



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

EVALUACIÓN DE PROPIEDADES DE FRACTURA EN MODO II EN MEZCLAS DE YESO CON FIBRAS

Alumno: Susana Delgado Jiménez

Tutor: D. Fernando Suárez Guerra
D. Luis A. Felipe Sesé

Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Noviembre, 2020



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

Evaluación de propiedades de fractura en modo II en mezclas de yeso con fibras

D. FERNANDO SUÁREZ GUERRA y D. LUIS A. FELIPE SESÉ, tutores del Trabajo Fin de Grado “EVALUACION DE PROPIEDADES DE FRACTURA EN MODO II EN MEZCLAS DE YESO CON FIBRAS” que presenta la alumna SUSANA DELGADO JIMENEZ, da su visto bueno para la defensa y evaluación del citado trabajo en la Escuela Politécnica Superior de Linares.

Linares, Noviembre de 2020

EL ALUMNO:

LOS TUTORES:

ÍNDICE

1. RESUMEN.....	12
1.1. Abstract	12
2. INTRODUCCIÓN.....	14
2.1. Materiales compuestos.....	14
2.1.1. Clasificación	16
2.1.2. Aplicaciones y limitaciones	16
2.1.3. Particularidades de los compuestos reforzados con fibras.....	18
2.2. Breve introducción a la mecánica de la fractura.....	21
2.2.1. Modos de fractura.....	23
2.2.2. Fractura dúctil y frágil	24
2.3. Fractura en materiales compuestos.....	25
2.4. Neumáticos Fuera de Uso (NFU).....	26
2.4.1. Composición de los NFU	27
2.4.2. Actualidad en el tratamiento de los NFU.....	28
3. ANTECEDENTES.....	30
3.1. Hormigón reforzado con fibras.....	30
3.1.1. Breve historia del hormigón con refuerzos.....	32
3.1.2. Fibras de refuerzo en hormigones	32
3.1.3. Hormigón con fibras NFU	34
3.2. Yeso con fibras.....	35
3.2.1. Yeso con fibras NFU.....	37
3.3. Métodos de ensayo en modo II.....	37
4. OBJETIVOS	41
5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	42
5.1. Equipos	42
5.1.1. Máquina de ensayos INSTRON 5967	42
5.1.2. Amasadora planetaria para morteros.....	43
5.1.3. Báscula de precisión.....	44
5.1.4. Cámara de curado.....	44

5.2.	Materiales	44
5.2.1.	Yeso	44
5.2.2.	Fibras de polipropileno	45
5.2.3.	Fibras textiles NFU	46
5.3.	Diseño del método experimental.....	47
5.3.1.	Diseño de la probeta.....	47
5.3.1.1.	Criterios de diseño.....	48
5.3.1.2.	Fase 1: estimación de la carga máxima de rotura.....	49
5.3.1.3.	Fase 2: diseño y fabricación de la T embebida	51
5.3.1.4.	Criterios de diseño para la probeta	55
5.3.2.	Diseño y fabricación del molde	56
5.3.3.	Fabricación de las probetas.....	57
5.3.4.	Diseño y fabricación del dispositivo de agarre de la probeta.....	61
5.3.4.1.	Criterios de diseño.....	61
5.3.4.2.	Agarre inferior. Etapas durante el diseño.....	62
5.3.4.3.	Agarre inferior. Diseño final	67
5.3.5.	Metodología para el procesado mediante (DIC).....	71
5.3.6.	Preparación de las probetas para el ensayo de pull-out.	74
5.3.7.	Ensayo de pull-out para estudio de factura en modo II	75
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	81
6.1.	Ensayos a fractura en modo II (pull-out)	81
6.1.1.	Análisis de resultados de carga – desplazamiento	81
6.1.2.	Análisis mediante Correlación Digital de Imágenes	84
6.1.2.1.	DIC Probeta de yeso sin fibras	85
6.1.2.2.	DIC Probeta de yeso fibras NFU.....	86
6.1.2.3.	DIC Probeta de yeso fibras polipropileno (PP).....	88
6.1.3.	Análisis del patrón de inicio y propagación de grieta.....	89
6.1.3.1.	Energía de fractura	92
7.	CONCLUSIONES	93
8.	TRABAJO FUTURO	94
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95
	ANEXO I: PLANOS.....	101

*ANEXO II: FICHAS TÉCNICAS DE LAS FIBRAS DE POLIPROPILENO Y LA MÁQUINA
INSTRON 104*

Índice de figuras

Figura 2.1. Configuración estructural básica de un material compuesto [2].	15
Figura 2.2. Ejemplos de materiales compuestos en la naturaleza. A la izquierda madera (lignina + fibras de celulosa). A la derecha hueso (colágeno + apatita) [3].	15
Figura 2.3. Efecto de la orientación de las fibras en la resistencia a la tracción de compuestos epóxicos reforzados con fibras de vidrio [1].	19
Figura 2.4. Fibras de acero comerciales usadas como refuerzo en hormigones [8].	19
Figura 2.5. Lámina de fibras de carbono [9].	20
Figura 2.6. Manojos de fibras de vidrio [10].	20
Figura 2.7. Fibras de polipropileno monofilamento [12].	21
Figura 2.8. Fibras de polietileno [13].	21
Figura 2.9. Curva de propagación de grieta en un material dúctil [18].	23
Figura 2.10. Modos de carga o sollicitación; modo I, modo II y modo III [20].	24
Figura 2.11. Comportamiento mecánico del a) aluminio (dúctil) y b) magnesio (frágil) tras someter a las probetas a un ensayo de tracción [24].	25
Figura 2.12. Ejemplos de mecanismos de fractura en materiales compuestos [22].	26
Figura 2.13. Incendio en el vertedero de neumáticos de Seseña en 2016 (Toledo).	27
Figura 2.14. Composición de los neumáticos de la UE [29].	28
Figura 2.15. Usos de los NFU en España en 2012 [28].	29
Figura 3.1. Variación de la resistencia a Flexotracción por influencia de la fibra agregada en un hormigón [12].	33
Figura 3.2. Estructura de fibras cortas y largas en el control de la apertura y propagación de grietas en material frágil [45].	34
Figura 3.3. Fibras de acero procedentes de NFU [8].	35
Figura 3.4. Fibras de caucho procedentes de NFU [8].	35
Figura 3.5. Desplazamiento de la zona de rotura en un yeso con fibras [50].	36
Figura 3.6. Curvas experimentales obtenidas a partir de ensayos de flexión a tres puntos de probetas de yeso adicionadas con microfibras de polipropileno (en color rojo) y macrofibras de poliolefina (en color azul) [51].	37
Figura 3.7. Diferentes configuraciones para estudiar modo II puro de rotura: a) Tipo Z o push-off, b) Tipo JSCE y c) Tipo FIP [39].	38
Figura 3.8. Patrones de grieta en hormigones con diferentes composiciones en ensayos pull-out [55].	40
Figura 5.1. Máquina de ensayos bicolumna modelo INSTRON 5967.	43
Figura 5.2. Amasadora planetaria.	43
Figura 5.3. Báscula de precisión.	44

Figura 5.4. Escayola E35 (A1) [50].	45
Figura 5.5. Fibras de polipropileno.	46
Figura 5.6. Fibras textiles obtenidas del procesado de NFU.	46
Figura 5.7. Propuesta de la geometría para el análisis de Round Robin [55].	48
Figura 5.8. Recomendaciones sobre los parámetros geométricos para ensayo. En amarillo la configuración elegida sobre la que se partirá para idear una configuración del ensayo [55].	49
Figura 5.9. Cantidad, dimensiones y material de las muestras utilizadas en los ensayos [54].	50
Figura 5.10. Características de los materiales usados en los ensayos [54].	50
Figura 5.11. Datos de carga máxima y desplazamientos asociados. En amarillo marcado el dato de para la obtención de la carga máxima de referencia [54].	50
Figura 5.12. Esquema geometría T. A la izquierda la opción de T como una pieza única, a la derecha la opción de T como dos piezas unidas de forma permanente o no permanente (cotas en mm).	52
Figura 5.13. Tabla 15.3 de la Instrucción de Acero estructural [58].	53
Figura 5.14. Tabla 29.2.a de la Instrucción de Acero estructural [58].	53
Figura 5.15. Dimensiones a tener en cuenta para el diseño de la T.	54
Figura 5.16. Aspecto final de la T fabricada en acero al carbono.	55
Figura 5.17. Criterios geométricos iniciales para la fabricación de las probetas (cotas en mm).	56
Figura 5.18. Molde disponible en el laboratorio.	56
Figura 5.19. Medidas de los alojamientos interiores del molde (cotas en mm).	57
Figura 5.20. Imágenes de muestra de una T alojada en la nueva pieza del molde.	57
Figura 5.21. Desmoldante y brocha.	58
Figura 5.22. Detalle de la cinta adhesiva usada para posicionar una T.	59
Figura 5.23. Sellado de ranuras del molde con cinta adhesiva.	59
Figura 5.24. Detalle del molde con una cavidad ocupada por una probeta de yeso con fibras de polipropileno fraguando y la otra cavidad vacía.	60
Figura 5.25. Acoples para útiles superior e inferior de la máquina.	62
Figura 5.26. Ejemplos de las mordazas disponibles y forma de agarre de la T.	62
Figura 5.27. Geometría planteada para los agarres inferiores (cotas en mm).	63
Figura 5.28. Boceto 1. Diseño de agarres en forma de C.	63
Figura 5.29. Útil auxiliar inferior de aluminio para la máquina bicolonna.	64
Figura 5.30. Boceto de la configuración con largueros laterales de refuerzo.	65
Figura 5.31. Detalle de los refuerzos longitudinales de unión.	65
Figura 5.32. Ejemplo de simulación sobre uno de los diseños propuestos.	66

Figura 5.33. Alojamiento pensado para realizar la unión atornillada sobre la pieza disponible en los laboratorios.....	66
Figura 5.34. Perfiles planteados a) perfil UPN y b) perfil UAP	68
Figura 5.35. Tamaño mínimo del perfil a elegir.....	68
Figura 5.36. Imagen de un perfil UPN 240.....	69
Figura 5.37. Detalle de la posición de un rodillo sobre la barra soldada al perfil UPN. Croquis.....	69
Figura 5.38. Medidas facilitadas para realizar la soldadura de las barras cuadradas (cotas en mm).....	70
Figura 5.39. Conjunto de agarres usados en este trabajo.....	71
Figura 5.40. Detalle de las nuevas placas de acero fabricadas para estos ensayos. Se observan los puntos de soldadura de los perfiles cuadrados.	71
Figura 5.41. Patrón de puntos o speckle [65].....	72
Figura 5.42. Enfoque de la cámara perpendicular a la superficie [66].....	73
Figura 5.43. Pintura en spray con base acrílica usada.....	74
Figura 5.44. Patrón speckle aplicado a una probeta.	75
Figura 5.45. Detalle de T semioculta por el yeso.	75
Figura 5.46. Conjunto de la máquina Instron y el sistema DIC.....	76
Figura 5.47. Captura del software de la máquina, donde se aprecia los datos de extensión y carga.....	77
Figura 5.48. Disposición de la probeta para el ensayo de pull-out.	77
Figura 5.49. Detalle de posición de un rodillo de distribución de carga.....	78
Figura 5.50. Panel de control manual de la máquina.	78
Figura 5.51. Imagen de una de las mordazas disponibles haciendo una cogida insuficiente de la T.....	79
Figura 5.52. Gráfica carga-desplazamiento durante el ensayo por fallo de agarre en la mordaza superior.....	79
Figura 5.53. Detalle de rodillo con galgas de ajuste.....	80
Figura 5.54. Propagación de grieta en probeta fracturada.	80
Figura 6.1. Gráfico de barras de los valores de carga máxima.	82
Figura 6.2. Gráfica comparativa Carga-Desplazamiento de las tres probetas.....	83
Figura 6.3. Fibras de refuerzo actuando sobre material fracturado en probeta de yeso con fibras de PP	84
Figura 6.4. Desplazamientos DIC probeta yeso sin fibras a 1,079 mm de desplazamiento desde el punto inicial a) desplazamientos en el eje x; b) desplazamientos en el eje y	85

