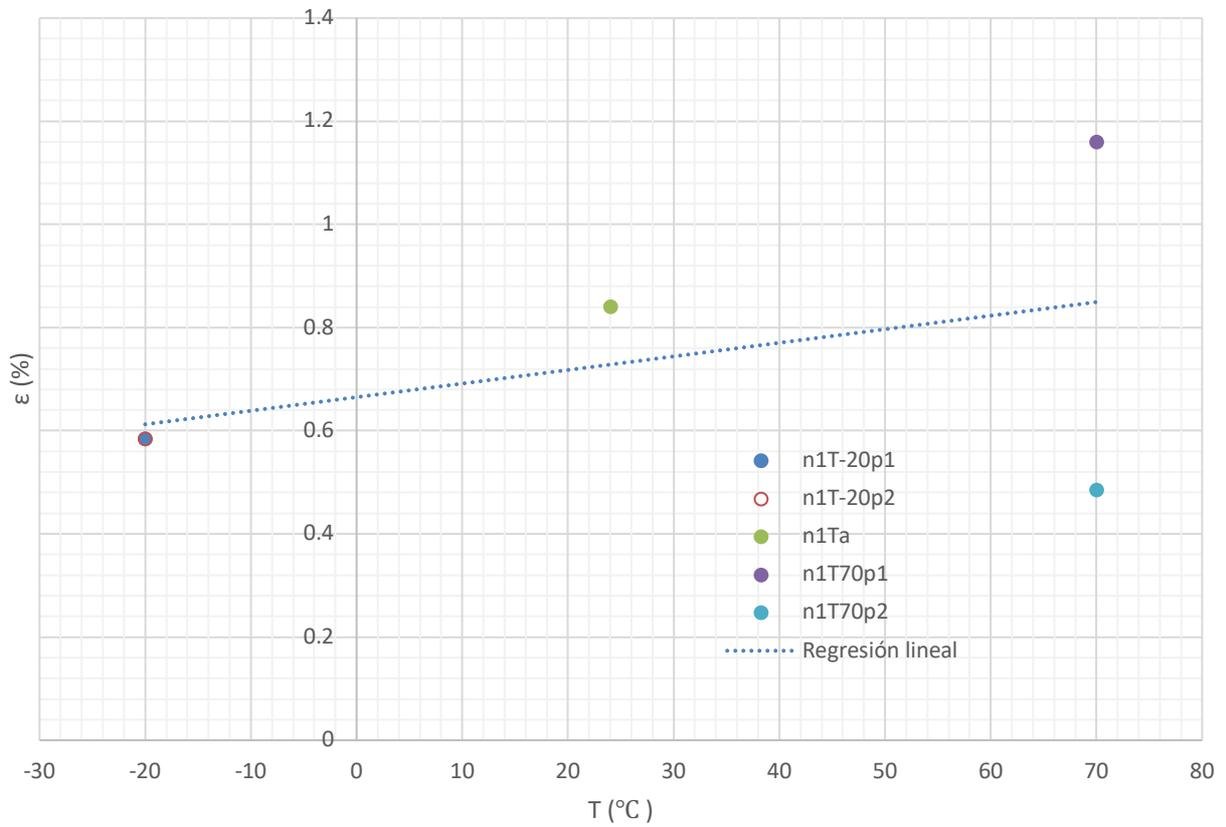


Figura 5-10. Resultados de aparición de primera grieta según ha sido detectada

Probeta	Temperatura (°C)	Deformación crítica, 1ª grieta (%)
n1T-20p1	-20	0.5838
n1T-20p2	-20	0.5841
n1Ta	24	0.8396
n1T70p1	70	1.1598
n1T70p2	70	0.4846

Tabla 5-8. Resultados de aparición de primera grieta según ha sido detectada

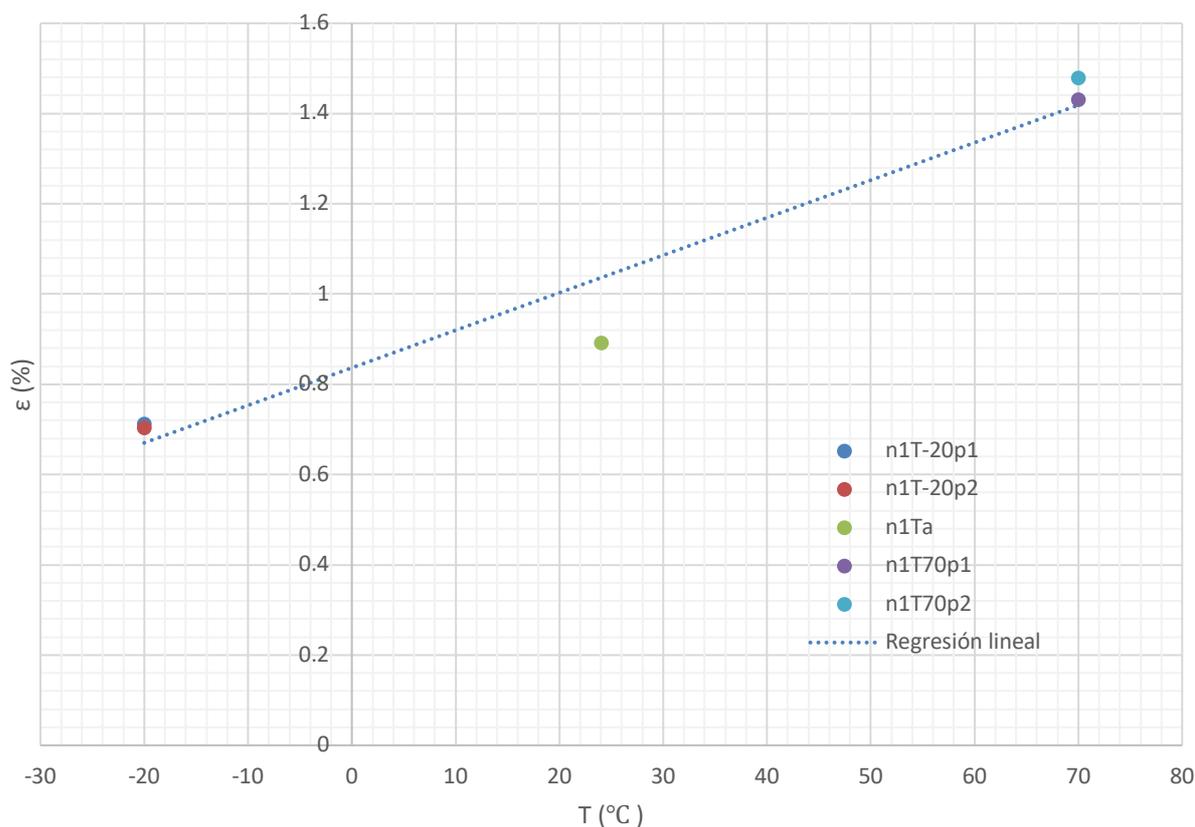


Figura 5-11. Resultados de deformación crítica según el criterio de grietas sucesivas

Probeta	Temperatura (°C)	Deformación crítica según criterio (%)
n1T-20p1	-20	0.7114
n1T-20p2	-20	0.7035
n1Ta	24	0.8906
n1T70p1	70	1.4308
n1T70p2	70	1.4778

Tabla 5-9. Resultados de deformación crítica según el criterio de grietas sucesivas

Se puede observar que en ambos escenarios analizados la tendencia de deformación crítica es creciente con la temperatura. Como era de esperar, en el primer caso las deformaciones críticas obtenidas son sensiblemente inferiores a las del segundo, debido a que no se discrimina un posible fallo por un defecto preexistente inusualmente grande, tal y como se explica al inicio de la sección 4.1.2. Este también podría ser el motivo de la enorme dispersión que presentan los ensayos a 70 °C en el primero de los análisis. Por otra parte, hay que tener en cuenta que en el segundo análisis, para las probetas n170p1 y n1 70p2, no llega a cumplirse el criterio porque se produce la rotura total antes. Se ha tomado la deformación de rotura total como deformación crítica en ambos casos ya que es evidente que, aunque no se haya cumplido el criterio, dicha deformación ha sido

alcanzada.

5.1.3.2 Panel de configuración [0₅/90₅/0₅] (n5)

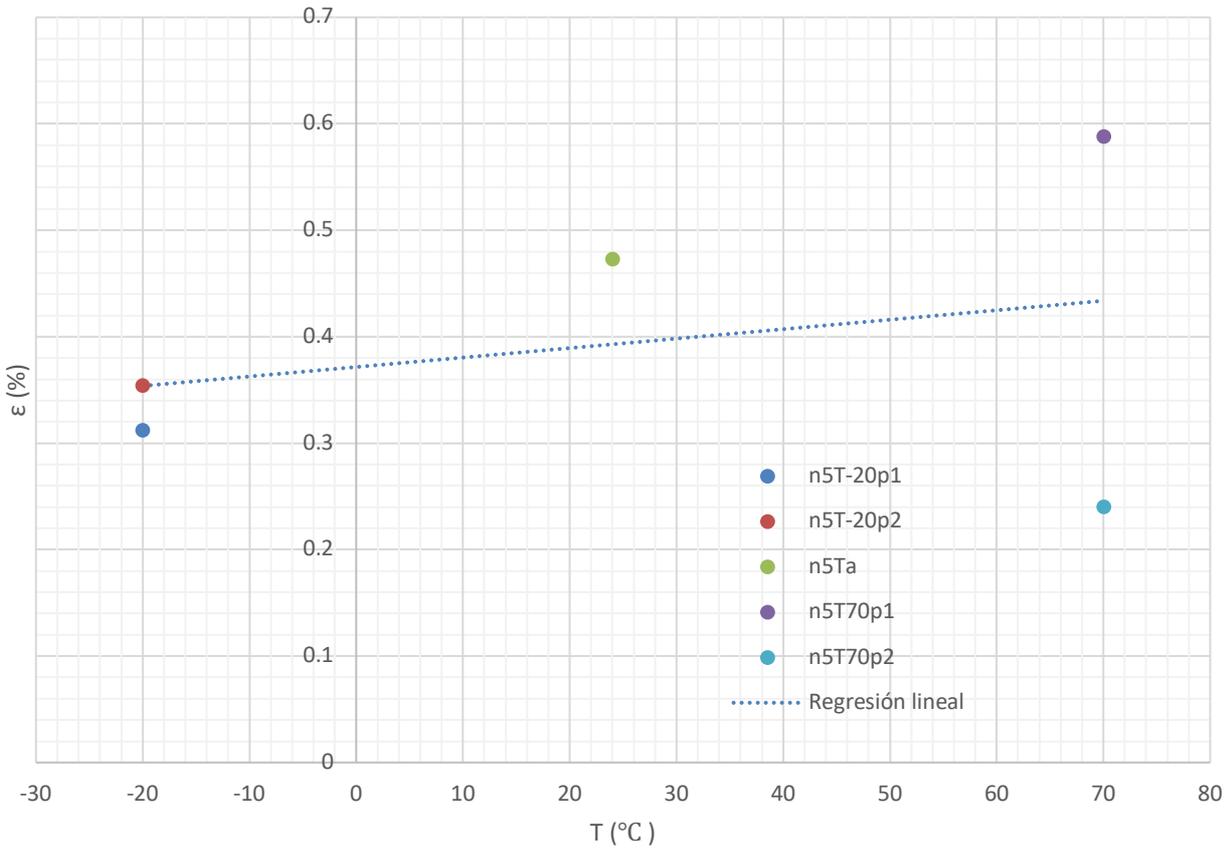


Figura 5-12. Resultados de aparición de primera grieta según ha sido detectada

Probeta	Temperatura (°C)	Deformación crítica, 1ª grieta (%)
n5T-20p1	-20	0.3123
n5T-20p2	-20	0.3542
n5Ta	24	0.4731
n5T70p1	70	0.5880
n5T70p2	70	0.2402

Tabla 5-10. Resultados de aparición de primera grieta según ha sido detectada

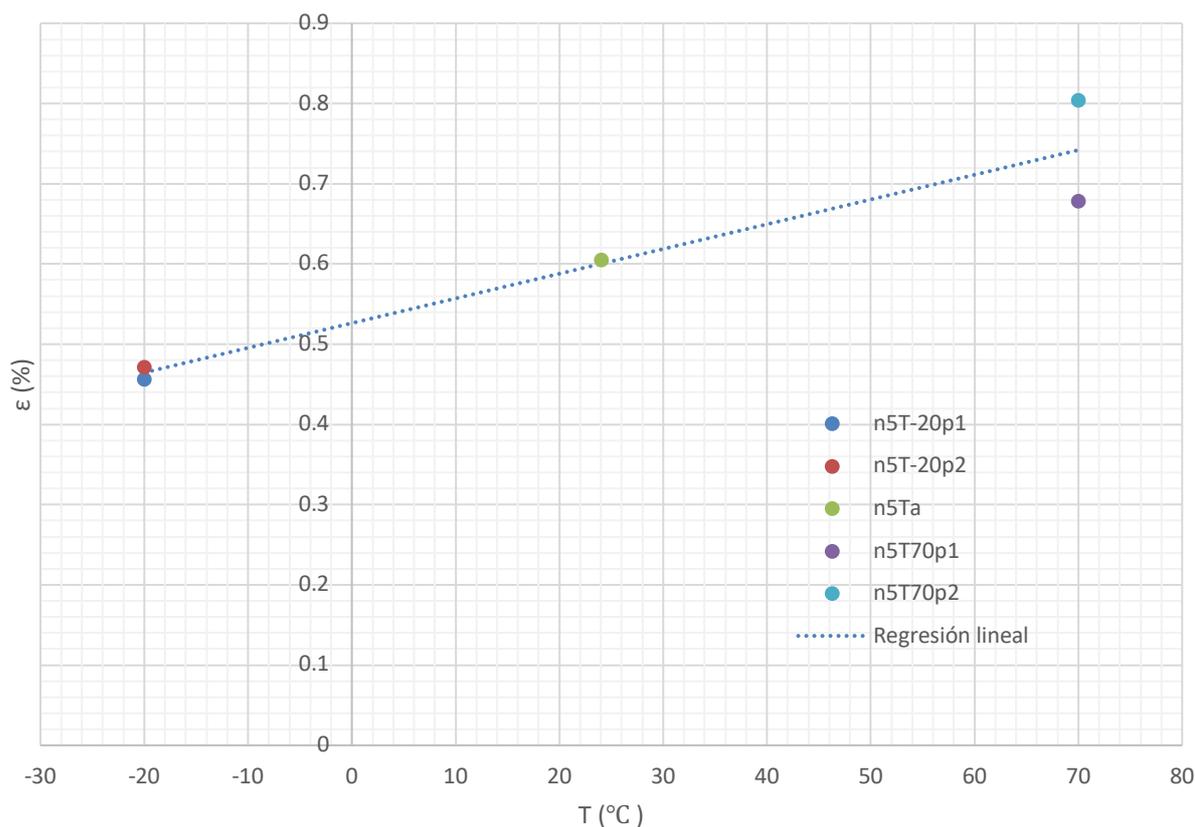


Figura 5-13. Resultados de aparición de primera grieta considerada según el criterio de grietas sucesivas

Probeta	Temperatura (°C)	Deformación crítica según criterio (%)
n5T-20p1	-20	0.4559
n5T-20p2	-20	0.471
n5Ta	24	0.6047
n5T70p1	70	0.6778
n5T70p2	70	0.804

Tabla 5-11. Resultados de deformación crítica según el criterio de grietas sucesivas

Los resultados de los ensayos de las probetas del panel n5 también presentan una tendencia de la deformación crítica creciente con la temperatura de los ensayos en ambos análisis, de forma más acusada en el segundo de ellos. Vuelve a ocurrir, tal y como se esperaba, que la deformación crítica es menor cuando se considera ésta la de aparición de primera grieta (según es detectada). La dispersión vuelve a ser mayor en el primero de los escenarios y, en ambos casos, la dispersión de los resultados es más grande en los ensayos a alta temperatura.

En este panel, de mayor grosor que el anterior, se puede observar también que la primera grieta que aparece,

tanto aislada como predecesora de una serie de grietas consecutivas (según el criterio seguido), ocurre a un nivel de deformación menor que en las probetas del panel n1.

5.1.3.3 Panel de configuración [0₁₀/90₁₀/0₁₀] (n10)

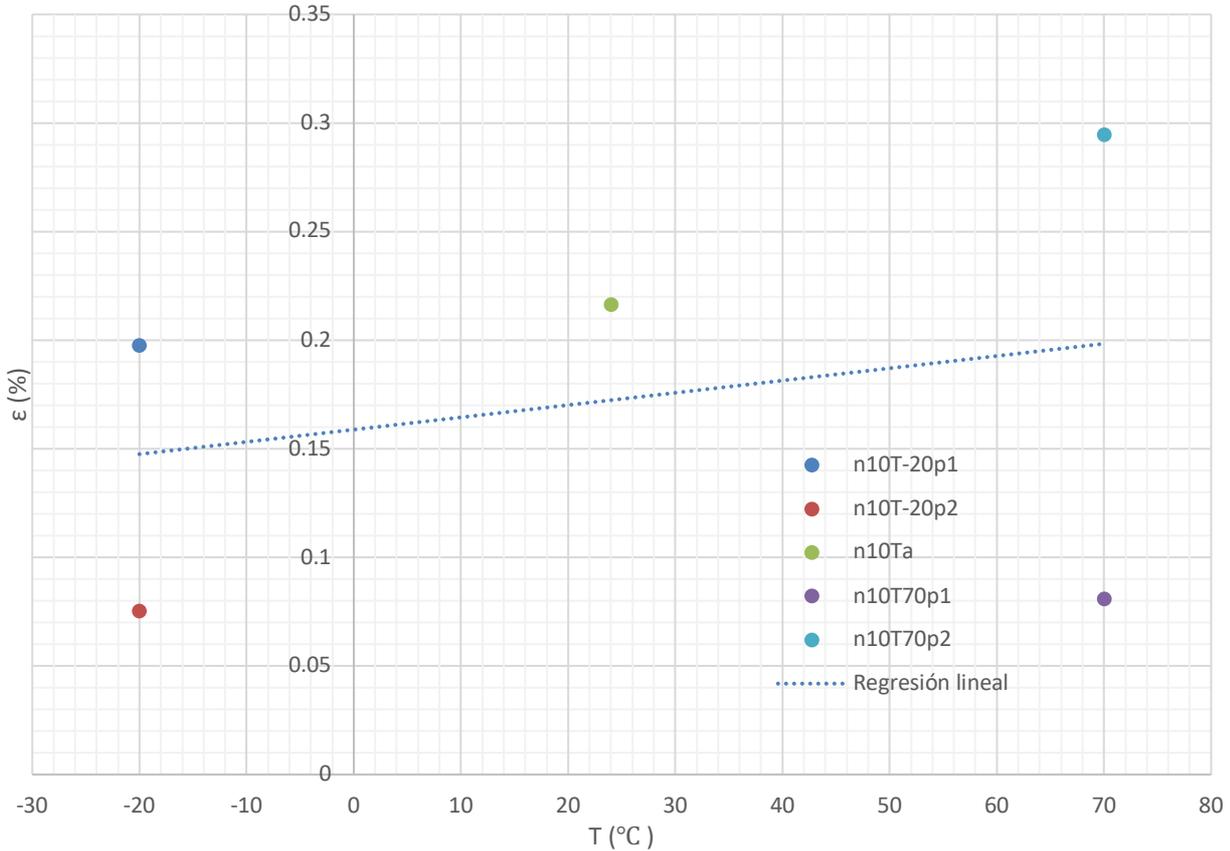


Figura 5-14. Resultados de aparición de primera grieta según ha sido detectada

Probeta	Temperatura (°C)	Deformación crítica, 1ª grieta (%)
n10T-20p1	-20	0.1974
n10T-20p2	-20	0.0752
n10Ta	24	0.2162
n10T70p1	70	0.08065
n10T70p2	70	0.2946

Tabla 5-12. Resultados de aparición de primera grieta según ha sido detectada

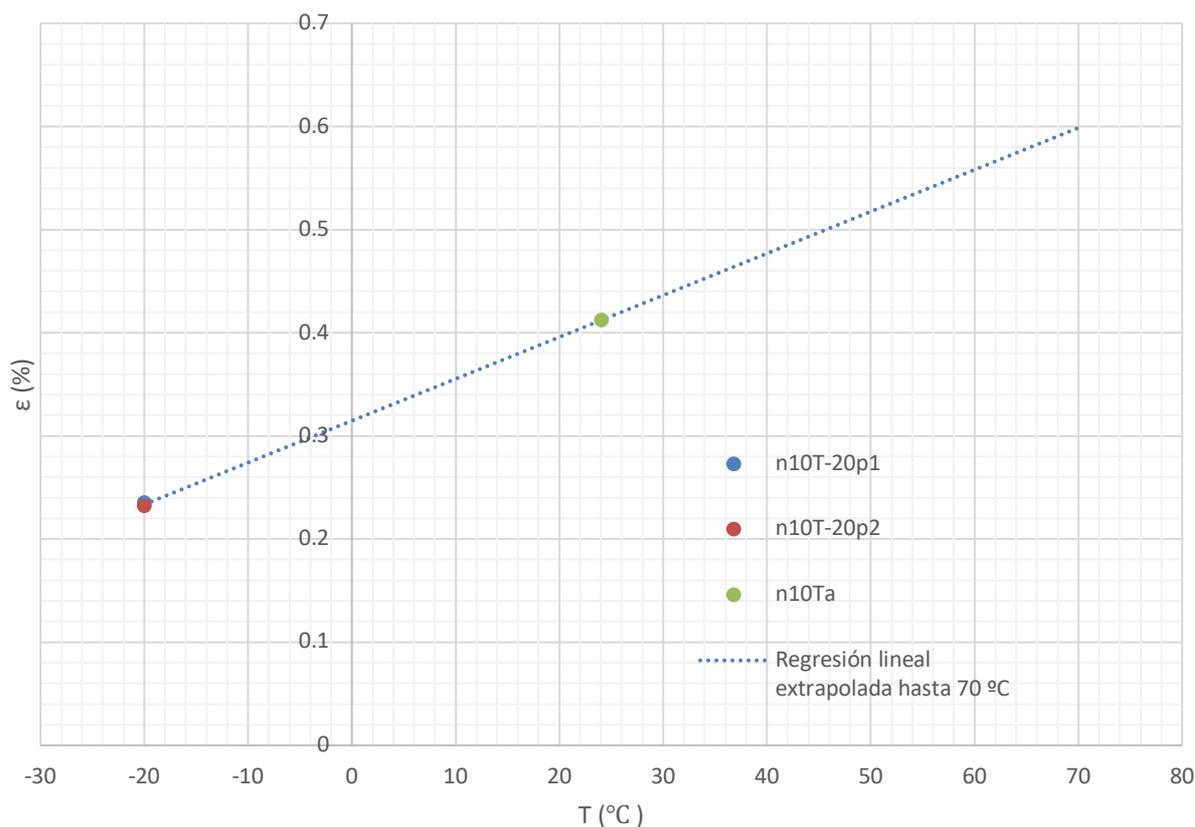


Figura 5-15. Resultados de deformación crítica según el criterio de grietas sucesivas

Probeta	Temperatura (°C)	Deformación crítica según criterio (%)
n10T-20p1	-20	0.2348
n10T-20p2	-20	0.2322
n10Ta	24	0.412
n10T70p1	70	0.43505
n10T70p2	70	0.4142

Tabla 5-13. Resultados de deformación crítica según el criterio de grietas sucesivas

En esta última serie de ensayos, al tratarse de las probetas más gruesas, la diferencia de resultados arrojados por un análisis y el otro es notablemente más alta. Esto puede ser explicado por la mayor probabilidad de existencia de defectos inusualmente grandes que existe en las probetas de mayor grosor. También cabe destacar la enorme dispersión de los resultados en el análisis de primera grieta detectada tanto a baja temperatura como a alta. Las deformaciones críticas vuelven a bajar con respecto a las de las probetas del panel anterior, de menor grosor, en ambos análisis. En cuanto a la tendencia de estas deformaciones críticas, en los dos casos se observa que de nuevo es creciente con la temperatura de ensayo, es decir, cuanto menos se aleje dicha temperatura de la de curado de la resina. Esta tendencia es mucho mayor cuando se considera la

deformación crítica según el criterio de grietas sucesivas hasta el punto de que, en los ensayos de las probetas de la presente serie a alta temperatura, no se llegó a alcanzar la deformación crítica puesto que se llegó a agotar prácticamente la capacidad de la célula de carga utilizada. Por este motivo, en la última gráfica puede verse que la recta de regresión ha sido extrapolada hasta llegar a los 70 °C, para poder dar una idea comparativa con respecto a los ensayos análogos de las probetas más delgadas.

Es destacable también la pequeña dispersión que presentan los resultados de los dos ensayos a -20 °C.

A la vista de los resultados arrojados por los ensayos realizados a las probetas de diferentes grosores, se puede afirmar que las tensiones residuales de curado juegan un papel importante en la aparición de grietas en laminados cruzados de material compuesto. Se ha observado una clara tendencia al retraso de la aparición de las mismas cuanto más cercana sea la temperatura de servicio a la temperatura de curado de la resina.

5.1.4 Ensayo de caracterización termomecánica

Como se ha mencionado en apartados anteriores, en este ensayo se va aumentando la temperatura de la probeta de manera escalonada, obteniéndose unos resultados discretos que, mediante el cálculo de su recta de regresión correspondiente, permite obtener los valores de los coeficientes de dilatación lineal térmica en las direcciones buscadas. A continuación, se muestran los resultados obtenidos tanto en una tabla, como representados gráficamente con las rectas de regresión superpuestas.

Estos resultados son imprescindibles para comprender la aparición de tensiones residuales derivadas de los cambios de temperatura a los que se ven sometidos los laminados durante el proceso de curado.

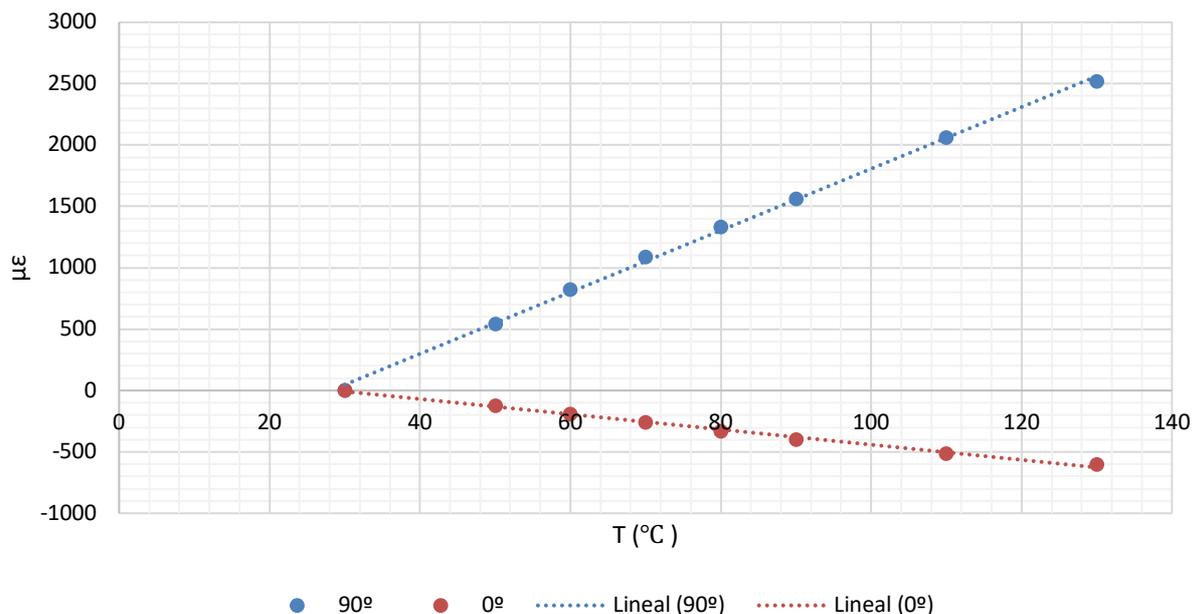


Figura 5-16. Curvas $\mu\epsilon - T$ en dirección de las fibras y perpendicular a estas

T (°C)	$\mu\epsilon$ a 90°	$\mu\epsilon$ a 0°
30	0	0
50	543	- 121
60	823	- 189
70	1087	- 259
80	1332	- 330
90	1562	- 399
110	2061	- 515
130	2521	- 601
α (°C ⁻¹)	25E- 6	- 6E- 6

Tabla 5-14. Resultados numéricos y del cálculo de los coeficientes de dilatación térmica

En la gráfica anterior se puede observar el comportamiento tan dispar que presenta la fibra de carbono con respecto a la matriz de resina epoxi al ser sometidas a incrementos de temperatura. Nótese que mientras que la matriz se comporta de un modo más esperable intuitivamente, con unas deformaciones positivas al ir aumentando la temperatura, en las fibras se produce justamente el efecto opuesto, contrayéndose a medida que la temperatura aumenta. Esto se debe a la ortotropía cilíndrica característica de este tipo de fibras. Es importante destacar también que, aunque se den estos comportamientos opuestos, la fibra de carbono es mucho menos sensible al cambio de temperatura en lo que a cambio de longitud se refiere.