Figura 6.5. Mapa de deformaciones Eyy_Lagrange para probeta de yeso sin fibras en el punto de desplazamiento a) 0,99898 mm y b) 1,079 mm.	85
Figura 6.6. Mapas de deformaciones Eyy_Lagrange para probeta de yeso sin fibras en a) 50 segundos tras iniciar el ensayo y b) 65 segundos después de iniciar el ensayo (momento del fallo).	86
Figura 6.7. Desplazamientos en y de la probeta yeso con fibras NFU antes y después del colapso de la matriz de yeso a) $d=1.3106$ mm; b) $d=1,3245$ mm.	87
Figura 6.8. Mapa de deformaciones Eyy_Lagrange para probeta de yeso con fibras NFU en el punto de desplazamiento a) $d=1.3106$ mm; b) $d=1,3245$ mm.	87
Figura 6.9. Mapa de deformaciones Eyy_Lagrange para probeta de yeso con fibras NFU en el punto de desplazamiento $d=1,6822$ mm.	88
Figura 6.10. Mapa de deformaciones Eyy_Lagrange para probeta de yeso con fibras PP en el punto de desplazamiento a) $d=1.9206$ mm; b) $d=1,95708$ mm.	88
Figura 6.11. Mapa de tensiones Eyy_Lagrange para probeta de yeso con fibras PP en el punto de desplazamiento $d=3,8321$ mm.	89
Figura 6.12. Patrón de fractura en probeta de yeso sin fibras.	90
Figura 6.13. Patrón de fractura en probeta de yeso con fibras NFU.	90
Figura 6.14. Patrón de fractura en probeta de yeso con fibras PP.	91
Figura 6.15. Medidas aproximadas de la apertura de grieta incontrolada indicadas con la línea roja a) 85 mm y b) 52 mm.	91

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades mecánicas fibras SikaFiber M-12.	45
Tabla 2. Datos ensayo pull-out	81
Tabla 3. Energía de fractura para distintos valores de desplazamiento δ	92

DEDICATORIA

A mi familia, ente incansable en pos de
mi crecimiento y realización.

A mis padres, mi concepto de unidad.

A Blanca, allá donde esté.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer la labor de mis tutores D. Fernando Suarez Guerra y D. Luis A. Felipe Sesé, gracias al conocimiento que ellos me transfirieron, hoy puedo dar por finalizada esta etapa que tantos retos me ha planteado.

Quiero agradecer el apoyo de mis compañeros, profesores, técnicos, investigadores y a esa parte de la comunidad científica que abogan por el altruismo y por la libre difusión de fuentes de conocimiento fiables.

También quisiera agradecer a las entidades RENEAN, S.L y Sika por las fibras de material suministradas para la realización de este trabajo. Especial mención a la empresa Hierros y Ferralla “Arroyo” S.L., su colaboración supuso el empujón definitivo que este proyecto necesitó.

Por último, quiero hacer una mención especial a todas aquellas personas que me han apoyado a lo largo de toda esta etapa. Llegar hasta aquí ha sido más posible gracias a ellas.

1. RESUMEN

En este trabajo se estudia el comportamiento de los materiales cuasi-frágiles con adición de fibras de refuerzo en su matriz bajo unas tensiones que provocan una rotura en modo II. Para ello, ha sido necesario un estudio preliminar sobre la mecánica de la fractura y la nucleación y propagación de fisuras. Este último término se relaciona estrechamente con la energía de fractura.

La técnica de adición de fibras como refuerzo se ha visto impulsada en los últimos años con el uso de los materiales compuestos. Se ha elegido hacer este estudio en materiales compuestos de yeso con dos tipos de fibras poliméricas: microfibras de polipropileno y fibras procedentes de neumáticos fuera de uso (NFU). La elección de estas fibras se corresponde con una cuestión de valor ambiental, puesto que, al ser revalorizadas energéticamente mediante procesos de quema en la industria, están muy lejos de su reciclaje óptimo. Se pretende, a través de los resultados arrojados por este estudio, dar una mejor salida a uno de los residuos menos valorados procedentes del procesado de NFU.

Para realizar este estudio se han preparado varias muestras combinando el yeso con los dos tipos de fibras y otra probeta únicamente de yeso con la que poder comparar los resultados. Posteriormente se han realizado ensayos de pull-out sobre todas las muestras. Además, se ha hecho uso de la técnica óptica de campo completo denominada correlación digital de imágenes (DIC) para obtener datos sobre los desplazamientos y deformaciones unitarias que tuvieron lugar durante la realización las pruebas.

Gracias a este trabajo se sientan las bases para futuros estudios de la rotura en modo II con ensayos de pull-out. Por este motivo, a lo largo de este texto se describirán los procesos usados para la creación del ensayo y la puesta a punto de su metodología experimental, en base a estudios bibliográficos realizados con anterioridad.

1.1. Abstract

This work studies the behaviour of quasi-fragile materials with addition of reinforcement fibres in their matrix under a mode of tension that causes a mode II fracture. For this purpose, a preliminary study on the mechanics of fracture and the nucleation and propagation of cracks has been necessary. The latter term is closely related to fracture energy.

The technique of adding fibres as reinforcement has been boosted in recent years with the use of composite materials. This study has been chosen to be carried out on gypsum composite materials with two types of polymer fibres: polypropylene microfibras and fibres from end-of-life tyres (NFU). The choice of these fibres corresponds to a question of

environmental value, since, as they are energetically revalued by means of burning processes in industry, they are far from being optimally recycled. The results of this study are intended to provide a better outlet for one of the least valued wastes from the processing of NFU.

In order to carry out this study, several samples have been prepared combining gypsum with the two types of fibre and another test tube made only of gypsum with which the results can be compared. Subsequently, pull-out tests were carried out on all the samples. In addition, the full field optical technique known as digital image correlation (DIC) was used to obtain data on the unit displacements and deformations that occurred during the tests.

This work lays the foundation for future breakage studies in mode II with pull-out tests. For this reason, throughout this text we will describe the processes used to create the test and the fine-tuning of its experimental methodology, based on bibliographical studies carried out previously.

2. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia de la ingeniería, se han tenido que tomar decisiones referentes a los materiales, de forma cotidiana, para procesos de manufactura o en el diseño y construcción de equipos o estructuras. Durante el proceso de selección de dichos materiales, se tienen en cuenta propiedades tales como la dureza, la tenacidad o la resistencia a la corrosión, entre otras. Según Donald Askeland, los materiales se clasifican en cinco grandes grupos [1]:

- Metales y aleaciones. En general son materiales con buena resistencia mecánica y elevada conductividad eléctrica y térmica. Son especialmente usados en aplicaciones estructurales o de carga.
- Cerámicos. Con baja conductividad eléctrica y térmica, tienen una elevada dureza. Usados en aplicaciones de carga.
- Polímeros. Formados por grandes estructuras moleculares a partir de moléculas orgánicas, los polímeros son usados en multitud de industrias y para infinidad de objetos y aparatos electrónicos.
- Semiconductores. Usados en aplicaciones electrónicas y de comunicaciones. La conductividad eléctrica puede ser controlada durante su uso en aparatos electrónicos.
- Materiales compuestos. Formados a partir de dos o más materiales sin que entre ellos exista una reacción química.

En este trabajo se analiza el comportamiento de materiales compuestos frente a la fractura. Primeramente, se va a describir el concepto de material compuesto, y la clasificación más habitual, entre otras. Más tarde se expondrá un análisis de la fractura en composites.

2.1. Materiales compuestos

Desde el punto de vista microestructural, un material compuesto o composite puede definirse como un material con dos o más constituyentes distintos. Si se habla de macroestructura, un material compuesto podría explicarse como la combinación de distintos materiales (en composición y forma), de manera que se obtenga un nuevo material con propiedades y características especiales.

Es decir, un material compuesto está integrado por una combinación de dos o más micro o macro constituyentes, que difieren en forma y composición química, y que son insolubles entre sí.

En general, se distingue en los materiales compuestos una fase discontinua, llamada fase de refuerzo y de la que dependen las propiedades mecánicas, y una fase continua o matriz encargada de la resistencia térmica y ambiental del material. Además, se pueden añadir aditivos para mejorar alguna propiedad específica o reducir su coste (Figura 2.1).

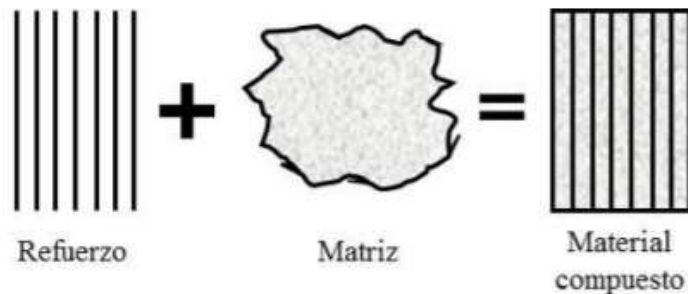


Figura 2.1. Configuración estructural básica de un material compuesto [2].

En gran parte de los materiales compuestos, la fase más dura y resistente es la fase dispersa, donde las partículas de refuerzo acostumbran a restringir el movimiento de la matriz en las cercanías de cada partícula. Es decir, el grado de refuerzo del compuesto va a depender en gran medida de la fuerza de unión entre la matriz y las partículas que forman el compuesto.

Los materiales compuestos pueden encontrarse como tal, en la naturaleza, por ejemplo, en la madera o en la estructura ósea de los animales (figura 2.2).



Figura 2.2. Ejemplos de materiales compuestos en la naturaleza. A la izquierda madera (lignina + fibras de celulosa). A la derecha hueso (colágeno + apatita) [3].

Las propiedades que se pueden mejorar con este tipo de materiales dependen de la mezcla o proporción de las fases que los formen. En general, se pueden mejorar propiedades como: la rigidez, la resistencia mecánica y térmica, disminución de peso, aumento de la dureza o la conductividad, resistencia a la corrosión, etc. Es decir, la apropiada combinación de materiales permitirá mejorar propiedades que esos compuestos por sí solos no podrían tener.

En resumen, las propiedades finales de un material compuesto, van a depender de:

- Las propiedades de las fases que lo conforman.
- La proporción de las fases (concentración)
- La geometría de refuerzo (forma, tamaño, orientación, etc).

2.1.1. Clasificación

Según la matriz:

- Matriz metálica (MMCs)
- Matriz cerámica (CMCs)
- Matriz polimérica (PMCs)

Según la morfología y configuración del refuerzo:

- Compuestos reforzados por dispersión. Contienen partículas de 10 a 250 nm de diámetro. Estas fuentes dispersas bloquean el movimiento de las dislocaciones y producen un notable efecto de endurecimiento. La resistencia de estos materiales disminuye gradualmente al incrementarse la temperatura.
- Compuestos particulados verdaderos. Contienen elevadas cantidades de partículas gruesas, incapaces de bloquear el deslizamiento con eficiencia. Diseñados para generar combinaciones de características poco usuales y no para mejora de la resistencia.
- Compuestos reforzados con fibras. Este tipo de compuesto, ampliamente usado a lo largo de la historia en numerosas aplicaciones, emplea distintos tipos de material de refuerzo. Se usó por ejemplo para reforzar los ladrillos de adobe por medio de fibras de paja, las estructuras de hormigón de los edificios se refuerzan con varillas de acero, fibras de vidrio como refuerzo en aplicaciones aeroespaciales, etc.

2.1.2. Aplicaciones y limitaciones

En general, los materiales compuestos ofrecen una resistencia elevada y mucha rigidez específica. Debido a su "aleatoria" estructura interna, el diseño debe contemplar las peculiaridades de cada material y las posibilidades de los variados procesos de manufactura. Es decir, las propiedades del material son muy sensibles a la calidad del proceso de fabricación.

La ausencia de plasticidad es de los factores más limitantes que nos encontramos a la hora de obtener un material compuesto. Pequeños desajustes en el proceso de fabricación, podrían originar concentración de tensiones en lugares poco deseados y sobre

todo no previsto. En ocasiones, el hecho de reparar estas estructuras, es más costoso que la sustitución del elemento completo.

Las propiedades del material son muy sensibles a la calidad del proceso de fabricación. El conjunto de métodos que se llevan a cabo antes, durante y después de la manufactura para asegurar la calidad, influyen de forma significativa en la calidad, el acabado y, sobre todo, el precio final del material compuesto o producto [4].

Las aplicaciones más conocidas de estos materiales son en la industria aeronáutica, donde su uso se justifica gracias a la necesidad del ahorro de peso en las aeronaves. Por ejemplo, el Airbus 340 utiliza un total de 4 toneladas de materiales compuestos, que representa un 13% del total del peso del avión. En la industria aeroespacial, además, se utilizan materiales compuestos debido a los requerimientos de bajo coeficiente de expansión térmica, elevada rigidez y resistencias específicas y la reducción de peso. La estructura secundaria exterior de la nave X-38 de la NASA designada al retorno de la tripulación de las estaciones espaciales a La Tierra, está fabricada de paneles sándwich con núcleo de espuma fenólica y pieles de fibra de carbono cianatoester preimpregnada.

Otra importante área de aplicación es la industria automotriz, principalmente por su capacidad de brindar más rigidez sin ver comprometida la resistencia. También se usan materiales compuestos en la industria energética, donde características como el peso, la rigidez, la resistencia mecánica o la resistencia a la corrosión son sumamente importantes y se resuelven a través del uso de materiales compuestos. Por ejemplo, las palas de los generadores eólicos están fabricadas con una mezcla de fibra de vidrio o carbono y matriz epoxi.

Aunque menos conocido por su uso cotidiano, los materiales compuestos son usados en la industria de la construcción, ya sea como material estructural, como recubrimientos o materiales usados en decoración. Desde hace décadas, se inició el uso del hormigón reforzado con fibras metálicas como material en construcción en aplicaciones como bóvedas de túneles. A día de hoy también se está normalizando el uso de materiales compuestos con fibras poliméricas o fibra de vidrio aprovechando la mejora de características que aportan al hormigón.

Por todo esto, los materiales compuestos han llegado para quedarse y sus propiedades seguirán siendo usadas, incluso mejoradas, en numerosas aplicaciones industriales, domésticas e incluso médicas como prótesis o mallas de refuerzo en tejidos insertadas durante procesos operatorios [5-6].

2.1.3. Particularidades de los compuestos reforzados con fibras

Es sabido de este tipo de compuestos que las fibras de refuerzo aportan rigidez y resistencia al material y, a su vez, la matriz da unión y resistencia frente al ambiente. Las propiedades de los materiales que se fabriquen, van a depender en gran medida de la disposición de las fibras a lo largo de la matriz.

A continuación, se van a presentar algunos de los parámetros a tener en cuenta en un compuesto reforzado con fibras:

- Longitud y diámetro de las fibras, pudiendo ser cortas, largas o incluso continuas. Como norma general, las fibras se caracterizan por la llamada relación de forma l/d , donde d es el diámetro de las fibras y l su longitud. Las fibras continuas son las que mayor resistencia proporcionan mayor resistencia, son también las más complicadas de alojar en el interior del material, por lo que se prefiere las fibras discontinuas que dan más facilidad a la hora de fabricación.
- Orientación de las fibras. Cada una de las fibras unidireccionales presenta su resistencia máxima cuando la carga es aplicada de forma paralela a las mismas. Por ello, los composites se fabrican con las fibras dispuestas en forma de tejido o capas entrelazadas, mejorando las propiedades en todas las direcciones. En la figura 2.3 se muestra un ejemplo de como la orientación de las fibras afecta a la resistencia a tracción de un material compuesto.
- Orientación volumétrica de las fibras o, dicho de otra manera, el porcentaje de fibras es proporcional a la ganancia de resistencia de un material compuesto.
- Propiedades de las fibras. La resistencia de la fibra influye en gran medida en las propiedades del material compuesto. En la mayor parte de los compuestos reforzados con fibras se busca que sean resistentes, rígidas y de poco peso, aportando al material compuesto una ligereza que de otra forma no tendría.
- Propiedades de la matriz. La matriz debe estar formada por un compuesto que aporte resistencia al conjunto del material compuesto. Son materiales usualmente tenaces y dúctiles, lo que ayuda a transmitir las cargas a las fibras que los forman, evitando así que las grietas causadas por las fibras rotas se propaguen a todo el compuesto.

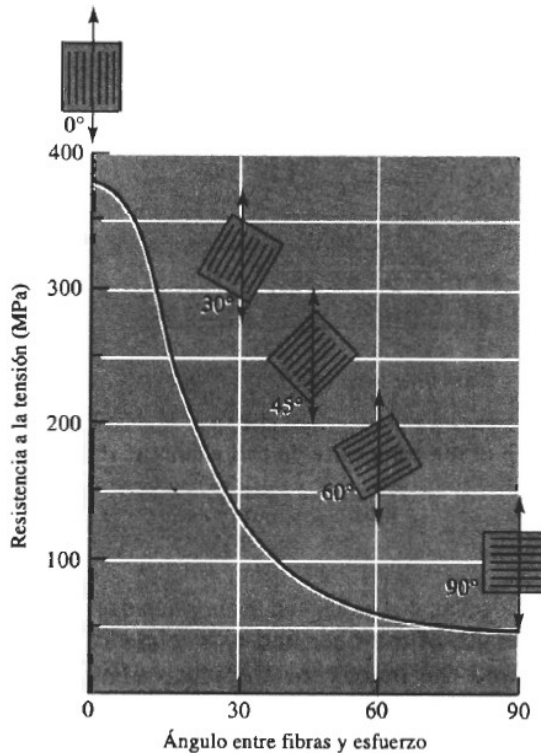


Figura 2.3. Efecto de la orientación de las fibras en la resistencia a la tracción de compuestos epóxicos reforzados con fibras de vidrio [1].

Estas son algunas de las fibras más usadas como adición en materiales compuestos por sus propiedades de refuerzo de la matriz [7]:

- Fibras metálicas. Usadas habitualmente como refuerzo de hormigones, se trata de fibras en forma de alambre de acero con bajo contenido en carbono, tienen una resistencia mecánica a la tracción muy buena y cuando se distribuyen adecuadamente en la mezcla, construyen una matriz-refuerzo muy resistente. Son capaces de conferir a la matriz la capacidad de soportar deformaciones manteniendo una mejor resistencia (ductilidad) y evitar la propagación de fisuras, permitiendo disipar esta energía de avance de fallo. En la figura 2.4 se muestran un tipo de fibras de acero comerciales.

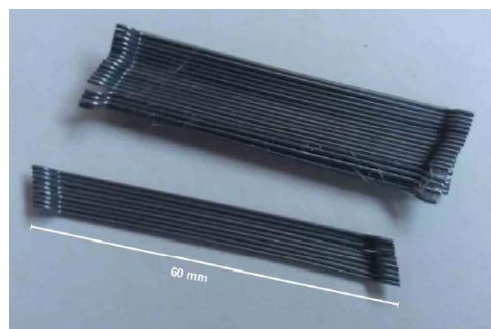


Figura 2.4. Fibras de acero comerciales usadas como refuerzo en hormigones [8].

- Fibra de carbono. Fibras cerámicas con altas propiedades mecánicas específicas.

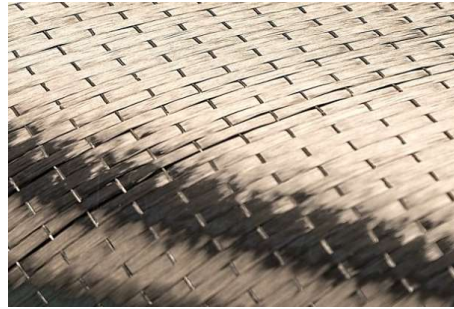


Figura 2.5. Lámina de fibras de carbono [9].

- Fibra de vidrio. De menor capacidad resistiva que la fibra de carbono, pero de características resistentes similares a otras fibras metálicas. Es ampliamente usada debido a su bajo coste en industrias y aplicaciones con baja sollicitación mecánica (ej. Palas de aerogeneradores, estructuras, elementos deportivos, etc).



Figura 2.6. Manojos de fibras de vidrio [10].

- Fibra de polipropileno (PP). Se trata de un termoplástico obtenido de forma artificial como subproducto de la refinación del petróleo. Su uso se concentra en productos plásticos, envases o como aditivo en materiales compuestos para la construcción. Entre sus principales características destaca la resistencia, fácil procesado y anti-humedad. La fibra de polipropileno es una fibra ligera. Suele fabricarse en forma de multifilamentos que actúan como refuerzo en todas las direcciones de la matriz debido a su buena capacidad de distribución uniforme [11]. En la figura 2.6 se muestra una de las versiones comerciales de esta fibra.



Figura 2.7. Fibras de polipropileno monofilamento [12].

- Fibra de polietileno (PE). Un polímero de estructura simple y unas de las fibras sintéticas que mayor producción mundial tiene debido a su bajo coste de producción. Además, también se encuentra comercialmente en forma de grano, planchas o polvo, entre otras.



Figura 2.8. Fibras de polietileno [13].

Muchas de estas fibras son consideradas estructurales cuando aportan una energía extra a la matriz de rotura en masa. También existe las fibras no estructurales, que son aquellas que sin poseer energía suficiente para evitar un fallo en la matriz suponen una mejora sobre propiedades el control de la fisuración, la resistencia al impacto y abrasión o una mejora de sus capacidades de resistencia al fuego.

2.2. Breve introducción a la mecánica de la fractura

La Mecánica de la Fractura empezó a desarrollarse durante la Primera Guerra Mundial de la mano del ingeniero aeronáutico Alan Arnold Griffith para explicar el fallo de materiales frágiles. Griffith sugirió que la baja resistencia a la fractura observada en los experimentos que realizó durante los años 20, al igual que la dependiente del tamaño, era debida a la presencia de pequeñas roturas microscópicas en la masa del material [14].

La teoría inicial en la que se basa la Mecánica de la Fractura, fue enunciada por la siguiente frase: “Se puede formar una grieta (o una grieta existente puede crecer) solamente si el proceso origina una disminución de la energía total o esta permanece constante.”

Uno de los requerimientos principales de cualquier estructura o mecanismo es que debe aguantar las cargas a las que esté sometido, no siendo admisible, en ningún caso, que se produzca una falla o colapso durante el servicio en su vida útil. De aquí nace la necesidad de un estudio y reconocimiento de los distintos modos de fractura de un material, a tener en cuenta en la fase de diseño de cualquier proyecto [15].

Un material se define a través de ensayos que caracterizan las propiedades del mismo. En particular, la resistencia de un material se define a través de ensayos de tracción o de compresión, obteniendo como resultado la tensión máxima que soporta el material antes de la rotura.

En general, hay grietas en todas las estructuras como resultado de su proceso de fabricación o por las cargas a las que está sometido. Bajo un uso continuado, debido a las cargas cíclicas, estas discontinuidades microscópicas pueden provocar la aparición de grietas o propagación de las ya existentes. Estos procesos de inicio y propagación de grieta son de gran interés para la comunidad científica.

La mecánica de la fractura elástico lineal, es la ciencia que estudia estos sucesos de grietas en sólidos, así como la distribución de deformaciones y tensiones que tienen lugar en un sólido con grietas o discontinuidades y que, además, está sometido a cargas o licitaciones externas.