6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES CON MODELO TEÓRICO

Una vez obtenidos los resultados experimentales, en este capítulo se procede a compararlos con los resultados del modelo teórico desarrollado por Israel García y otros en [2].

6.1 Introducción al modelo teórico

Se considera una probeta de material compuesto carbono/epoxi de laminado cruzado, con configuración [0/90/0] sometida a tracción pura. Según el artículo [2], en la meso-escala (escala a nivel de lámina) uno de los mecanismos de inicio de fallo más relevantes es la aparición de grietas transversales en las láminas fuera del eje en el que se aplica el esfuerzo. El modelo con el que se compararán los resultados experimentales obtenidos se centra en la influencia que ejercen las tensiones residuales térmicas en la primera iniciación de grieta en laminados cruzados. Para ello, el problema global es dividido en la suma de dos: el problema ε , que tiene en cuenta la tanto la deformación uniforme provocada por el esfuerzo mecánico al que se somete la probeta ε_{yy} , como la deformación uniforme provocada por el proceso de enfriamiento en caso de de que se deforme libremente; y el problema ΔT , que tiene en cuenta exclusivamente la deformación debida al incremento de temperatura del laminado con los extremos empotrados, como se muestra en la figura 6-1.

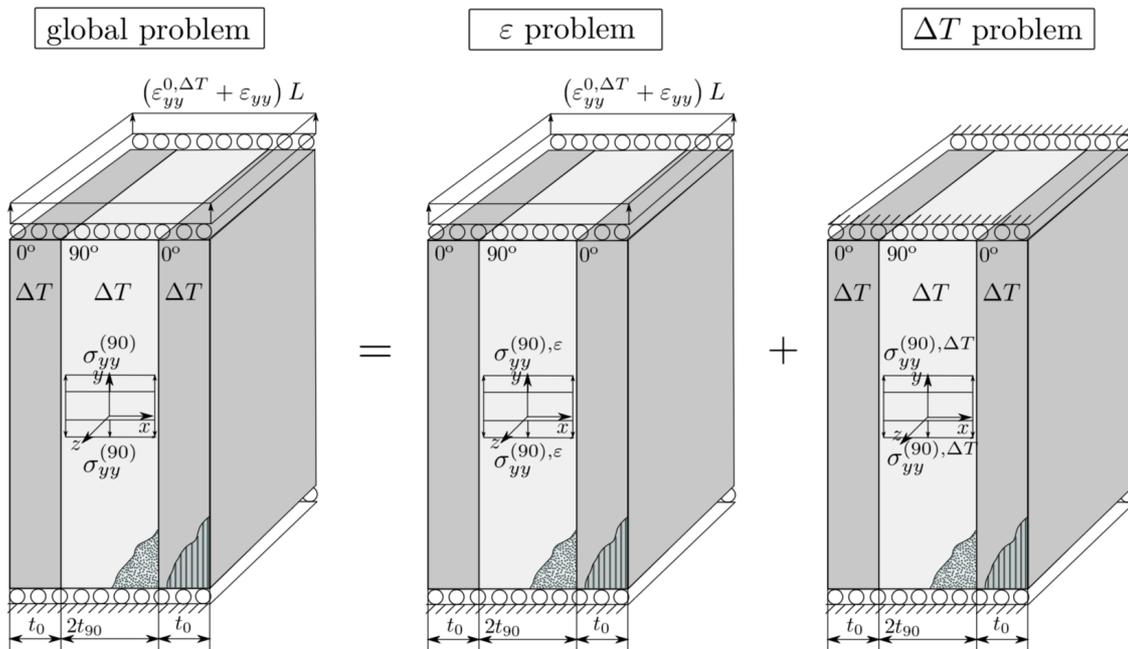


Figura 6-1. Esquema ilustrativo de la superposición de problemas [2]

El modelo del artículo está basado en las siguientes hipótesis:

- La iniciación de grieta ocurre como una aparición de grieta de longitud finita.
- Para que se produzca la iniciación de grietas es necesaria la satisfacción simultánea de los criterios de tensión y de energía.
- El modelo se desarrolla bajo las hipótesis de deformación plana generalizada.

A continuación, se introducen brevemente los criterios de tensión y de energía.

6.2 Criterio de tensión considerando las tensiones residuales térmicas [2]

Este criterio establece que la aparición de grieta es posible cuando se alcanza una tensión en la capa interna del laminado superior o igual a la resistencia transversal a tracción Y_t ,

$$\sigma_{yy}^{(90)} \geq Y_t \quad (6-1)$$

Siendo $\sigma_{yy}^{(90)}$ la tensión del problema completo, obtenida a partir de la suma de las tensiones de ambos problemas expuestos anteriormente:

$$\sigma_{yy}^{(90)} = \sigma_{yy}^{(90),\varepsilon} + \sigma_{yy}^{(90),\Delta T} \quad (6-2)$$

Sustituyendo las expresiones de $\sigma_{yy}^{(90),\varepsilon}$ y $\sigma_{yy}^{(90),\Delta T}$ en (6-1) y reordenando se llega a la siguiente expresión para el criterio de tensión, teniendo en cuenta el efecto de las tensiones residuales térmicas:

$$\frac{\varepsilon_{yy}}{Y_{\varepsilon t}} \geq \frac{E_{22}}{\tilde{E}_{22}} - \frac{\alpha_2 \Delta T}{Y_{\varepsilon t}} \left(k^{0,\Delta T} - \frac{E_{22}}{\tilde{E}_{22}} k^{90,\Delta T} \right) \quad (6-3)$$

Donde \tilde{E}_{22} es el módulo de Young transversal aparente de la capa interna a 90° en la dirección y ; α_2 es el coeficiente de dilatación térmica en la dirección perpendicular a las fibras y $k^{0,\Delta T}$, $k^{90,\Delta T}$ son funciones con expresión de forma cerrada:

$$\frac{E_{22}}{\tilde{E}_{22}} = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{1 + \frac{t_0}{t_{90}}} \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{1 + \frac{E_{22}}{E_{11}} \frac{t_0}{t_{90}}} \quad (6-4)$$

$$k^{0,\Delta T} \left(\frac{E_{22}}{E_{11}}, \nu_{12}, \frac{t_0}{t_{90}}, \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) = \frac{k_1 \left(\frac{E_{22}}{E_{11}}, \nu_{12}, \frac{t_0}{t_{90}}, \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) - k_2 \left(\frac{E_{22}}{E_{11}}, \nu_{12}, \frac{t_0}{t_{90}}, \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)}{k_3 \left(\frac{E_{22}}{E_{11}}, \nu_{12}, \frac{t_0}{t_{90}}, \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)} \quad (6-5)$$

$$k_1 \left(\frac{E_{22}}{E_{11}}, \nu_{12}, \frac{t_0}{t_{90}}, \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) = \frac{t_0}{t_{90}} \frac{\alpha_1}{\alpha_2} + \frac{E_{22}}{E_{11}} \left(1 + \left(\frac{t_0}{t_{90}} \right)^2 \frac{\alpha_1}{\alpha_2} + \nu_{12} \frac{t_0}{t_{90}} \left(1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) \right) \quad (6-5a)$$

$$k_2 \left(\frac{E_{22}}{E_{11}}, \nu_{12}, \frac{t_0}{t_{90}}, \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) = \left(\frac{E_{22}}{E_{11}} \right)^2 \left(\frac{t_0}{t_{90}} \left(\nu_{12} \left(1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) - 1 \right) + \nu_{12}^2 \left(1 + \frac{t_0}{t_{90}} \right) \left(1 + \frac{t_0}{t_{90}} \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) \right) \quad (6-5b)$$

$$k_3 \left(\frac{E_{22}}{E_{11}}, \nu_{12}, \frac{t_0}{t_{90}}, \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) = \frac{t_0}{t_{90}} + \frac{E_{22}}{E_{11}} \left(1 + \left(\frac{t_0}{t_{90}} \right)^2 \right) - \left(\frac{E_{22}}{E_{11}} \right)^2 \left(\nu_{12}^2 \left(1 + \frac{t_0}{t_{90}} \right)^2 - \frac{t_0}{t_{90}} \right) \quad (6-5c)$$

$$k^{(90),\Delta T} \left(\frac{E_{22}}{E_{11}}, \nu_{12}, \frac{t_0}{t_{90}}, \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) = \frac{1 - \frac{E_{22}}{E_{11}} \left(\frac{t_0}{t_{90}} \left(\nu_{12} \left(1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) - 1 \right) + \nu_{12}^2 \left(1 + \frac{t_0}{t_{90}} \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) \right)}{\left(1 - \frac{E_{22}}{E_{11}} \nu_{12}^2 \right) \left(\frac{E_{22}}{E_{11}} \frac{t_0}{t_{90}} + 1 \right)} \quad (6-6)$$

6.3 Criterio de energía considerando las tensiones residuales térmicas

El criterio de energía establece que la aparición de grieta es posible si el balance energético entre los estados previo y posterior a la aparición de la grieta cumple con el Primer Principio de la Termodinámica durante dicha aparición. El balance energético asumiendo un estado inicial cuasi-estático se expresa como:

$$\int_0^a G(a) da \geq G_c \Delta a \quad (6-7)$$

Donde $G(a)$ es la tasa de liberación de energía de una grieta central de semilongitud a . G_c es la resistencia a la fractura transversal en modo I.

Enfocando el problema de manera análoga a la del anterior criterio, en el artículo de referencia se propone la expresión siguiente para el criterio energético:

$$\frac{\varepsilon_{yy}}{Y_{\varepsilon t}} \geq \gamma \sqrt{g(\Delta \hat{a})} - \frac{\alpha_2 \Delta T}{Y_{\varepsilon t}} \left(k^{0, \Delta T} - \frac{E_{22}}{\bar{E}_{22}} k^{(90), \Delta T} \right) \quad (6-8)$$

Donde γ es el número adimensional de fragilidad,

$$\gamma = \frac{1}{Y_t} \sqrt{\frac{E_{22} G_c}{t_{90}}} \quad (6-9)$$

\hat{a} es la semilongitud adimensional de la grieta,

$$\hat{a} = a/t_{90} \quad (6-10)$$

Y $g(\Delta \hat{a})$ es una función adimensional, mirar Sección 3 de artículo de referencia [2].

6.4 Criterio acoplado para el modelo termo-mecánico de la mecánica de la fractura finita

Se trata de una combinación de los dos modelos anteriormente introducidos. De acuerdo con la hipótesis de Leguillon [7], la deformación crítica ε_{yy}^c viene dada por el mínimo valor de ε_{yy} que cumpla ambos criterios (de tensión y energético) simultáneamente. De este modo, combinando las expresiones (6-3) y (6-8), se llega a la siguiente condición para la aparición de grieta transversal,

$$\frac{\varepsilon_{yy}^c}{Y_{\varepsilon t}} = \min_{\Delta \hat{a}} \left[\max \left(\frac{E_{22}}{\bar{E}_{22}}, \gamma \sqrt{g(\Delta \hat{a})} \right) \right] - \frac{\alpha_2 \Delta T}{Y_{\varepsilon t}} \left(k^{0, \Delta T} - \frac{E_{22}}{\bar{E}_{22}} k^{(90), \Delta T} \right) \quad (6-11)$$

Esta condición puede ser reescrita de la siguiente manera,

$$\frac{\varepsilon_{yy}^c}{Y_{\varepsilon t}} = \max \left(\frac{E_{22}}{\bar{E}_{22}}, \gamma \sqrt{g(\Delta \hat{a}_{min, g})} \right) - \frac{\varepsilon^{\Delta T}}{Y_{\varepsilon t}} \quad (6-12)$$

Donde $\Delta \hat{a}_{min, g}$ es el valor óptimo de la semilongitud de grieta después de su aparición minimizando la función g .

$\varepsilon^{\Delta T}$ es la deformación elástica residual asociada a las tensiones residuales térmicas, definida como,

$$\varepsilon^{\Delta T} = \alpha_2 \Delta T \left(k^{0, \Delta T} - \frac{E_{22}}{\bar{E}_{22}} k^{(90), \Delta T} \right) \quad (6-13)$$

6.5 Comparación de resultados teóricos y experimentales

La expresión (6-13) es la que da la información acerca de la variación de las tensiones residuales en función del incremento de temperatura. Así, la pendiente de ΔT en dicha expresión es la que se empleará como referencia para comparar con los resultados experimentales.

En este trabajo se analiza el efecto de las tensiones residuales térmicas provocadas por el curado, de forma que el aumento de temperatura en los ensayos realizados representa un ΔT negativo con respecto a la temperatura de curado, lo que lleva a una relajación de las tensiones residuales provocadas por este, aumentando así el valor de la deformación crítica, ε_{yy}^c . De este modo, los resultados obtenidos de deformación crítica en función de la temperatura de ensayo para los diferentes espesores habrá de ser comparada con el opuesto de la pendiente de ΔT en la expresión (6-13), es decir,

$$m = -\alpha_2 \left(k^{0,\Delta T} - \frac{E_{22}}{\bar{E}_{22}} k^{(90),\Delta T} \right) \quad (6-14)$$

Donde se ha llamado m a la pendiente.

Propiedades del material	
E_{11} (GPa)	123.54
E_{22} (GPa)	7.71
ν_{12}	0.3
ν_{21}	0.019
α_1 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	- 6E- 6
α_2 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	25E- 6

Tabla 6-1. Propiedades del material empleado en los ensayos

Como la relación $\frac{t_0}{t_{90}}$ se mantiene constante para todos los espesores ensayados, únicamente hay una pendiente m teórica con la que comparar. Sustituyendo las propiedades de la Tabla 6-1 en las ecuaciones (6-4), (6-5), (6-6) y los valores obtenidos para $k^{0,\Delta T}$, $\frac{E_{22}}{\bar{E}_{22}}$, $k^{(90),\Delta T}$ en la ecuación (6-14), se llega al siguiente valor de m ,

$$m = 2.89 \cdot 10^{-5} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

Para hacer la comparación más clara y visual entre el resultado teórico y los resultados experimentales, se hará mediante representaciones gráficas. Como lo único que se compara es la pendiente, pero no se conoce la altura

teórica de la recta, la representación se hará superponiendo la recta de pendiente teórica m sobre los resultados experimentales obtenidos, de forma que corte a las rectas de regresión de dichos resultados a temperatura ambiente (24 °C) como mera referencia, manteniéndose también las nubes de puntos para facilitar el análisis.

A continuación, se muestran las gráficas comparativas por espesores, empleando los resultados de los dos análisis realizados de los ensayos (deformación crítica correspondiente a la primera grieta detectada y según el criterio explicado en el apartado 5.1.3).

6.5.1 Comparación para el panel de configuración [0/90/0] (n1)

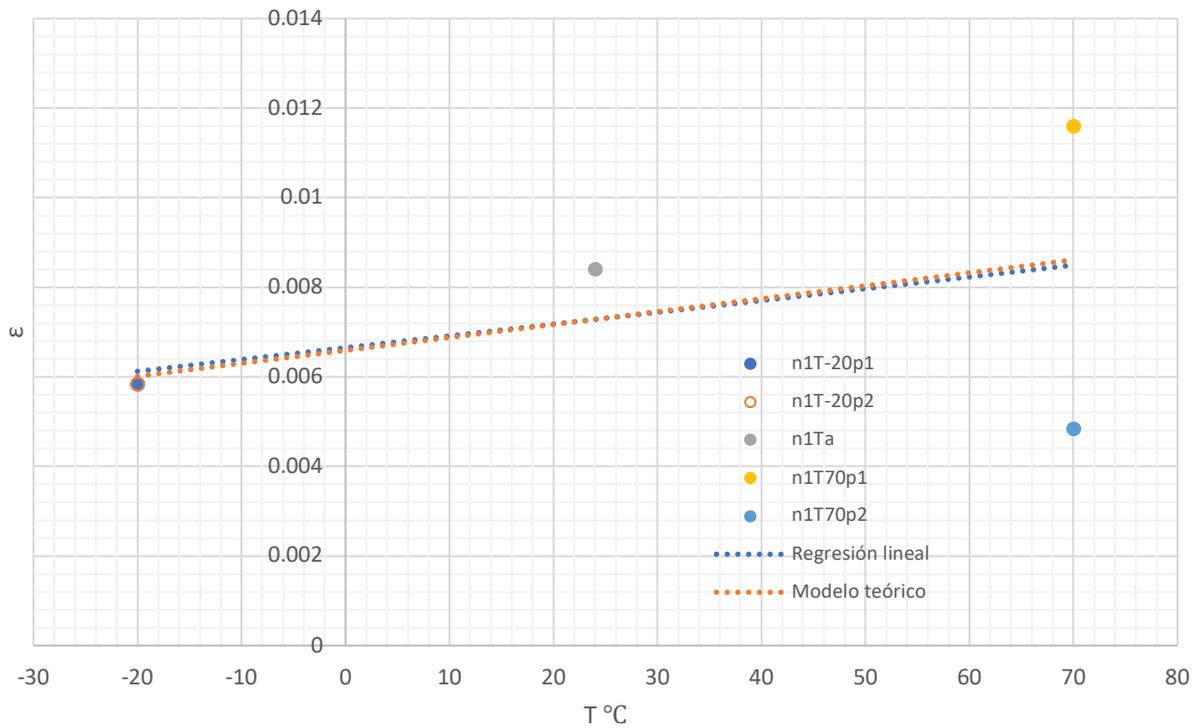


Figura 6-2. Comparativa con análisis de primera grieta detectada para panel n1

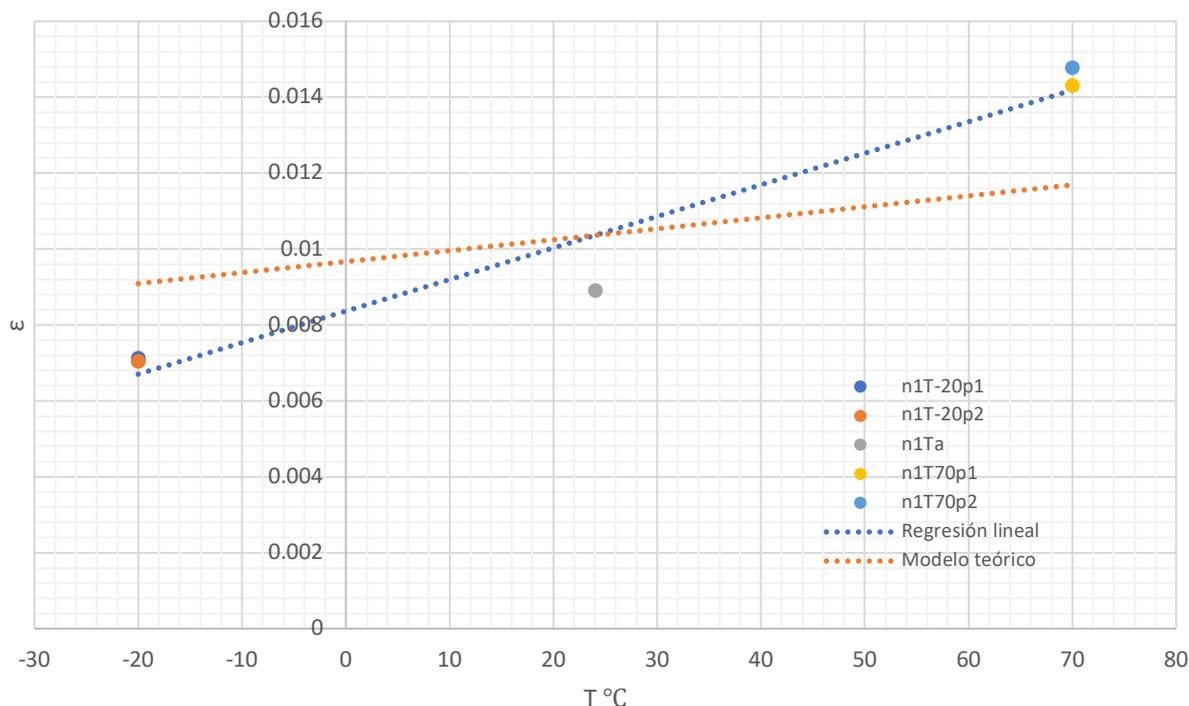


Figura 6-3. Comparativa con análisis según criterio para panel n1

m (teórica) ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	m (experimental, 1ª grieta) ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	m (experimental, criterio) ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
$2.89 \cdot 10^{-5}$	$2.63 \cdot 10^{-5}$	$8.32 \cdot 10^{-5}$

Tabla 6-2. Comparativa de pendientes para el panel n1

Para este panel, el más delgado, puede observarse en el primero de los análisis una gran coincidencia entre la pendiente de la regresión lineal de los ensayos y la pendiente de la recta teórica. Sin embargo, aunque los resultados de los ensayos realizados a baja temperatura sean prácticamente idénticos, no puede decirse lo mismo de los realizados a alta temperatura, que presentan una gran dispersión por lo que no hay suficiente consistencia para validar el resultado teórico.

El ajuste del resultado experimental según el criterio de grietas sucesivas al resultado teórico es notablemente inferior que en el primer análisis. Hay que tener en cuenta que los resultados experimentales en este caso tienen una dispersión general menor, por lo que a priori podrían considerarse más concluyentes, aunque sería conveniente comprobar la tendencia con un mayor número de probetas.

Es destacable el hecho de que, como se podrá comprobar en los siguientes subapartados, el panel **n1** es el único con el que ocurre que los resultados con el análisis de primera grieta detectada se aproximan más al resultado teórico que los resultados aplicando el criterio.

6.5.2 Comparación para el panel de configuración [0₅/90₅/0₅] (n5)

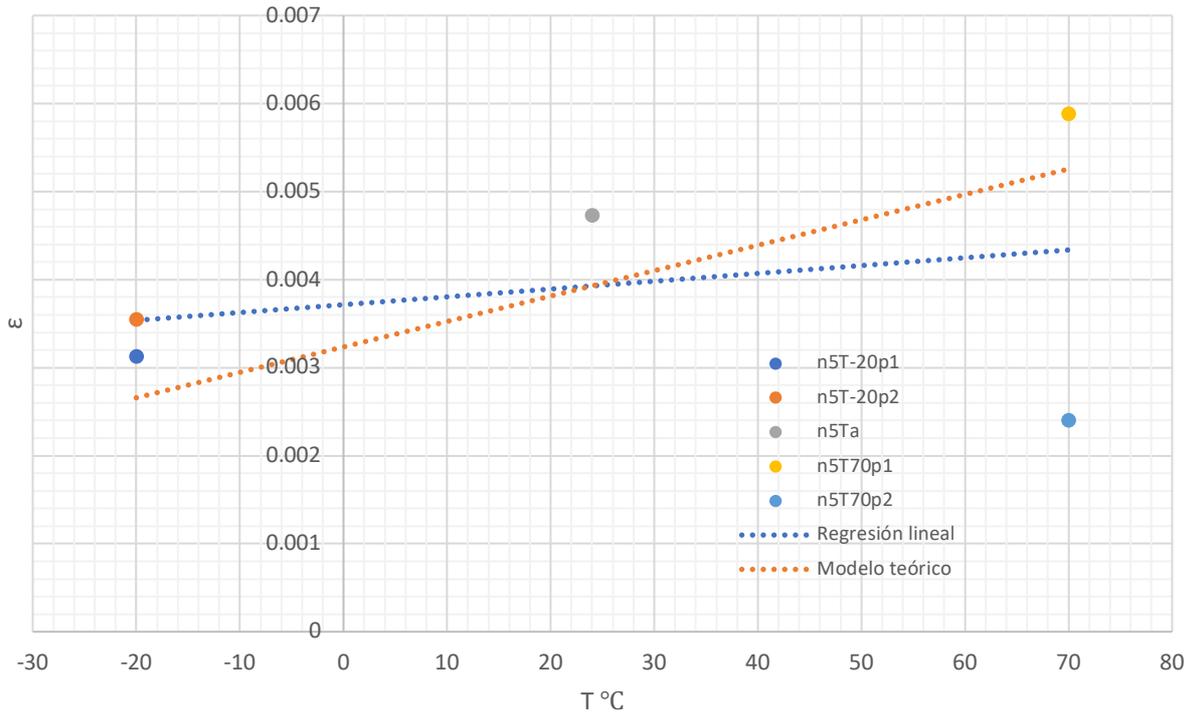


Figura 6-4. Comparativa con análisis de primera grieta detectada para panel n5

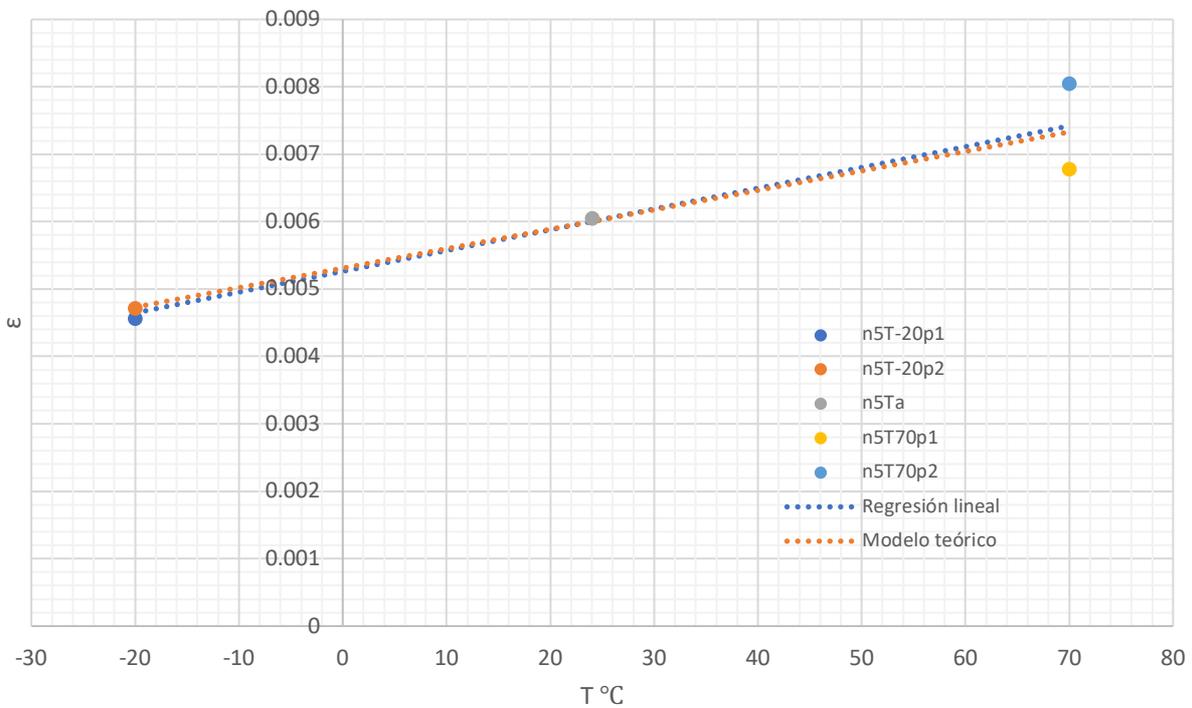


Figura 6-5. Comparativa con análisis según criterio para panel n5

m (teórica) ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	m (experimental, 1ª grieta) ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	m (experimental, criterio) ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
$2.89 \cdot 10^{-5}$	$8.88 \cdot 10^{-5}$	$3.08 \cdot 10^{-5}$

Tabla 6-3. Comparativa de pendientes para el panel n5

En los resultados para el panel **n5** según el primer enfoque, hay una diferencia importante entre la pendiente de la recta de regresión y la de la recta teórica, con una dispersión en los resultados de las probetas ensayadas a 70 °C similar al caso análogo del panel **n1**. Se puede ver una coincidencia con los resultados teóricos bastante notable en el segundo análisis, mucho mayor que en el primero, tal y como se ha adelantado en el subapartado anterior que ocurriría. Además, la dispersión en este último análisis no es excesivamente grande, lo que conduce a pensar que el modelo teórico se ajusta bastante a la realidad.