La fractura, por su parte, puede ser definida como la separación de un material por la acción de una carga, en dos o más partes. Un aspecto fundamental de la mecánica de la fractura, es poder determinar si una grieta existente en un material permanecerá estable o se prolongará bajo ciertas condiciones de tensión. En términos más simples, la formulación energética de la LEMF compara la energía disponible para la propagación de una grieta con la energía necesaria para producir su propagación [16].

Según Morales et al. en su artículo sobre modelos de crecimiento de grietas por fatiga [17], durante el proceso de crecimiento y propagación de grieta, se distinguen tres etapas diferenciadas (en materiales dúctiles):

- Nucleación e inicio de la grieta en la zona donde la concentración de esfuerzos provoca deformaciones plásticas cíclicas. En los casos en los que el material contenga imperfecciones previas, esta etapa podría no aparecer.
- Crecimiento de la grieta en la zona en la que se originó.

- Propagación de la grieta fuera de la zona de plastificación, hasta producir el fallo final. En la figura 2.9 grafica el incremento de longitud de grieta vs el intervalo de valor de la intensidad de esfuerzos a los que podría estar sometido un material.

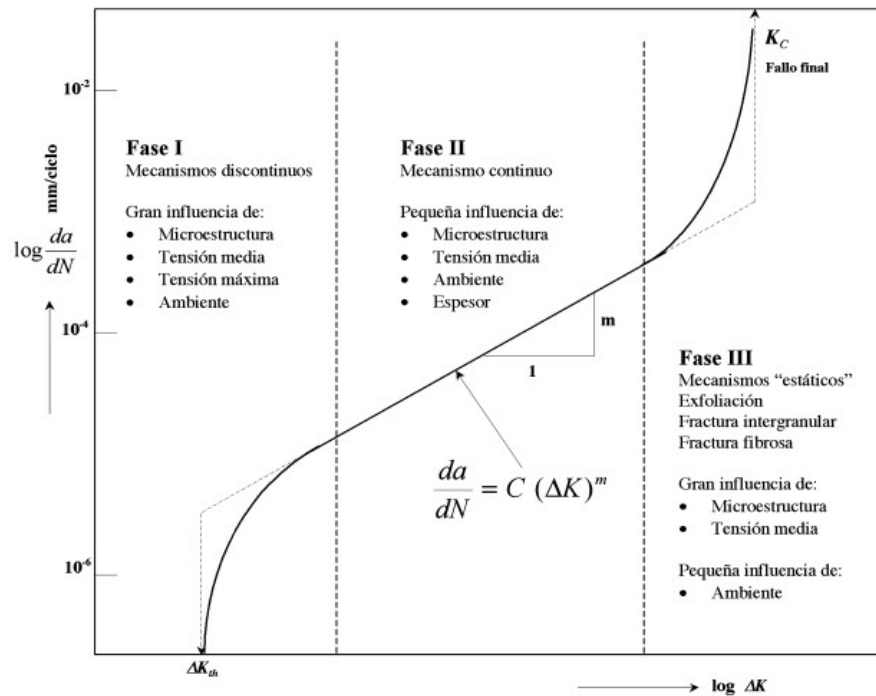


Figura 2.9. Curva de propagación de grieta en un material dúctil [18].

2.2.1. Modos de fractura

De acuerdo con David Broek [19], la fractura se puede dividir en tres modos fundamentales de fallo (figura 2.10):

- Modo I o modo de apertura. En este modo la propagación de la grieta se produce por la aplicación de tensiones normales al plano de fractura.
- Modo II o modo deslizante. Debido a tensiones cortantes localizadas en el plano de fractura, se producen desplazamientos longitudinales de las superficies de dicho plano en la misma dirección que el crecimiento de grieta, dando lugar al fallo.
- Modo III o modo de rotura transversal. Cuando la tensión aplicada desplaza los labios de la grieta en dirección paralela al frente de la misma.

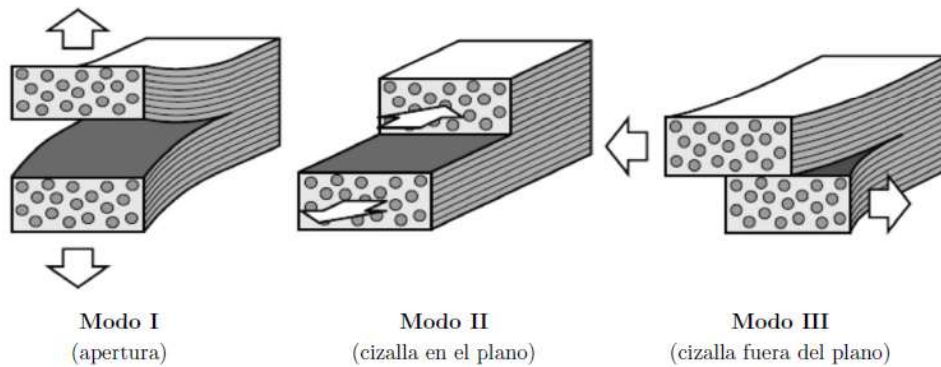


Figura 2.10. Modos de carga o sollicitación; modo I, modo II y modo III [20].

2.2.2. Fractura dúctil y frágil

Se dice que un material es frágil, si no se puede realizar una deformación visible sin provocar su rotura. Esto no quiere decir que el material sea poco resistente, al contrario, puede aguantar una elevada tensión antes de fallar. Este tipo de rotura se produce a velocidades elevadas, del orden de 2000 m/s y se caracteriza por tener una hendidura plana con labios mínimos en la zona de deformación plástica.

Una fractura dúctil está asociada con una deformación plástica durante la fase de propagación de grieta, al contrario que las frágiles, en las que no se aprecia ninguna deformación plástica anterior a la rotura [21]. Desde el punto de vista de la ingeniería, la cantidad de deformación plástica que se requiere en algunos casos para producir la falla es mínima, es decir, la fractura puede iniciarse en una grieta o entalla (previamente creada), por lo que podría considerarse una fractura frágil, donde se da un estado de deformación plana que reduce las posibilidades de deformación plástica [22]. En general, una rotura frágil no es deseable, puesto que puede dar lugar a situaciones de riesgo al no dar indicios de que se vaya a producir, llevando al colapso repentino de estructuras, lo que conlleva grandes pérdidas económicas e incluso personales.

Se conoce un término que podría dar un valor al proceso de fractura y es el conocido como energía de fractura o a tasa de liberación de energía, proveniente del estudio de la carga vs. desplazamiento inicialmente introducido por Griffith, uno de los padres de la LEMF y comentada más adelante por otras investigaciones más actuales [23]. Este valor relaciona la capacidad de un material para absorber energía a través de una grieta, el cual es mayor en materiales dúctiles.

El ensayo más popular donde se puede apreciar el comportamiento de un material ante la fractura, es el ensayo de tracción. En la figura 2.11 puede observarse un material con fractura dúctil y frágil.



Figura 2.11. Comportamiento mecánico del a) aluminio (dúctil) y b) magnesio (frágil) tras someter a las probetas a un ensayo de tracción [24].

2.3. Fractura en materiales compuestos

Debido a la elevada resistencia y rigidez de los composites, se ha visto un aumento de la demanda de este tipo de materiales en los últimos años. Por su bajo peso específico, estos materiales están siendo cada vez más usados en el ámbito de la construcción. Esto hace necesario un estudio personalizado de las limitaciones frente a los materiales usados de manera convencional.

Como se ha mencionado con anterioridad, durante los procesos de fabricación, se pueden producir en los materiales numerosas microgrietas distribuidas a lo largo de todo el su volumen. En los materiales compuestos, la fractura se propagará más bien por estas microgrietas, que por una simple grieta macroscópica. Existen circunstancias en las que el estudio de la mecánica de la fractura puede, de algún modo, tratar de razonar el comportamiento frente a la fractura de los materiales compuestos, si bien es cierto que las ecuaciones de la mecánica de la fractura clásica pueden aplicarse a muy pocas situaciones.

Durante el proceso de fractura, las cargas aplicadas a un material compuesto pueden producir un agrietamiento de la matriz donde también se puede generar un desgarro en las fibras que contiene, que actuarán como puente uniendo los bordes de grieta de la matriz, se despegarán de la matriz o acabarán rotas. En la figura 2.12, se muestran algunos tipos de fallo en materiales compuestos.

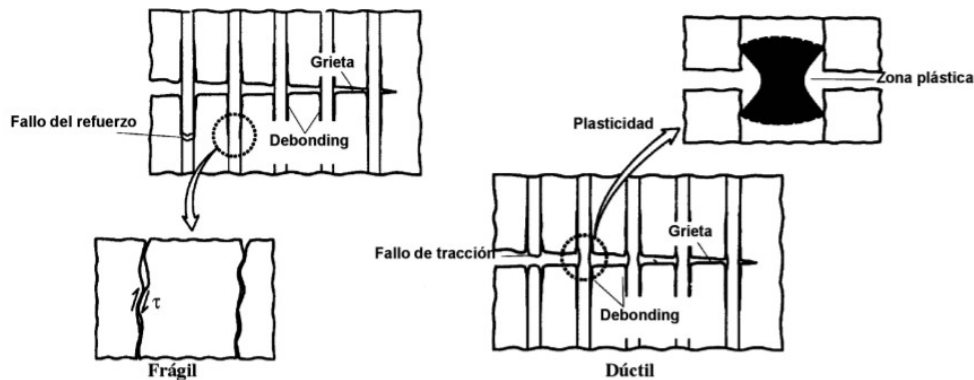


Figura 2.12. Ejemplos de mecanismos de fractura en materiales compuestos [22].

En general, las matrices frágiles mejoran notablemente su tenacidad gracias a la adición de material de refuerzo, al contrario que las matrices dúctiles, que pierden tenacidad por el efecto de desprendimiento o *debonding* que se produce entre la matriz y las fibras como mecanismos de propagación y crecimiento de grieta [22].

A pesar de que la LEFM fue desarrollada para el análisis de procesos de fractura en materiales frágiles o cuasifrágiles de alta resistencia, como el acero, el hormigón o aleaciones del ámbito industrial, los trabajos y hallazgos encontrados hasta la fecha no deben despreciarse para analizar comportamientos semejantes en otros materiales menos rígidos o resistentes, como son los materiales compuestos.

2.4. Neumáticos Fuera de Uso (NFU)

Los neumáticos fuera de uso son aquellos que han llegado al final de su vida útil, bien por un desgaste de su superficie de caucho, porque internamente hayan perdido las propiedades que los hacían funcionales y seguros, o bien porque sus propietarios han decidido cambiarlos. En España, se producen al año alrededor de 200.000 toneladas de NFU [25].

Lo NFU están considerados residuos no peligrosos per sé, pero su gestión inapropiada o su sobreproducción provoca problemas ambientales o dificultades al eliminarlos. Según el Real Decreto 1619/2005 de vertido de residuos y gestión de neumáticos fuera de uso, está prohibido su depósito en vertederos, debido al gran volumen que ocupan o por ser combustibles de difícil extinción en caso de arder accidentalmente [26]. Este RD responsabiliza de la gestión de estos recursos a los responsables de la puesta en mercado de neumáticos nuevos (fabricantes, importadores o adquirientes en otro Estado de la UE).

Una de las más sonadas crisis medioambientales relacionadas con una mala gestión del reciclado de los NFU fue el incendio del vertedero de Seseña (Toledo) en 2016 (figura 2.13). Una crisis que ha día de hoy sirvió para concienciar a la población y administración

del peligro de estos residuos no tratados, que generó una nube contaminante de humo, cenizas, negro de carbón y aceite de pirolisis que amenazó durante más de un día a las zonas cercanas al vertedero [27]. Sin embargo, la Junta de Castilla-La Mancha decidió excluir el trámite de Evaluación de impacto ambiental, pese a las recomendaciones de distintas asociaciones por el medio ambiente.



Figura 2.13. Incendio en el vertedero de neumáticos de Seseña en 2016 (Toledo).

No existe una normativa clara en el marco europeo que regule la gestión de este tipo de residuos, aunque sí hay directivas estatales que regulan el tratamiento de los NFU. En resumen, se requiere para ellos un almacenamiento adecuado que permita la prevención de riesgos de incendio y que incluya acciones para fomentar el reciclado de los mismos.

Actualmente, la industria que más beneficios obtiene de la incineración de los NFU es la cementera, donde se utiliza los NFU como combustible para abaratar los costes productivos, generando el problema de la liberación de sustancias nocivas durante su incineración. Se calcula que, en España, aproximadamente un 35% del total de NFU gestionados son revalorizados energéticamente como combustible en las industrias [28].

2.4.1. Composición de los NFU

Los NFU se componen principalmente de caucho sintético o natural, acero, material textil, negro de carbono y otros aditivos. A continuación, se presenta una tabla de composición general de los neumáticos más habituales (figura 2.14).

<i>Material</i>	<i>Turismo %</i>	<i>Camión/autobús %</i>
Caucho/Elastómero	48	43
Negro de carbono	22	21
Metal	15	27
Textil	5	-
Oxido de Zinc	1	2
Azufre	1	1
Aditivos	8	6

Figura 2.14. Composición de los neumáticos de la UE [29].

De todas las partes de las que se componen los NFU, las que más interesan para su reciclaje son:

- Caucho sintético y natural. Es el principal componente del neumático y su función es estructural. Los neumáticos están formados por la mezcla de cauchos naturales (NR) y cauchos sintéticos (SBR).
- Fibras de acero. Aportan rigidez y estabilidad al neumático, además de mejorar la pisada.
- Fibras textiles sintéticas. Junto a las fibras de acero, conforman y dan resistencia al neumático. Suelen ser de nylon, poliéster o rayón y se introducen en el neumático en forma de hilos.

2.4.2. Actualidad en el tratamiento de los NFU

Son muchas las entidades que están desarrollando líneas de investigación relacionadas con el reciclado, en parte o en su totalidad, de los NFU [30]. A continuación, se presentan algunos ejemplos de estos trabajos.

En el territorio español se crea la organización SIGNUS, una entidad sin ánimo de lucro creada en mayo de 2005 como iniciativa de los principales fabricantes de neumáticos. Tiene como finalidad su utilización como mecanismo para cumplir con el RD 1619/2005 por las distintas entidades productoras de neumáticos.

Responde a la necesidad social de vivir y preservar un entorno sostenible y garantiza el correcto tratamiento de los NFU durante toda su vida como producto. Las estrategias para la revalorización de los NFU se representan en el siguiente gráfico (figura 2.15).

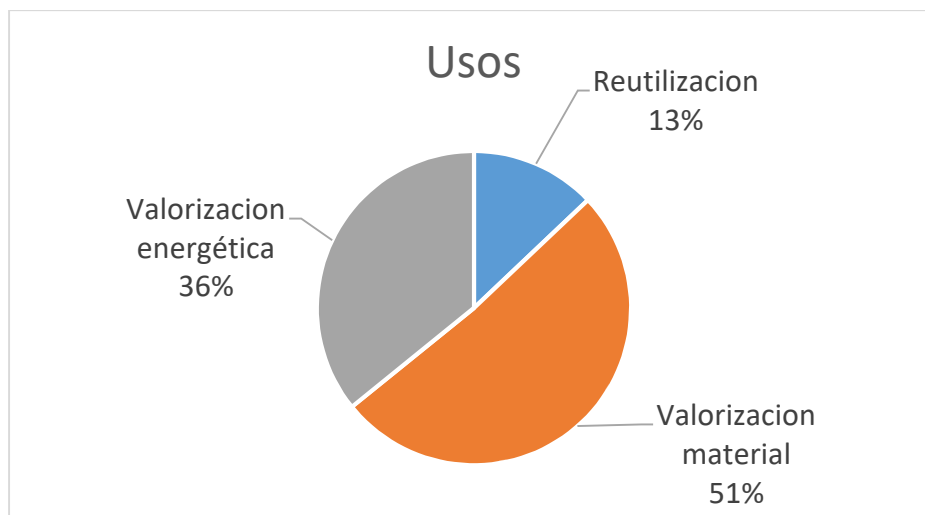


Figura 2.15. Usos de los NFU en España en 2012 [28].

El Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) presentó en 2013 un método de reciclaje que consiste en someter a los neumáticos a una serie de procesos térmicos para convertirlos en combustibles y sustancias gaseosas con capacidad de generación de energía eléctrica. La ventaja principal del método que sigue el CSIC es que no genera residuos ni emisiones, contribuyendo a la reducción de CO2 emitido [31].

También en 2016, los investigadores de la Escuela Superior de Ingeniería Industrial, Aeroespacial y Audiovisual de Terrasa (ESEIAAT) junto con las empresas COMSA y GMN, presentaron un aislante acústico y térmico formado a partir de las fibras textiles de NFU, pasta de papel reciclado y cola blanca [32]. Dicho material tenía una capacidad aislante superior o igual a los convencionales de roca o lana, con un coste un 20% inferior a los existentes en el mercado.

En general, existen numerosas investigaciones en curso, otras ya patentadas en cuanto al reciclaje de neumáticos usados. Y, aunque el caucho y las fibras de acero sean fácilmente incluidas en otros procesos de revalorización, las fibras textiles tienen un futuro aún incierto, pues no se sabe aún muy bien que usos pueden tener.

3. ANTECEDENTES

Se ha demostrado un uso creciente de los materiales compuestos en diferentes ámbitos industriales y tecnológicos en las últimas décadas. Concretamente, en el mundo de la construcción, ha experimentado un gran impulso el uso del hormigón reforzado con fibras tanto a escala nacional, como internacional. Normas como la española EHE-08 en su Anejo 14, menciona recomendaciones sobre su uso para fines estructurales [33].

Gracias a los esfuerzos e investigaciones sobre materiales idóneos para el refuerzo del hormigón, se han conseguido desarrollar nuevas fibras sintéticas capaces de combinarse con el hormigón, consiguiendo una disminución de peso o mayores resistencias flexotracción, en comparación con los métodos de armado actuales. Estas fibras de refuerzo son incorporadas a la mezcla en el momento en que se amasa el hormigón, generando resistencia y evitando posibles fisuras en la estructura interna del material.

Desde el punto de vista de las propiedades adicionales, se ha podido ver una mejora en su protección pasiva contra el fuego (principalmente en revestimientos de túneles) o el control de fisuración (en elementos con elevada superficie y en soleras) por retracción plástica, un hecho común en aceros estructurales.

3.1. Hormigón reforzado con fibras

Según el Anejo 14 de la instrucción EHE 08 [33], “los hormigones reforzados con fibras (HRF), se definen como aquellos hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa”. Este tipo de implican en algunos casos, dependiendo del tipo de fibra que se use, modificaciones en las prestaciones mecánicas del hormigón. Además, su adición puede producir un efecto positivo en el control de la propagación de micro fisuras que pueden derivar en fisuras estructurales con el paso del tiempo.

Según el Anejo 14 de la instrucción EHE 08 [33], “las fibras son elementos de corta longitud y pequeña sección que se incorporan a la masa del hormigón a fin de conferirle ciertas propiedades específicas”. Generalmente, las fibras se clasifican en estructurales y no estructurales, según proporcionen o no una mayor energía de rotura, parámetro por el cual puede valorarse la efectividad de las fibras.

De acuerdo con su naturaleza las fibras se clasifican en:

Fibras de acero

Este tipo de fibra se rige por la norma UNE 14889-1:2008 (Fibras para hormigón. Parte 1: Fibras de acero) y se clasifican según el tipo de fabricación [34]. La longitud de la fibra

debe ser suficiente para proporcionar una adherencia suficiente a la matriz e impedir desgarramientos con excesiva facilidad.

En general, a igualdad de longitud, será más eficiente una fibra de menor diámetro, puesto que permite una mejor redistribución de los esfuerzos a lo largo de la matriz. Matizar que una fibra de menor diámetro permite una mejor distribución de la fibra dentro de la mezcla refuerzo mas uniforme.

Las aplicaciones más frecuentes para este tipo de fibras son elementos prefabricados (canales, tubos, revestimientos refractarios para hornos o conductos, intercambiadores de calor en centrales, etc)

Fibras poliméricas

Regidas por la norma UNE-EN 14889-2:2008 (Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas) [35]. Se emplean tanto para aplicaciones estructurales, como componente de pavimentos, así como soleras y forjados.

Otra aplicación para este tipo de fibras radica en la mejora de la resistencia al fuego tras su adición a hormigones. En este caso a temperaturas muy elevadas, el hormigón libera gases que generan presión en su interior, provocando unas tensiones internas que pueden llega

r a hacer estallar la estructura de este material. Las fibras poliméricas de polipropileno, antes de llegar a esa temperatura de colapso, se derriten creando canales interiores por los que pueden moverse esos gases, evitando el colapso de la matriz de hormigón [36]. En su tesis, Rubén Serrano et al. [37] encuentra que la adición de microfibras de polipropileno a muestras de hormigón sometidas a ensayos a fuego bajo distintos estados tensionales aporta una disminución de las fisuras y un menor astillamiento o *spalling*, frente a las mismas muestras de hormigón sin fibras.

Otras fibras inorgánicas

En el Anejo 14 solo se incluye la fibra de vidrio como fibra de tipo inorgánico para la adición en hormigones. Estas fibras, empleadas en prefabricados para el revestimiento de fachadas o paneles sándwich, entre otras, proporcionan al cemento una mejor resistencia a tracción y mayor ductilidad. Sin embargo, el uso del hormigón reforzado con fibra de vidrio o GRC por sus siglas en inglés, como material estructural ha sido limitado debido al cambio de sus propiedades mecánicas con el tiempo.

La evaluación las propiedades de fractura del GRC y su evolución con el tiempo son pasos esenciales en la evaluación de la idoneidad del GRC como material estructural en aplicaciones arquitectónicas y civiles. En su artículo Enfedaque et al. [38] se fija como objetivo el estudio y la discusión del proceso de fractura para varias probetas de GRC con diferentes disposiciones de fibras, llegando a la conclusión de que la orientación de la fibra

inflúa en la capacidad del material ante esfuerzos y provocaba un aumento considerable de la energía necesaria para producir el inicio y desarrollo de la fractura.

3.1.1. Breve historia del hormigón con refuerzos

Cuando el hormigón simple está sometido a tensiones es muy probable que se produzca un fallo frágil. Por lo tanto, es frecuente que el hormigón cuente con un tipo de refuerzo adecuado que le proporcione una resistencia extra a la rotura evitando un fallo puramente frágil [39]. Un ejemplo frecuente de refuerzo de hormigón reforzado se encuentra en el hormigón armado con barras de acero en su interior. También se incluyen como hormigón armado los reforzados con fibras plásticas, de vidrio o compuesto por fibra de acero o en combinaciones varias, dependiendo de su finalidad.

Los estudios con hormigón armado como componente estructural se sucedieron durante el siglo XIX a lo largo de toda Europa. Desde techos de hormigón con armaduras compuestas de barras de hierros cruzados, como aplicaciones en elementos tales como bóvedas, tubos o vigas. Es conocido el nombre de Hennebique, por desarrollar una serie de patentes como la de una viga en T (1892) o por desarrollar un sistema integral de construcción, desde la cimentación hasta la cubierta.

No fue hasta mediados del siglo XX hasta la actualidad, cuando se comenzaron a suceder los estudios e investigaciones en los diferentes ámbitos de uso del hormigón armado, especialmente como elemento estructural y de obra civil.

En España no fue hasta el año 1983 cuando se publicó la primera norma de ámbito nacional que hablaba sobre los aditivos del hormigón, la norma UNE 83200 “Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Clasificación y definiciones” [40].

A día de hoy el hormigón reforzado tiene múltiples usos, si bien todo depende de las características, la proporción y la distribución de las fibras que contenga.