6.5.3 Comparación para el panel de configuración $[0_{10}/90_{10}/0_{10}]$ (n10)

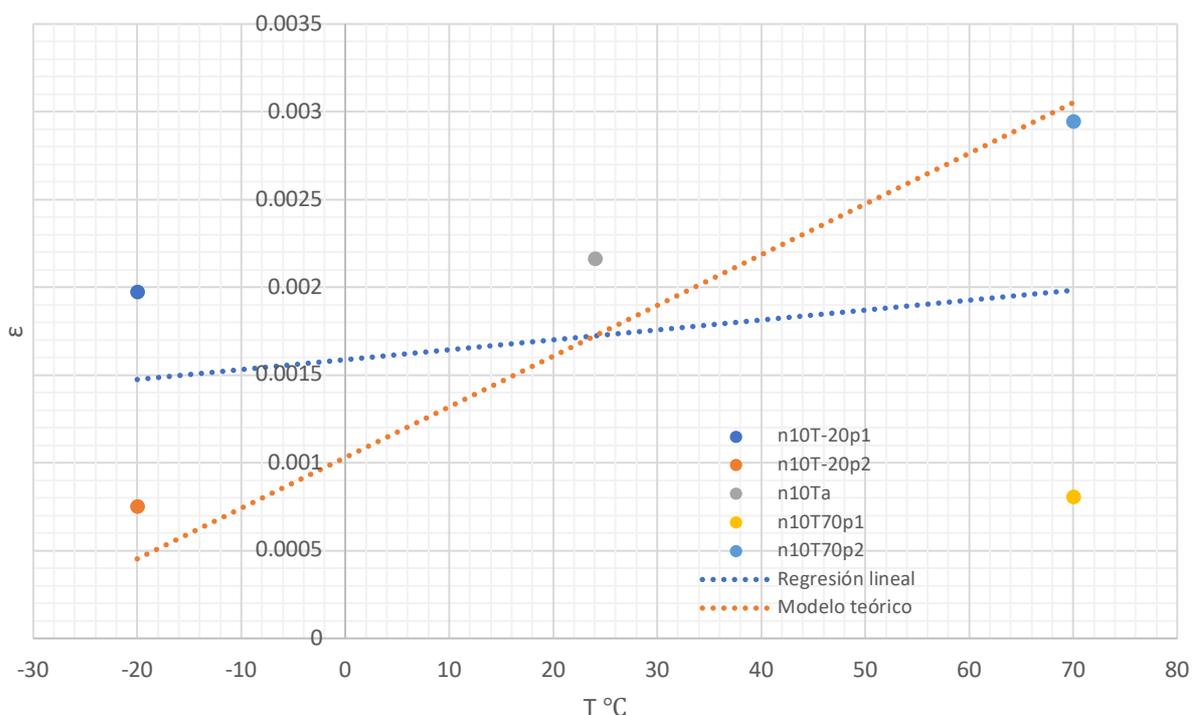


Figura 6-6. Comparativa con análisis de primera grieta detectada para panel n10

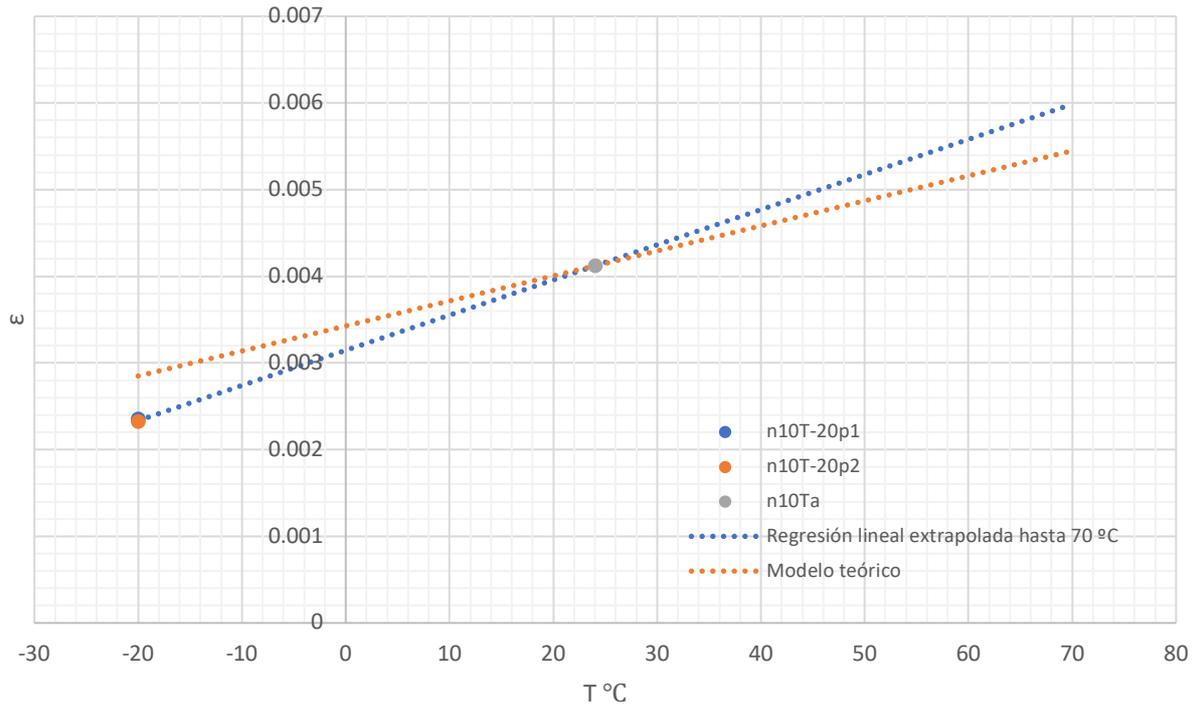


Figura 6-7. Comparativa con análisis según criterio para panel n10

m (teórica) ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	m (experimental, 1ª grieta) ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	m (experimental, criterio) ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
$2.89 \cdot 10^{-5}$	$5.65 \cdot 10^{-6}$	$4.06 \cdot 10^{-5}$

Tabla 6-4. Comparativa de pendientes para el panel n10

Este último panel es el que muestra una mayor discrepancia entre los resultados experimentales y los teóricos, para el primero de los análisis. La enorme dispersión de los resultados invita a pensar que el análisis de la primera grieta detectada no es adecuado para probetas tan gruesas y hace que la recta de regresión pierda toda representatividad teniendo en cuenta, además, la escasa cantidad de probetas ensayadas.

El ajuste entre ensayos y teoría es bastante mayor en el segundo análisis, sin llegar a ser suficientemente exacto. Como ya se ha mencionado con anterioridad, el criterio empleado no pudo llegar a satisfacerse en el caso de las probetas ensayadas a alta temperatura debido a la enorme carga que había de aplicarse en unas probetas tan gruesas para alcanzar la deformación necesaria. De este modo, este resultado lleva a intuir que el modelo teórico podría ser certero pero, en cualquier caso, sería necesario un mayor número de probetas para ensayar y la posibilidad de alcanzar la carga requerida para llegar a cumplir el criterio establecido y así llegar a un resultado concluyente.

7 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Este trabajo tenía como principal objetivo comprobar experimentalmente de qué forma afectan las tensiones residuales de curado en la iniciación de grietas en materiales compuestos fibrosos de carbono/epoxy, concretamente en el caso de la configuración especialmente desfavorable que es la conocida como *cross-ply*, es decir, laminados formados por capas con las fibras orientadas perpendicularmente entre capa y capa. Además, se pretendían cotejar los resultados obtenidos en el laboratorio con los resultados teóricos existentes en la literatura. Se ha conseguido abarcar un rango de temperaturas bastante amplio, que ha permitido observar el importante efecto que tienen las tensiones residuales térmicas que provoca el proceso de curado sobre el desempeño del material. Se ha pretendido ensayar un rango amplio de espesores, manteniendo la relación entre el grosor de las capas de 0° y 90° , para poder observar si los resultados son consistentes en espesores diversos. Así, se ha partido del espesor más delgado posible para esta configuración llegando hasta uno diez veces superior.

Se han realizado dos análisis diferentes de los resultados dependiendo de qué grieta es considerada como primera grieta transversal y, por tanto, cuál determina la deformación que se considera crítica. Ambos análisis han sido tenidos en cuenta y presentados en el presente proyecto porque, aunque el primero de ellos esté sujeto a la aleatoriedad de la presencia de defectos grandes previos a los ensayos, también es cierto que arroja los resultados más independientes de asunciones adicionales.

Se puede observar que, en el primero de los análisis, la dispersión de los resultados tiende a ser mayor generalmente. Además, la consistencia de los resultados al variar los espesores es notablemente menor que en el caso de la aplicación del criterio de primera grieta no aislada.

A la hora de comparar los resultados experimentales con los teóricos, el segundo análisis arroja unos resultados que se ajustan mejor a los teóricos, especialmente en las probetas de espesor intermedio. Esto es así exceptuando el caso de las probetas más delgadas, donde es llamativo lo mucho que se ajusta el resultado experimental del primer análisis al resultado teórico, aunque hay que recalcar que la dispersión que muestran los resultados de las probetas n1T70p1 y n1T70p2, no permiten que se considere concluyente.

Cabe destacar, que han existido dificultades técnicas con el uso del micrófono de contacto empleado para registrar las señales acústicas emitidas durante la aparición de grietas. En los ensayos a temperaturas bajo cero, se ha encontrado la dificultad añadida de que el micrófono también recogía cierto ruido provocado por la entrada de CO_2 encargado de bajar la temperatura en la cámara térmica, complicando de este modo la detección nítida de las grietas a su aparición.

A la vista de los resultados, se puede concluir que las tensiones residuales en este tipo de materiales para la configuración analizada tienen un impacto muy notable en el desempeño de las estructuras en las que se emplee. Sin embargo, la dispersión de los resultados sugiere que para obtener unos más concluyentes es necesaria la fabricación y el ensayo de un número de probetas mucho mayor.

En cuanto a las líneas futuras, los resultados obtenidos este trabajo se acercan razonablemente a los resultados teóricos con los que se han comparado, por lo que sería interesante ahondar en este estudio mediante el ensayo de un número mucho mayor de probetas a temperaturas más variadas. Sería importante contemplar la

posibilidad de emplear un micrófono de contacto de la mejor calidad posible para así poder registrar claramente lo ocurrido durante los ensayos, así como emplear un sistema distinto para los ensayos a baja temperatura, de forma que no interfiera en las grabaciones obtenidas.

REFERENCIAS

- [1] F. París, J. Cañas, J. Marín y A. Barroso, Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos, Sección de Publicaciones. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2016.
- [2] I. G. García, V. Mantič y A. Blázquez, «The effect of residual thermal stresses on transverse cracking in cross-ply laminates: an application of the coupled criterion of the finite fracture mechanics,» *International Journal of Fracture*, vol. 211, nº 1-2, pp. 61-74, 2018.
- [3] M. Hinton, A. Kaddour y P. Soden, Failure Criteria in Fibre Reinforced Polymer Composites: The World-Wide Failure Exercise, Elsevier, 2004.
- [4] *ASTM D 3039/D 3039M. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, American Society for Testing and Materials, 2000.
- [5] I. García, J. Justo, A. Simon y V. Mantič, «Experimental study of the size effect on transverse cracking in cross-ply laminates and comparison with the main theoretical models,» *Mechanics of Materials*, vol. 128, 24-37, 2019.
- [6] Hexcel Corporation, «HexPly® 8552 Epoxy matrix (180°C/356°F curing matrix). Product data sheet,» 2016.
- [7] D. Leguillon, «Strength or toughness? A criterion for crack onset at a notch,» vol. 21, nº 1, pp. 61-72, 2002.
- [8] *UNE-EN 2561:1996. Material aeroespacial. Plásticos reforzados de fibra de carbono. Estratificados unidireccionales. Ensayo de tracción paralelamente a la dirección de la fibra.*, Asociación Española de Normalización y Certificación, 1996.

ANEXO A: GRÁFICAS DE LOS ENSAYOS DE LAS PROBETAS DE LAMINADOS CRUZADOS

A continuación, se adjuntan las gráficas de tensión-deformación resultantes de todos los ensayos realizados a las probetas de laminados cruzados empezando por las probetas más delgadas y terminando por las más gruesas. Para cada espesor, se ordenan de menor a mayor temperatura.

Debido a la presencia de irregularidades en los tramos iniciales de algunos de los ensayos, estos han sido limpiados y sustituidos por una recta que une el punto (0, 0) con el resto de la gráfica, con la misma pendiente. Con idea de alterar lo mínimo posible los resultados obtenidos, esta corrección únicamente se ha efectuado en los casos en los que las irregularidades iniciales del ensayo eran especialmente acusadas.

Los datos y las gráficas han sido tratados en hojas de cálculo de Microsoft Excel, obteniéndose los resultados de los datos resultantes una vez limpiadas las gráficas que lo requerían.