3.1.2. Fibras de refuerzo en hormigones

La principal desventaja que posee el hormigón es que una vez endurecido, sus propiedades frente a la rotura y su tenacidad quedan reducidas. Estas características pueden ser mejoradas gracias a la adición de fibras cortas durante el proceso de mezclado. Estas fibras quedan dispuestas de forma aleatoria dentro de la matriz del material [41].

En los últimos años, numerosos estudios han concluido una mejora real de las propiedades mecánicas de los hormigones reforzados con fibras. Estos hormigones han sido usados para el reacondicionamiento y la reparación de estructuras de túneles, entre otras aplicaciones. Según las investigaciones, se ha encontrado una mejora de la tenacidad y la resistencia a flexión, entre otras características mecánicas tras la adición de fibras.

Entre las fibras más usadas en el hormigón, se encuentran las fibras de acero, las fibras de vidrio y las fibras de polipropileno [42-43]. En la figura 3.1 se demuestra como la adición de fibras en un hormigón mejora la resistencia flexotracción en el material, donde una mayor área encerrada bajo la curva carga-deformación, indica una mayor tenacidad del hormigón.

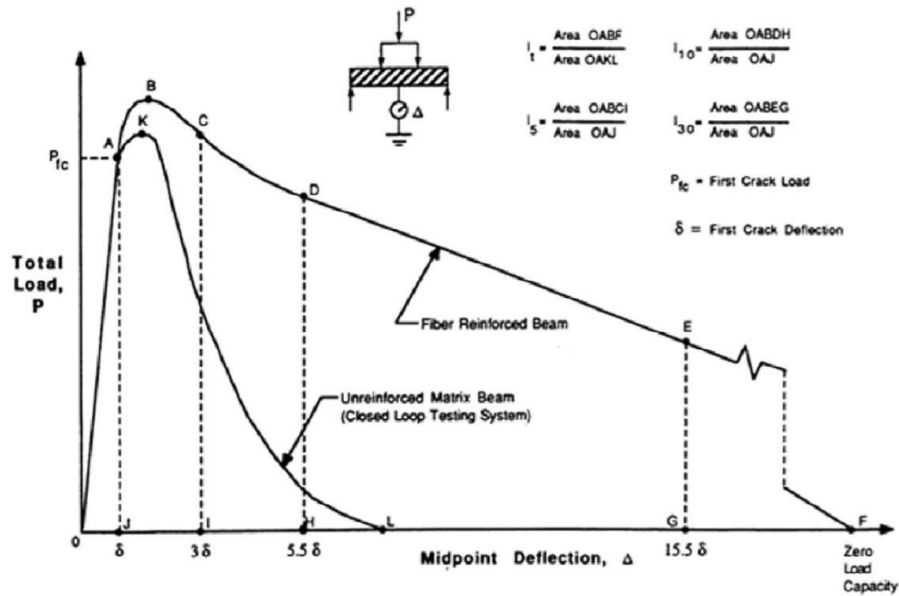


Figura 3.1. Variación de la resistencia a Flexotracción por influencia de la fibra agregada en un hormigón [12].

El uso de fibras cortas dispersas sobre la matriz de hormigón puede mejorar el comportamiento de secado del hormigón, reduciendo la formación de grietas resultado de la rápida evaporación del agua que tiene lugar en una mezcla de hormigón sin adición de fibras. Además, se aprecia en los hormigones reforzados con fibras un mejor control de la apertura y propagación de grieta, pues generan un efecto de cosido en la fisura, evitando su propagación. Por otro lado, las fibras largas permiten un control de las grietas más grandes y contribuyen a un aumento de la carga máxima en hormigones reforzados. Gracias a las fibras, una grieta aislada de gran tamaño es ser reemplazada por microgrietas, al evitar en gran medida los crecimientos aleatorios de grieta, lo cual puede ser en muchos casos sinónimo de seguridad o mayor durabilidad [12-44]. En algunos casos puede limitar la entrada de agentes externos al hormigón que provocan su deterioro, como es el caso del agua que puede dañarlo por efecto de ciclos de hielo-deshielo.

En la figura 3.2. se muestra un esquema de como la longitud de las fibras puede influir significativamente en la apertura y propagación de grieta, dependiendo del tamaño de las mismas. También se hace alusión a la mejora de propiedades de carga máxima de un hormigón reforzado con fibras en comparación de otro no reforzado mediante una gráfica esfuerzo-deformación.

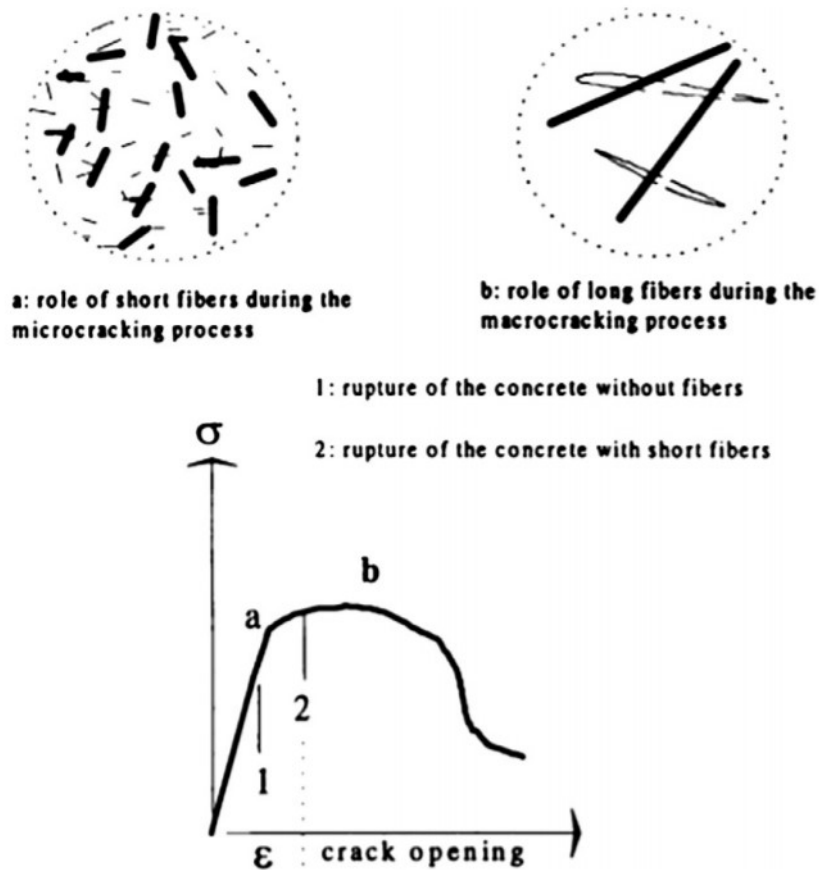


Figura 3.2. Estructura de fibras cortas y largas en el control de la apertura y propagación de grietas en material frágil [45].

En muchos casos los hormigones compuestos con fibras son diseñados a partir de ensayos, donde el efecto del refuerzo proporcional al volumen y eficiencia de las fibras usadas para el refuerzo. En aplicaciones como pavimentos o suelos industriales su composición suele ser del 0.5% en peso o menor, debido al coste de las fibras [44].

Se prevé, por tanto, un desarrollo en la tecnología de adición de fibras en elementos constructivos, llegando incluso a generar aplicaciones donde el uso de hormigón reforzado con fibras se imponga frente al hormigón armado convencional. Para ello será necesario un desarrollo de métodos universales de fabricación, control de calidad o análisis numéricos para el cálculo de esfuerzos de cara al ámbito profesional.

3.1.3. Hormigón con fibras NFU

El reciclado de NFU ha permitido revalorizar los subproductos procedentes de estos residuos. Diversos estudios, han sugerido el uso de fibras de acero y caucho procedentes de los desechos NFU para uso estructural y no estructural. Aiello et al. [46] estudiaron hormigones con adición de fibras de acero procedentes de NFU, obteniendo en sus resultados un aumento de la flexión respecto al hormigón sin adición de fibras. Además,

concluyeron que los hormigones reforzados con fibras de acero de NFU mostraban una buena capacidad de absorción de energía y esfuerzo residual frente a la fractura [47].

En otros estudios se comprobó la reducción de las grietas de retracción en pavimentos tras la adición, en diferentes proporciones, de fibras de caucho procedentes de NFU en pavimentos [8-48].

En las figuras 3.3 y 3.4 se muestran fibras de acero y de caucho procedentes de NFU y usadas en algunos de los ensayos anteriormente citados.

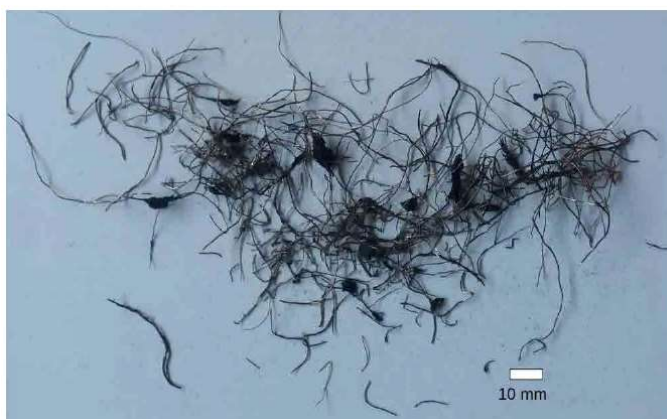


Figura 3.3. Fibras de acero procedentes de NFU [8].



Figura 3.4. Fibras de caucho procedentes de NFU [8].

3.2. Yeso con fibras

En cuanto a la influencia de las fibras, existen trabajos que reflejan su estudio como agente de refuerzo en yesos, como el destacado estudio del español García-santos [49].

En su tesis doctoral, García-Santos plantea el uso del con fibras sintéticas para adicionar el yeso, abogando por la buena unión que se genera entre matriz y refuerzo durante su fabricación. En este trabajo, García-Santos estudia varios polímeros sintéticos adicionados al yeso en proporción variable, obtenido una selección de fibras, dispersión y porcentajes idóneos. Una vez seleccionada y optimizada la mezcla, se comprueba su

funcionalidad para la fabricación de placas y se realizan ensayos de resistencia a impacto y tracción.

Basando su trabajo en García-Santos, también se ha comprobado como la adición de fibras a morteros de yeso, mejora la resistencia a tracción y flexocompresión de las mezclas. Concretamente se realizó un estudio donde la adición de fibras en yesos mejoraba el comportamiento a rotura del material, llegando a desplazar incluso zonas de concentración de esfuerzos y disipando esta energía en un área mayor [50]. En la figura 3.5 se observa como la aglomeración de fibras, en este caso poliofelina y polipropileno, da robustez al material, desplazando la zona de rotura hacia la izquierda de la sección menor.

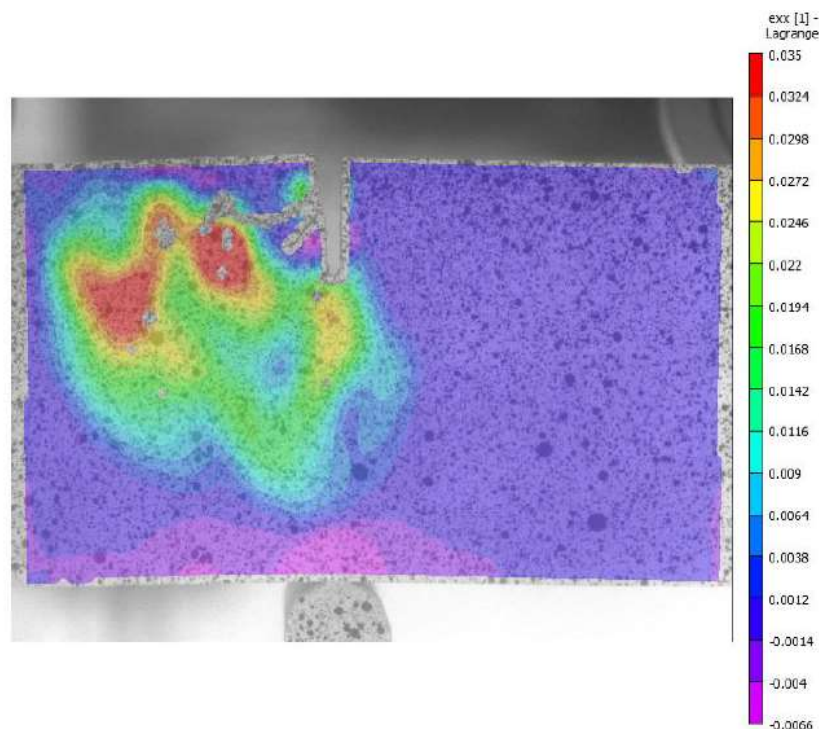


Figura 3.5. Desplazamiento de la zona de rotura en un yeso con fibras [50].

Otros estudios sobre yesos adicionados con fibras sintéticas, también concluyen una mejora de las propiedades mecánicas y de propagación de esfuerzos frente a probetas de yeso simple. En un estudio realizado por SUÁREZ, F., et al. [51] se comprueba como la adición de fibras poliméricas a matrices de yeso mejora los comportamientos de fractura e incluso las cargas máximas de rotura de estos materiales compuestos.

En la figura 3.6 se muestran los resultados de varias probetas con diferentes tipos y proporción de fibras ensayadas (colores rojo y azul), frente a otra probeta de yeso sin fibras (gris). Se observa una clara mejora del comportamiento mecánico frente a la fractura.

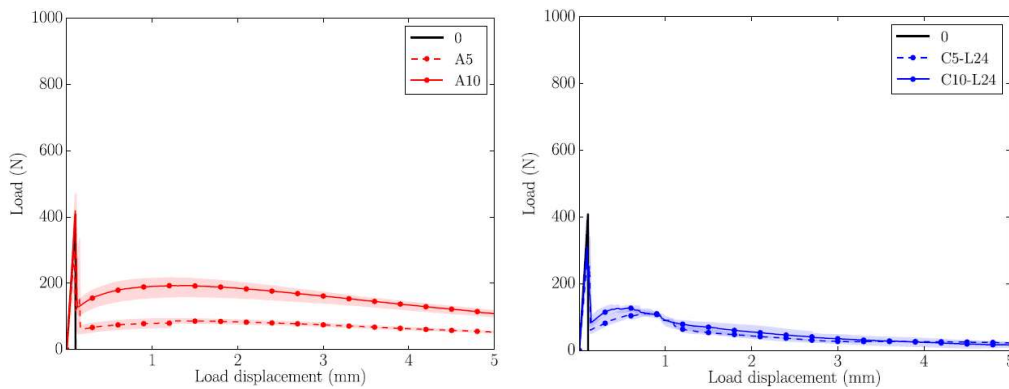


Figura 3.6. Curvas experimentales obtenidas a partir de ensayos de flexión a tres puntos de probetas de yeso adicionadas con microfibras de polipropileno (en color rojo) y macrofibras de poliolefina (en color azul) [51].

3.2.1. Yeso con fibras NFU

En general, son pocas las referencias encontradas en relación a las mejoras o no de las propiedades mecánicas del yeso tras la adición de fibras procedentes de NFU. Si bien se recogen estudios comprobando el comportamiento de estas fibras para otras aplicaciones no estructurales.

Sofía Herrero et al. concluyeron que tras la incorporación de fibras de caucho procedentes de NFU, se constató una reducción de la resistencia a la flexión y compresión del compuesto de yeso, además de un descenso de su módulo de elasticidad [52]. En general, apoyaron su uso en elementos de tabiquería y falsos techos. Sin embargo, la incorporación de caucho procedente de NFU, tanto en fibra como en polvo, mejoraría el comportamiento térmico del yeso según sus estudios.

En el ejemplo de este trabajo, se usaron fibras textiles procedentes de NFU, de las que no se han encontrado referencias notables en cuanto a propiedades mecánicas.

3.3. Métodos de ensayo en modo II

Existen numerosos estudios e investigadores que han trabajado con ensayos aplicados a hormigones simples u hormigones reforzados con fibras, como se ha descrito anteriormente en este trabajo. De entre todos los modos de rotura expresados en la figura 2.5, este trabajo se va a basar en los resultados obtenidos sobre un estudio de rotura en modo II.

A continuación, se presentan algunos ensayos aplicados a hormigones reforzados con fibras y otros hormigones simples para este modo de fallo, que pueden ser extrapolables en ejecución (no necesariamente en resultados) a otro tipo de materiales con comportamiento cuasi-frágil reforzados o no con fibras.

En su estudio sobre transferencia de esfuerzos en grietas en un acero reforzado con fibras, SOETENS, Tim y Matthys, Stijn [39], explican que cuando un elemento de hormigón, considerado un material cuasi-frágil, está sometido a esfuerzos y tensiones, es muy probable que ocurra una rotura frágil. En su trabajo explica como diferentes configuraciones en los ensayos de las probetas de hormigón compuesto, suponen en gran parte una propagación de grieta diferente que no será puramente en modo I (rotura normal al plano de la grieta). Sino que contendrá una componente predominante modo II de rotura (*sliding* o deslizamiento).

En su estudio, Soetens aplicó un ensayo modificado basado en el método de la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles, conocida por JSCE por sus siglas en inglés, que se corresponde con la disposición a) mostrada en la figura 3.7. En estos ensayos no se encontraron diferencias notables en la propagación de las grietas en relación al tipo o a la cantidad de fibras. Sin embargo, si se observó un incremento en la capacidad de carga de las probetas, además de una mejor absorción de la propagación de la grieta gracias al refuerzo de fibras.

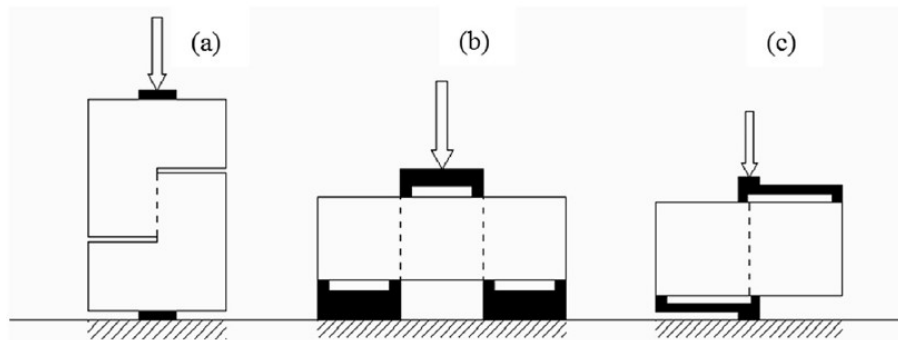


Figura 3.7. Diferentes configuraciones para estudiar modo II puro de rotura: a) Tipo Z o push-off, b) Tipo JSCE y c) Tipo FIP [39].

Picazo, A, et al. en 2017, realizaron un trabajo sobre hormigones reforzados con fibras sintéticas para estudiar el comportamiento a cortante en modo II [53]. La importancia de esta investigación radica en la evaluación de varios tipos de hormigón con varias cantidades de fibras de poliolefina bajo de cizallamiento mediante pruebas de empuje o ensayos push-off y el uso de la técnica de Correlación Digital de Imágenes (DIC) para el estudio de la nucleación y propagación de grietas en rotura.

Llegaron a importantes conclusiones gracias al uso de técnicas poco convencionales como el DIC. Entre otras, destacan las siguientes:

- Los datos de esfuerzo obtenidos en estos ensayos pueden ser tenidos en cuenta en diseño estructural.
- Los valores encontrados en los esfuerzos, en este caso, sí que estaban relacionados con el porcentaje de fibras o la posición de las mismas.

- Este estudio demostró como las fibras mantenían parcialmente constante el esfuerzo tras la aparición de las primeras grietas, lo que deriva en un mejor control de apertura y propagación de la grieta en hormigones reforzados con fibras de poliolefina.
- Se demostró una mayor ductilidad del hormigón reforzado con fibras bajo los esfuerzos de cizallamiento llegando a soportar una deformación de hasta 6 mm mayor.

Para este trabajo, ha habido una bibliografía de referencia por excelencia: el compendio de ensayos realizados en la década de los 90 a lo largo de Europa, América, Asia y Oceanía, referido a pernos metálicos embebidos sobre estructuras de hormigón simple [54].

En este trabajo se aunaron esfuerzos desde diferentes entidades a nivel internacional, llegando a reunir resultados sobre esfuerzos cortantes en modo II de 23 grupos de trabajo, lo que se traduce en más de 120 ensayos y 150 análisis.

Se presentó un problema inicial a todos los integrantes de este compendio, asociado a unas geometrías y a unas metodologías de ensayo, que los participantes tenían que reproducir en la medida de lo posible mediante métodos experimentales o numéricos dependiendo de los medios disponibles. El problema consistía en una pieza de acero (perno) embebida en una probeta de hormigón que era sometida a tracción hasta desgarrar el material provocando su rotura.

Los patrones que se sucedieron a lo largo de todos los ensayos debían ser algo parecido al esquema mostrado en la figura 3.8, donde se aprecia el perfil del ensayo realizado y el patrón de rotura descrito tras la realización del ensayo. Dichos ensayos fueron denominados de pull-out, debido a la fuerza aplicada para “sacar” esta T metálica del interior la matriz de hormigón

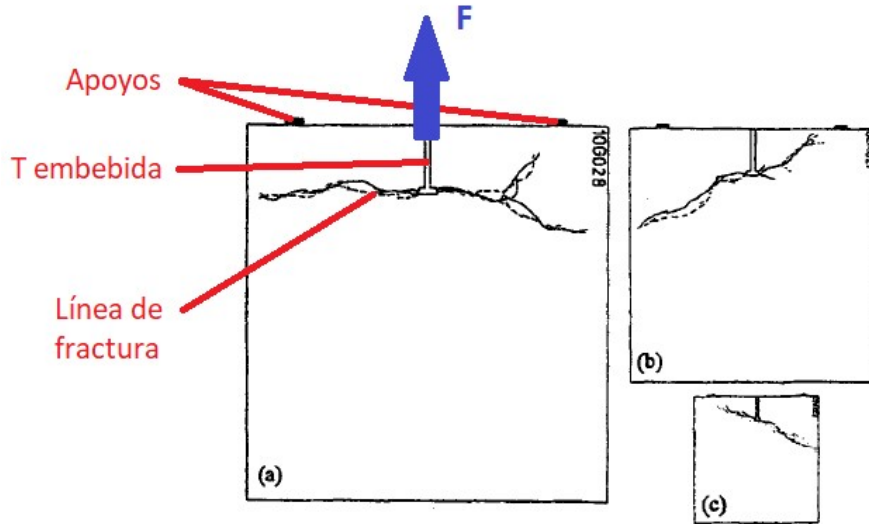


Figura 3.8. Patrones de grieta en hormigones con diferentes composiciones en ensayos pull-out [55].

La heterogeneidad de los resultados obtenidos indicó que el modo II de fractura y el análisis y control de propagación de grietas era más complicado de lo esperado de acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos y los análisis numéricos.

Se encontró una influencia importante en las distintas geometrías usadas, así como en las condiciones de contorno de los ensayos, donde un pequeño cambio en la geometría de los pernos o la separación de los apoyos suponía una variación de la carga máxima soportada en el ensayo.

Este estudio, que resulta la base principal para la realización de la geometría de ensayo de este trabajo, arrojó datos sobre los patrones de inicio y propagación de grietas que en cualquier caso pueden ser extrapolados, en parte, a materiales con comportamiento cuasi-frágil parecidos al del hormigón.