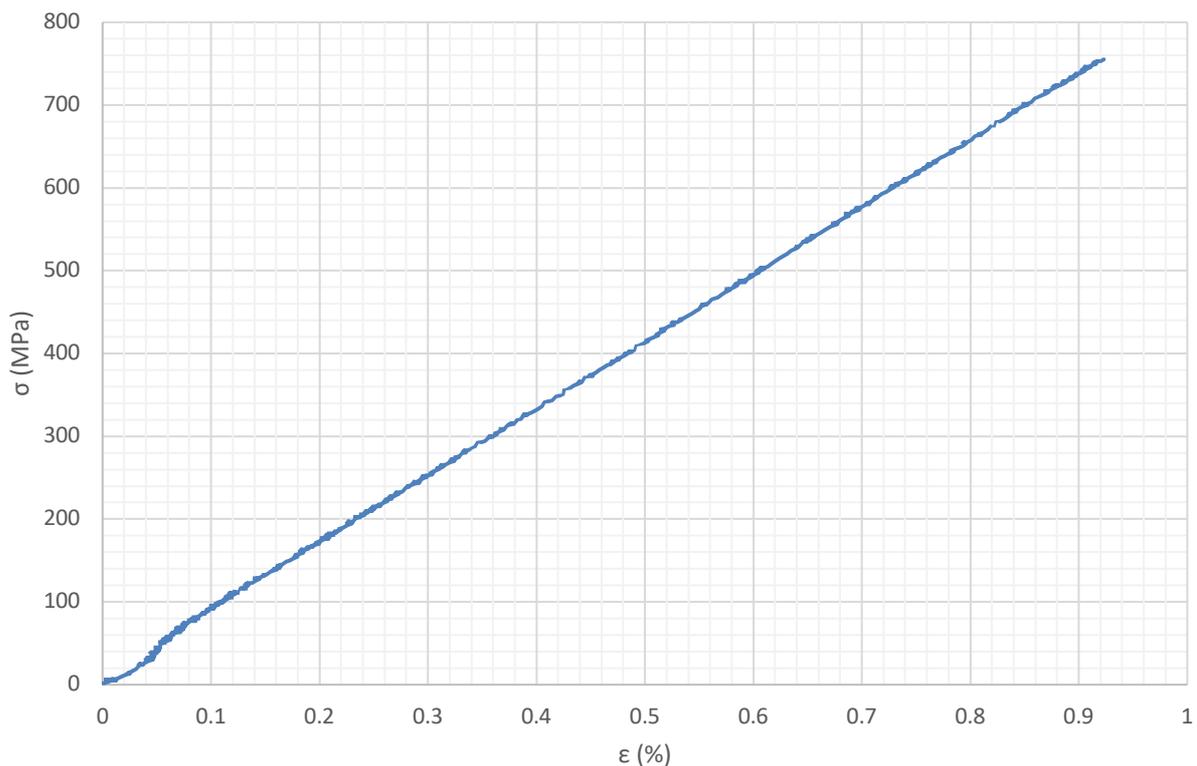
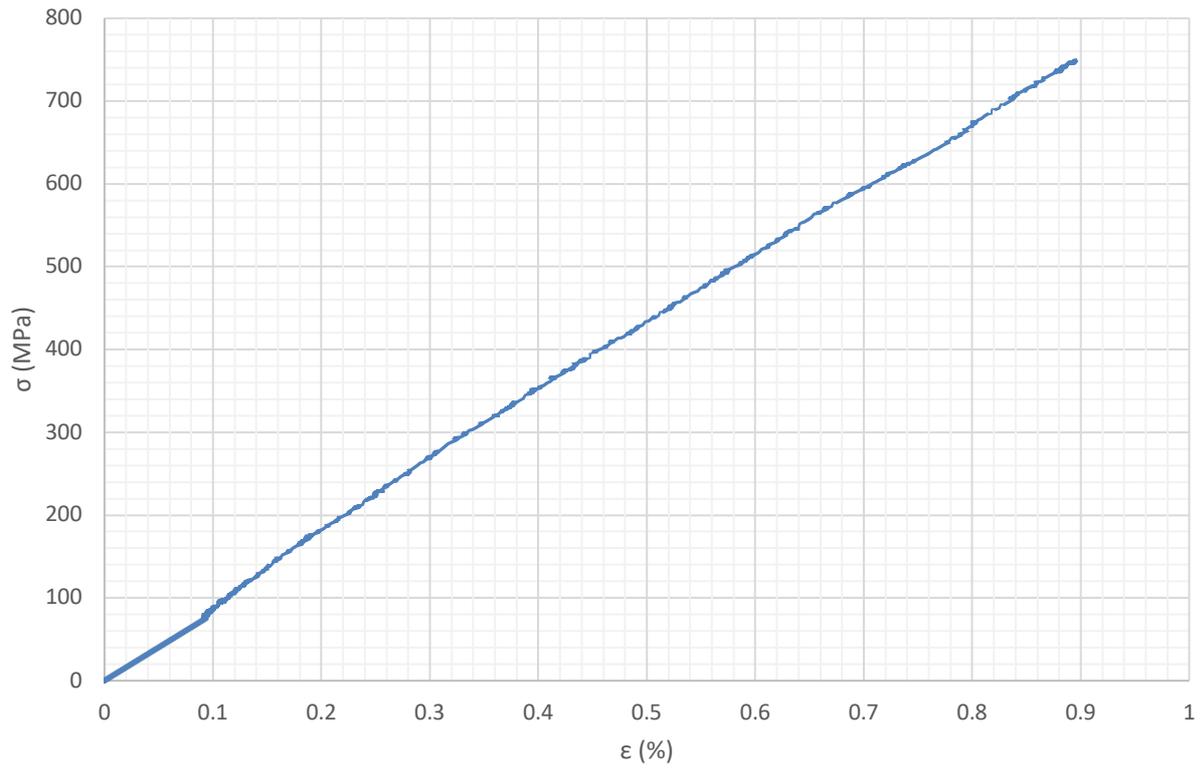
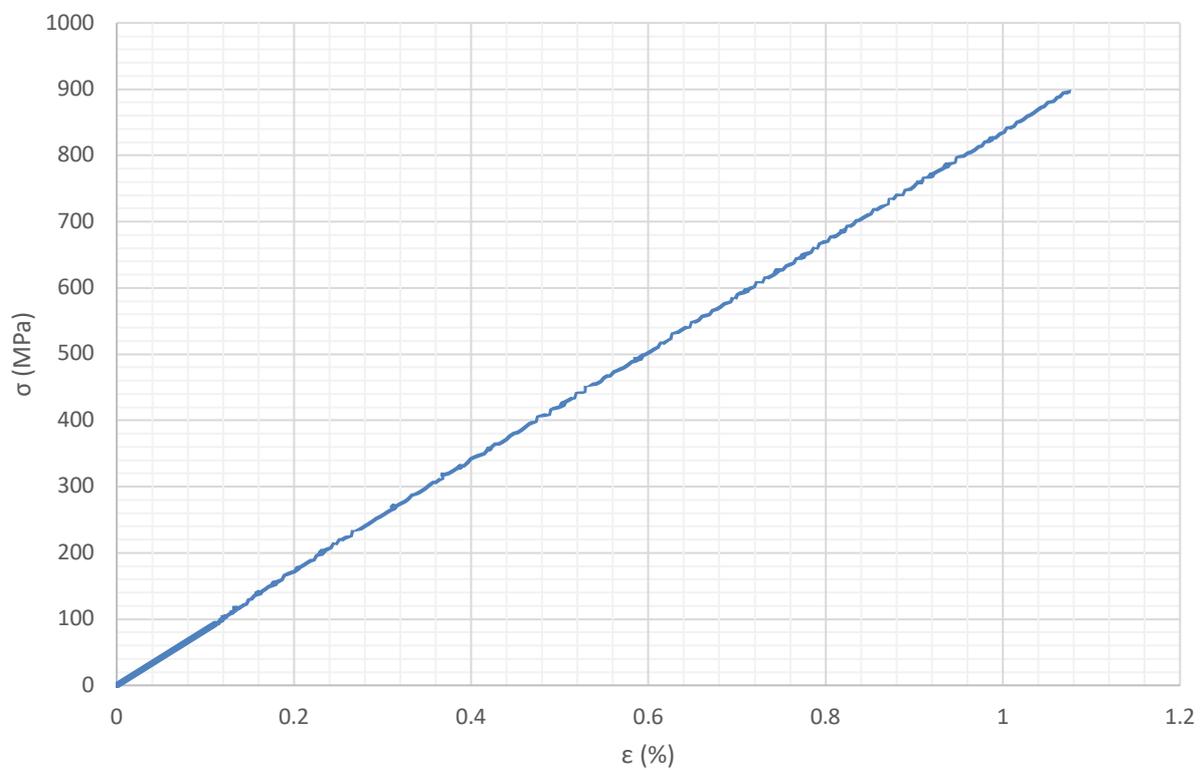


Figura 0-1. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n1T-20p1

Figura 0-2. Curva σ - ϵ correspondente a la probeta n1T-20p2Figura 0-3. Curva σ - ϵ correspondente a la probeta n1Ta

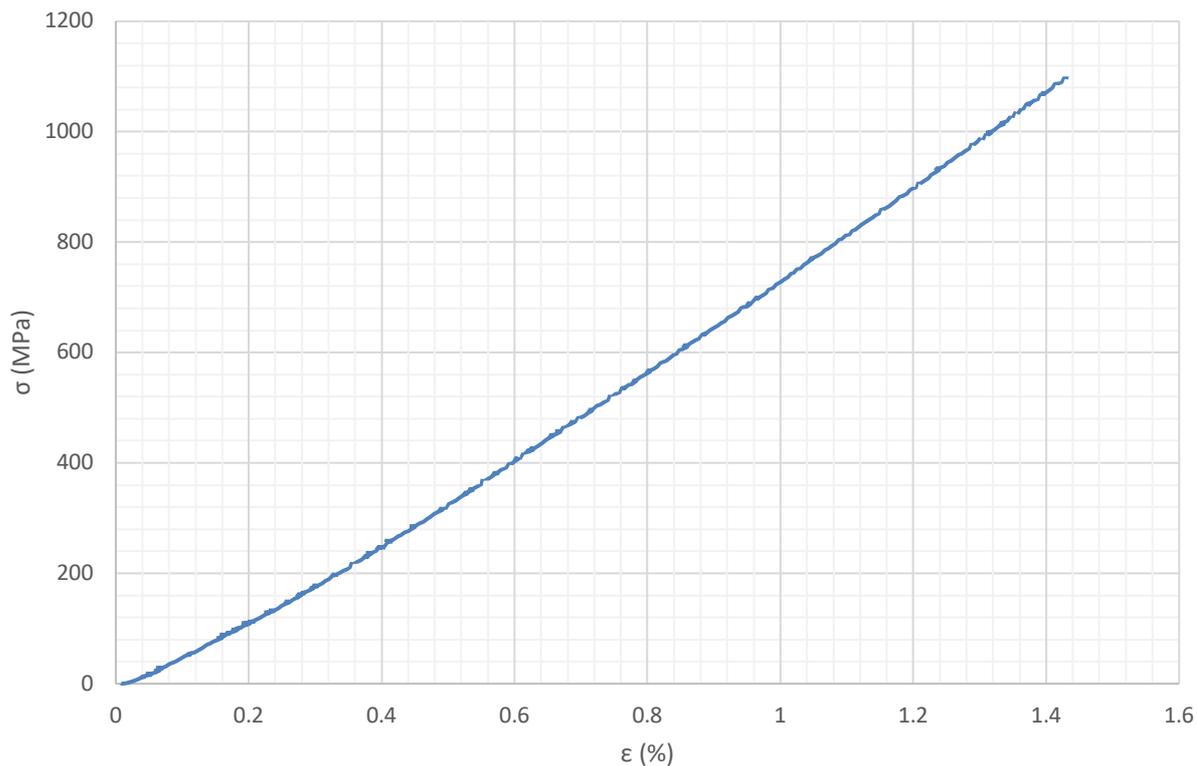


Figura 0-4. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n1T70p1

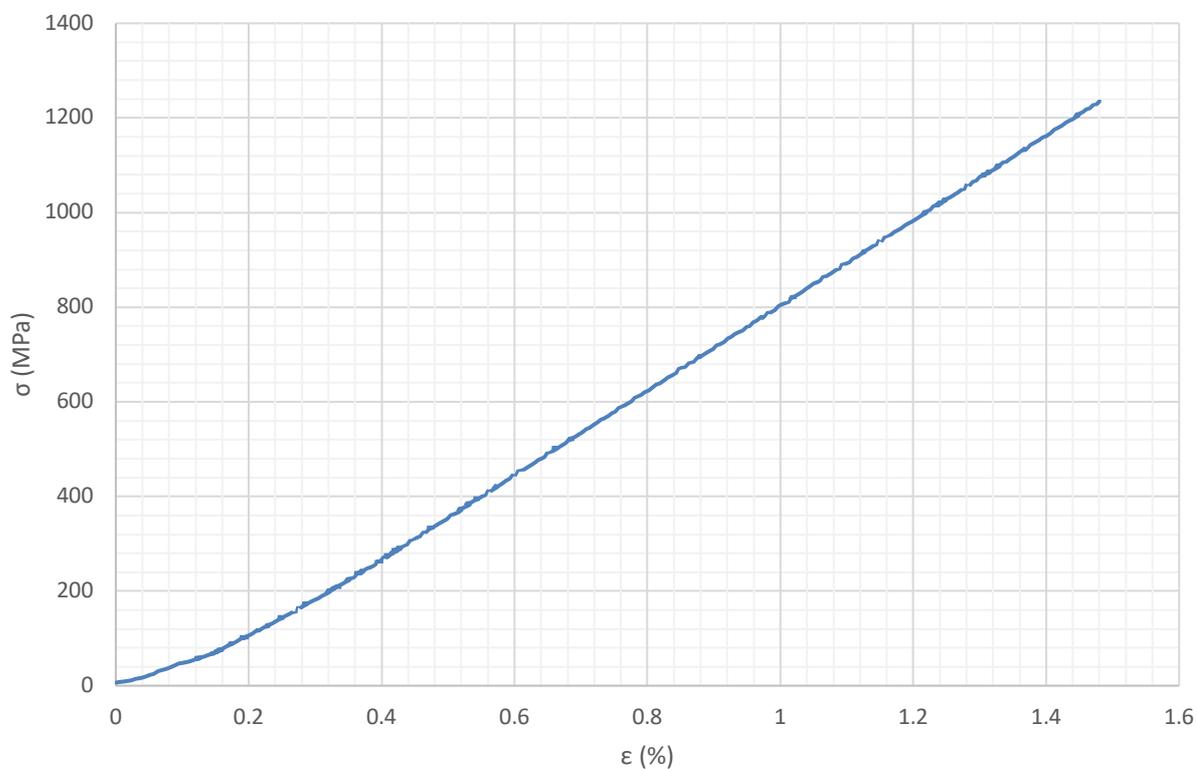


Figura 0-5. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n1T70p2

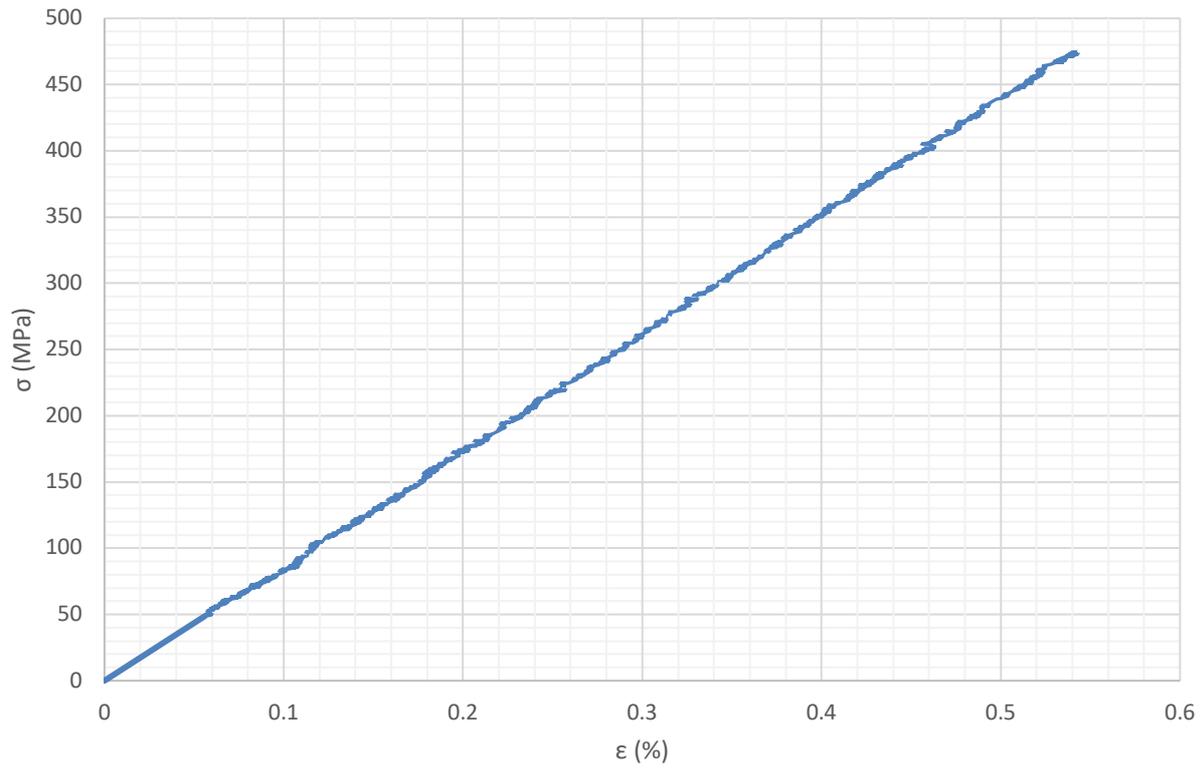


Figura 0-6. Curva σ - ϵ correspondente a la probeta n5T-20p1

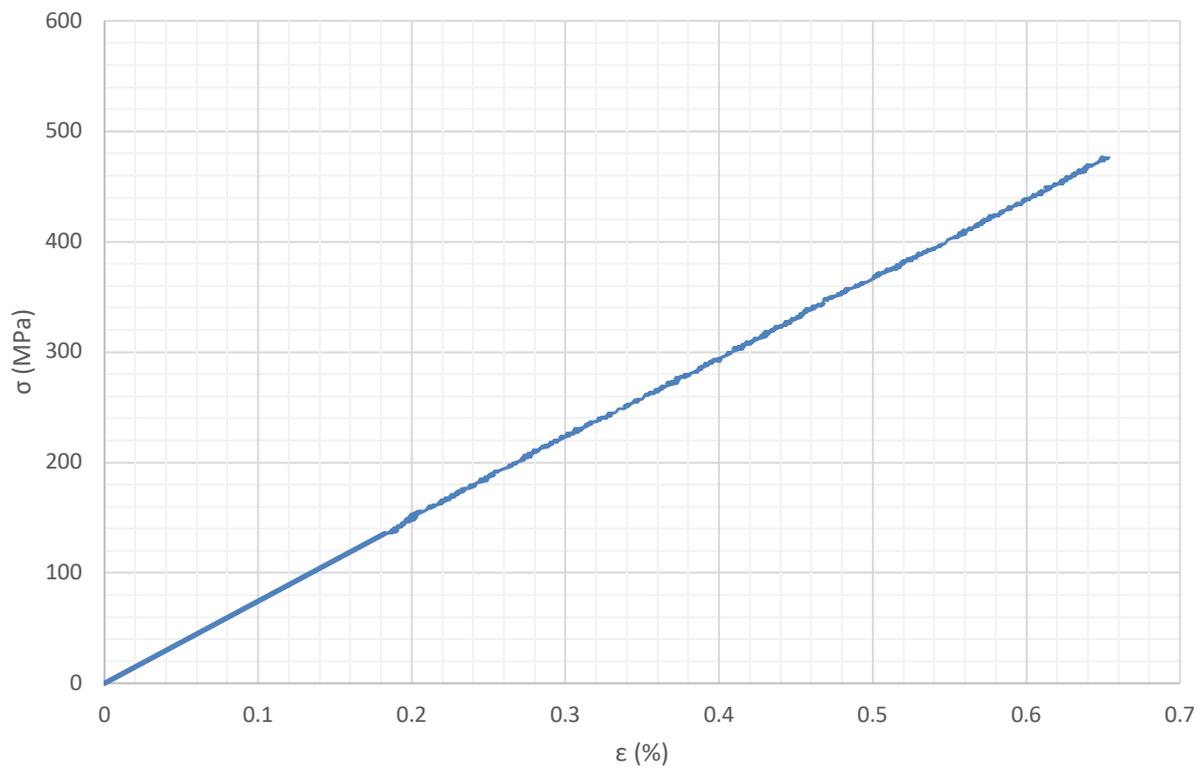


Figura 0-7. Curva σ - ϵ correspondente a la probeta n5T-20p2

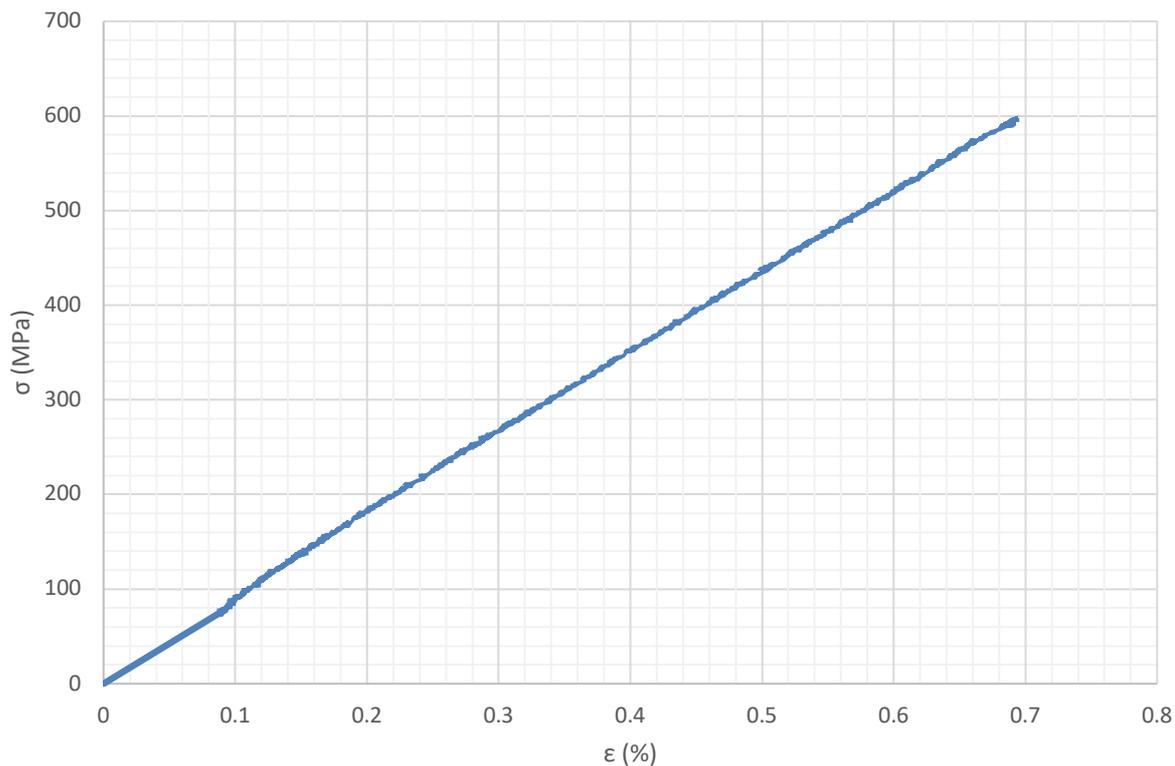


Figura 0-8. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n5Ta

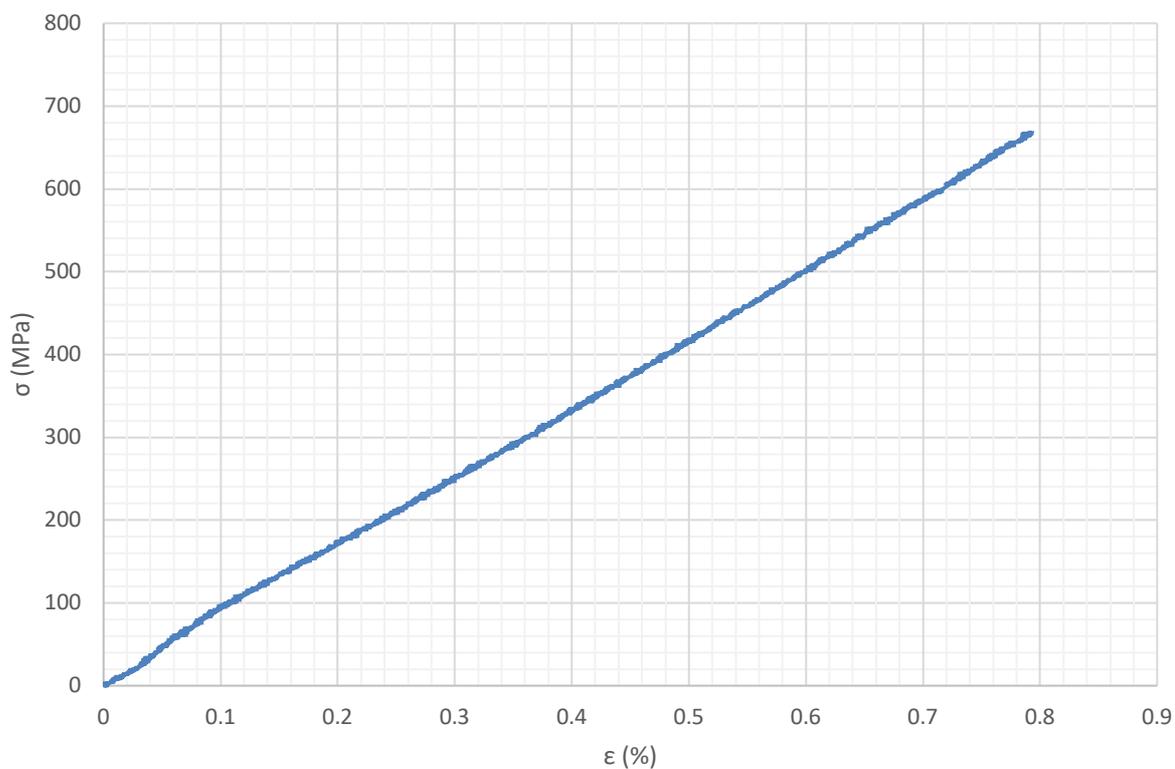
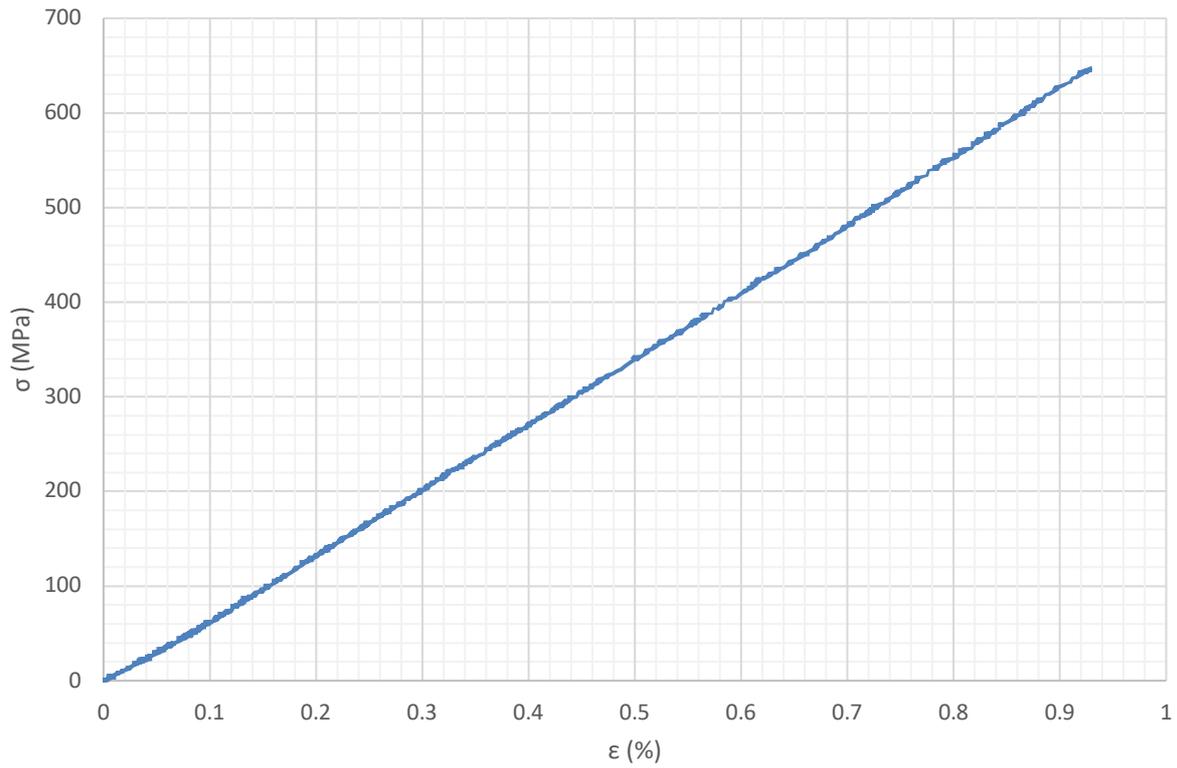
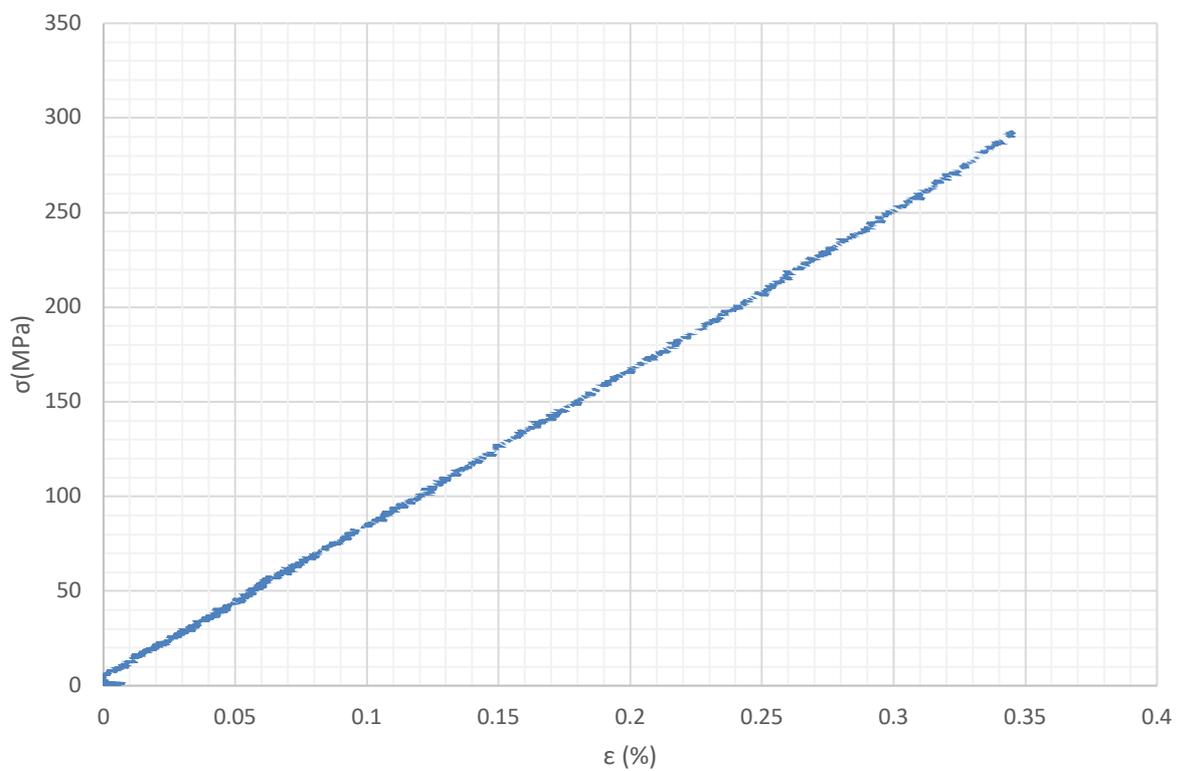


Figura 0-9. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n5T70p1

Figura 0-10. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n5T70p2Figura 0-11. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n10T-20p1

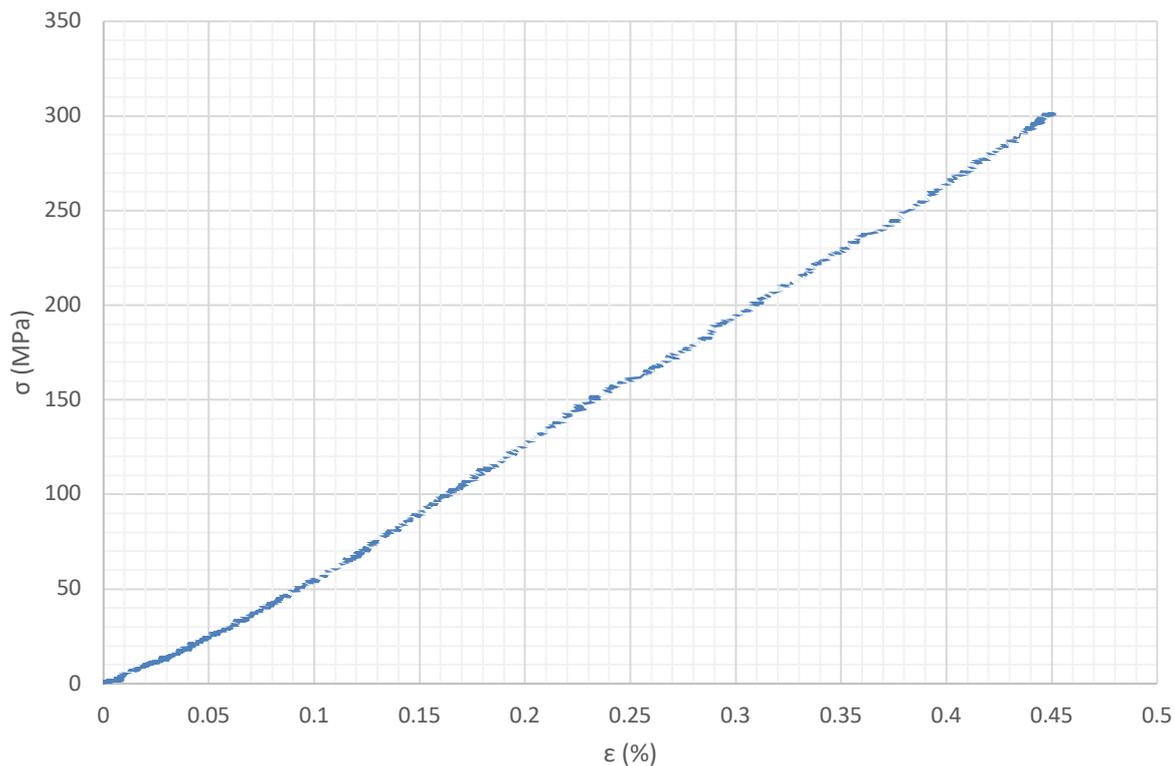


Figura 0-12. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n10T-20p2

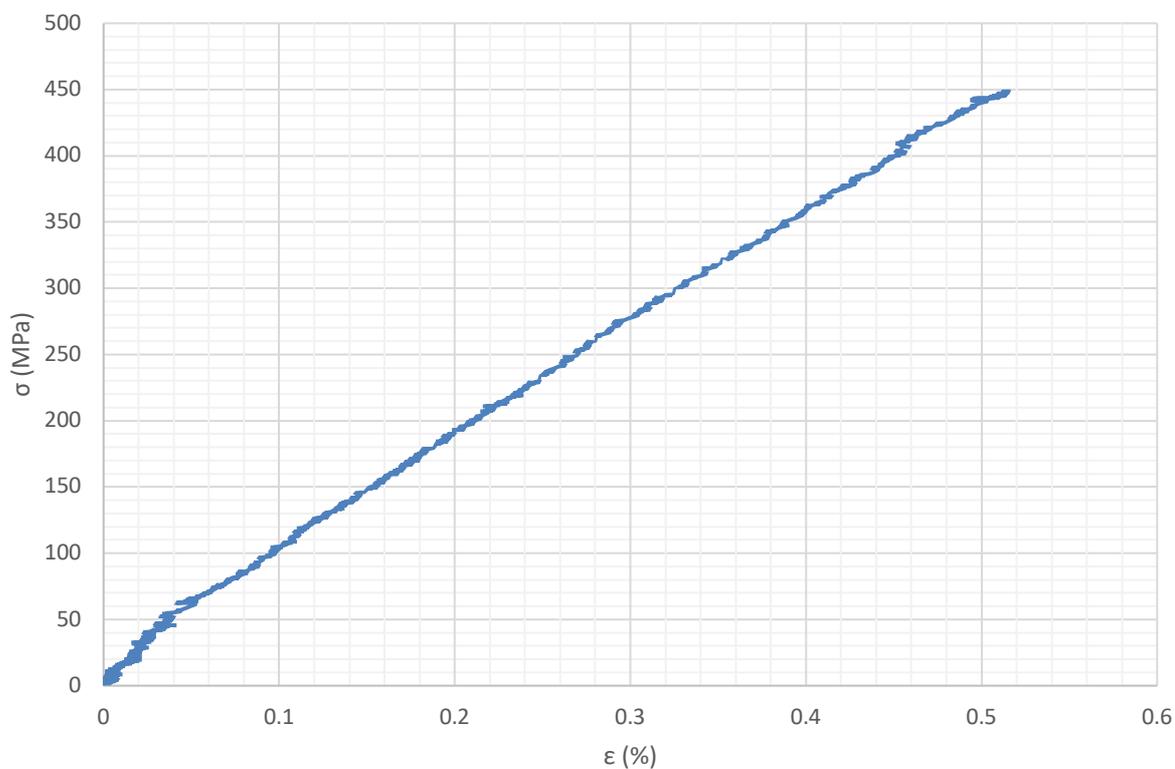
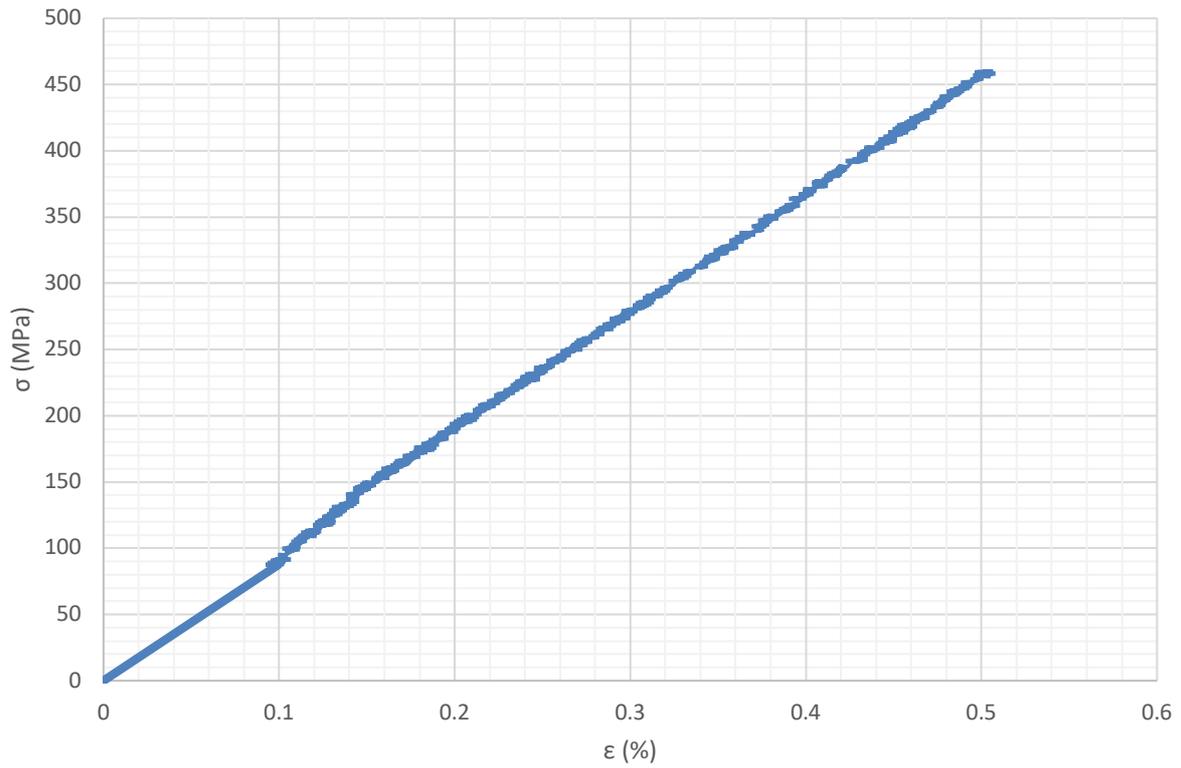
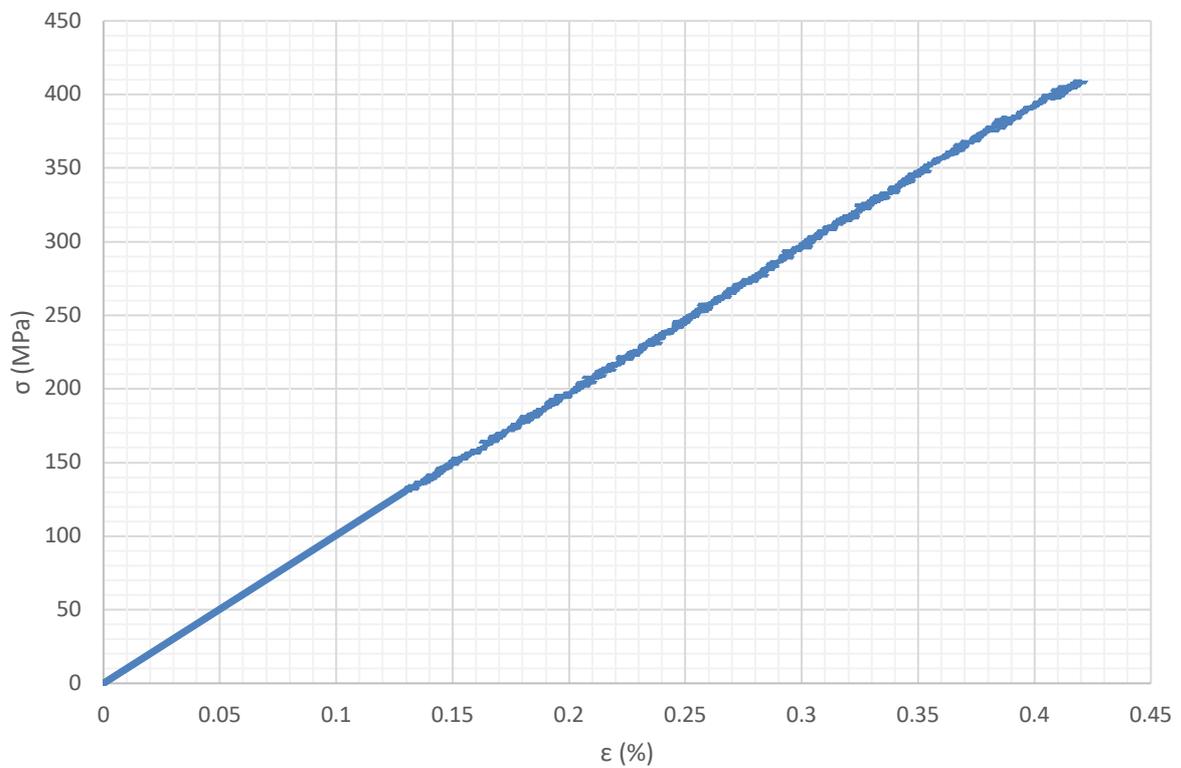


Figura 0-13. Curva σ - ϵ correspondiente a la probeta n10Ta

Figura 0-14. Curva σ - ϵ correspondente a la probeta n10T70p1Figura 0-15. Curva σ - ϵ correspondente a la probeta n10T70p2