4. OBJETIVOS

Tras la exposición de lo anteriormente explicado, se presentan los objetivos que se persiguen en este trabajo:

- Sentar las bases para ensayos de pull-out, con el objetivo de poder realizar futuros estudios del modo II de fractura en materiales cuasi-frágiles.
- Realizar un profundo estudio previo de la bibliografía referente a estudios de pull-out en hormigones con la intención de diseñar una configuración de ensayo válida para los materiales estudiados.
- La obtención de resultados en lo referente al uso de fibras NFU como refuerzo en materiales cuasi-frágiles y comparados con el proporcionado por las fibras de polipropileno, que puedan proporcionar datos útiles de cara a su revalorización como material reciclado.
- Analizar los patrones de inicio, desplazamiento y propagación de grietas en materiales compuestos de fibras para un modo II de rotura.
- Analizar el efecto del refuerzo de cada tipo de fibra en relación con la energía de fractura liberada durante la rotura.
- Realizar un análisis y comparación del aporte de fibras poliméricas, tanto sintéticas como procedentes del reciclado de neumáticos frente a un material simple.

5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

5.1. Equipos

5.1.1. Máquina de ensayos INSTRON 5967

Todos los ensayos reflejados en este trabajo se han realizado en un sistema universal de ensayo electromecánico, en particular, en una máquina bicolonna de la marca Instron de la serie 5960 (figura 5.1). Se trata de una máquina con posibilidad de intercambiar sus útiles de ensayo, lo que permite la realización de pruebas como tracción, compresión, cizalladura o flexión.

La máquina cuenta con un sistema de adquisición de datos conectada a un software externo, que permite un análisis de lo ocurrido durante la realización de los ensayos. En concreto, se registran datos de desplazamiento del puente y fuerza medida por la célula de carga. Para este modelo se enumeran algunas de sus características:

- Capacidad de carga de 30 kN
- Espacio disponible para ensayo vertical de 1212 mm
- Una precisión de medida de ± 0.01 mm en el desplazamiento vertical y $\pm 0.1\%$ de exactitud en la velocidad de testeo.
- Velocidad de testeo configurable entre los valores 0.001 a 1000 mm/min
- Cuenta con un sistema de adquisición de datos con 4 señales analógicas y salida de 4 señales digitales configurables.



Figura 5.1. Máquina de ensayos bicolumna modelo INSTRON 5967.

5.1.2. Amasadora planetaria para morteros

Para la realización de los ensayos se ha usado una amasadora modelo AMPL del fabricante MEF S.L (figura 5.2) con un tanque de acero inoxidable de 5 litros de capacidad. Esta amasadora describe un movimiento planetario según la norma EN 196.

La máquina permite dos velocidades de amasado. En este trabajo se ha usado la más lenta. La máquina cuenta con protecciones para evitar salpicaduras de la mezcla.



Figura 5.2. Amasadora planetaria

5.1.3. Báscula de precisión

Báscula de precisión $\pm 0.1\text{g}$ de hasta 6200 g de amplitud de medida. Ampliamente usada en laboratorio, pues cuenta con función de tara y nivel de burbuja (figura 5.3).



Figura 5.3. Báscula de precisión.

5.1.4. Cámara de curado

Se ha usado una cámara de curado o cámara climática presente en las instalaciones de la Universidad de Jaén en el Campus Científico-Tecnológico de Linares. Se trata de una cámara climática modular o transitable, es decir, puede acceder una persona dentro de ella.

Estos equipos están diseñados para simular condiciones controladas de temperatura y humedad relativa en su interior. Gracias a ella, se pueden realizar ensayos y estudios para verificar durabilidad, calidad del producto o del material expuesto a dichas condiciones climáticas.

En este caso, fue necesario meter las probetas usadas en los ensayos, al menos durante una semana, para que todas ellas tuvieran las mismas condiciones de secado y por tanto se pudiese asegurar la comparabilidad de los resultados con las mezclas empleadas.

5.2. Materiales

5.2.1. Yeso

El yeso, un mineral en forma de polvo (sulfato cálcico), es considerado un material de construcción auxiliar. Para la realización de las probetas se ha usado una escayola E35

(A1), un tipo de yeso semihidratado considerado blanco, con un alto porcentaje de mineral (más de un 90% de pureza) y con un grano fino (figura 5.4).

El yeso o yeso de París, como material de construcción, no contiene ningún poder aglutinante como el hormigón o la cal, es decir, no se debe usar en zonas donde deba cohabitar con humedad o para levantar muros de carga. Tampoco se recomienda su uso si debe estar en contacto con plomo, cobre o hierro sin tratar, ya que puede provocar oxidaciones o picado de estos metales. Aplicado directamente sobre metales, deja un rastro de óxido.

El yeso es un excelente aislante y regulador térmico y acústico, es un material que transpira y es capaz de mantener cierto grado de humedad en su estructura. Se usa como material de acabado o en esculturas.

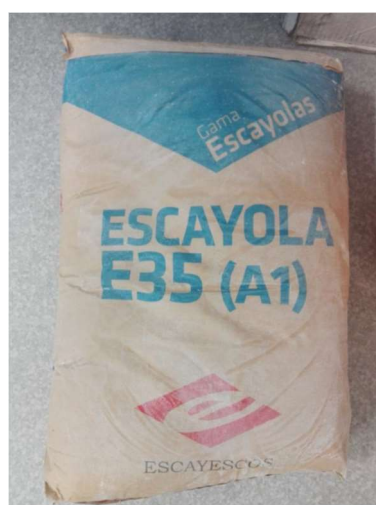


Figura 5.4. Escayola E35 (A1) [50].

5.2.2. Fibras de polipropileno

Las fibras de polipropileno escogidas son las SikaFiber M-12, unas microfibras de monofilamento para refuerzo de material de construcción con el fin de aumentar su durabilidad y conferir una mayor resistencia a los esfuerzos (comúnmente hormigones y morteros). Se ha elegido esta fibra por su buena propiedad de dispersión en la mezcla, lo que asegura una distribución homogénea y uniforme de las tensiones en el interior del material compuesto, reduciendo la fragilidad del material. En la tabla 1 se recogen algunas de sus propiedades principales.

Tabla 1. Propiedades mecánicas fibras SikaFiber M-12.

Modelo de fibra	SikaFiber M-12
Longitud	12 mm
Diámetro de fibra	~ 31 μm

Tenacidad	~ 280-310 N/mm ²
------------------	-----------------------------

Son fibras de color blanco y aspecto gomoso, tal como se observa en la figura 5.5. En el ANEXO 2 se incluye la ficha técnica del fabricante.



Figura 5.5. Fibras de polipropileno.

5.2.3. Fibras textiles NFU

Estas fibras provienen de la extracción y separación del reciclado de NFU, son conocidas como *fluff* (en inglés) por su aspecto de pelusa (figura 5.6).

Esta estructura se consigue entrelazando las fibras con métodos mecánicos químicos o térmicos, por lo que en general se trata de un material con poca resistencia a no ser que sea adicionada con otros materiales de refuerzo.

En nuestro caso, estas fibras no se han caracterizado geométricamente, es decir, no se conoce la densidad del material, la porosidad o diámetro del mismas. Se ha usado sin ninguna preparación previa, tal como fueron adquiridas por el suministrador.



Figura 5.6. Fibras textiles obtenidas del procesado de NFU.

En otros trabajos experimentales, se prepararon previamente estas fibras mediante cardas manuales para desenmarañar el material y separar las partículas de caucho adheridas [57]. De esta manera se aporta cierto grado de ortotropía a las fibras y podrían mejorarse las propiedades en una dirección.

5.3. Diseño del método experimental

A continuación, se recogen y desarrollan los pasos que engloban todo el proceso de construcción del método, incluyendo el análisis y discusión de las varias opciones que se han contemplado a lo largo de la realización de este trabajo. Se hablará también de los elementos que forman parte de los ensayos, molde, probetas, sistema de agarre; así como el procesado de los datos obtenidos tras la realización de los ensayos.

Debido al valor añadido que supone para el Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera de la Universidad de Jaén haber realizado una primera toma de contacto con estos ensayos de fractura en modo II, se ha registrado, en todos los casos, los intentos fallidos encontrados en las distintas etapas de este trabajo. Se pretende, por tanto, crear una base experimental que sirva como precedente para trabajos posteriores.

5.3.1. Diseño de la probeta

Durante la fase de diseño de la probeta, se tuvo en cuenta toda la bibliografía anteriormente consultada sobre ensayos en modo II para probetas de hormigón, que recoge más de 60 investigaciones a lo largo de América, Asia, Europa y Australia., realizadas durante los años noventa.

Se comenzó haciendo un estudio general del compendio de datos recogidos de más de 300 ensayos, buscando similitudes y puntos claves para el diseño de las probetas, en función de los materiales disponibles en la universidad y la capacidad de los laboratorios y los instrumentos que iban a ser usados en el ensayo. En este punto era importante llegar a una predicción de la carga máxima que llegarían a aguantar las muestras a ensayar, siendo 30 kN la capacidad máxima de la carga de la máquina de ensayo usada.

Es importante mencionar que en ningún caso los datos, conclusiones y decisiones llevadas a cabo durante de esta sección y posteriores son necesariamente los únicos posibles para este tipo de ensayo, puesto que existen muchas otras configuraciones y variaciones respecto al procedimiento aquí mostrado. Es decir, en este TFG se presenta una metodología y resultados preliminares, los cuales podrían definirse más concreta y correctamente a partir de futuras campañas de ensayos.

5.3.1.1. Criterios de diseño

A continuación, se comienza haciendo una descripción de los criterios que se tuvieron en cuenta a la hora del diseño de las probetas de ensayo. Partiendo del hecho de que se tienen resultados y probetas para hormigones, se intenta hacer una extrapolación para realizar estos mismos ensayos con probetas de yeso y yeso compuesto con fibras.

En primer lugar, se ha de estimar o deducir la carga máxima que van a soportar las probetas analizadas. Este hecho va a suponer el punto de partida para el dimensionado de los sistemas de agarre y del propio ensayo.

Como se ha discutido en los antecedentes, la geometría que inicialmente el Analisis de Round Robin [55] propuso para realizar los ensayos fue la siguiente (figura 5.7):

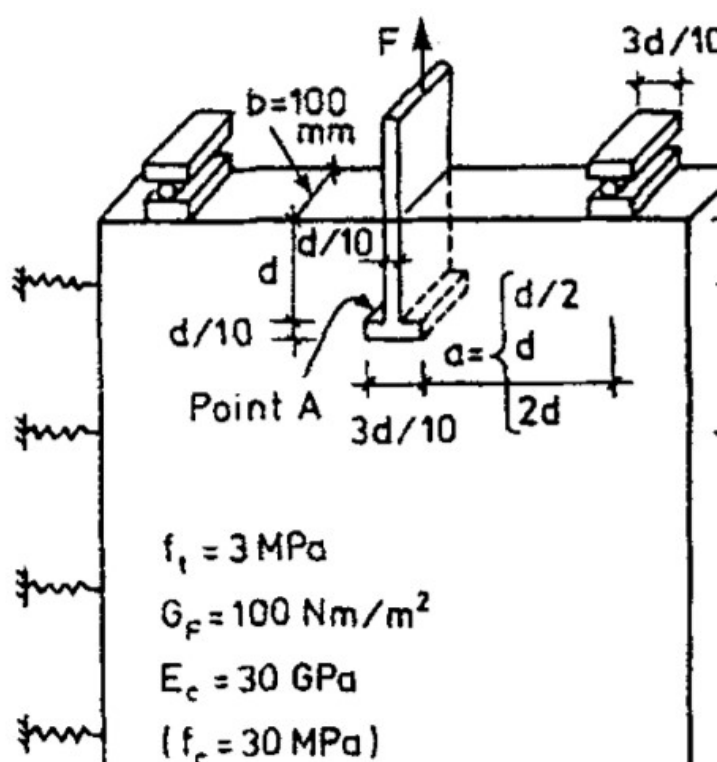


Figura 5.7. Propuesta de la geometría para el análisis de Round Robin [55].

Además, en este compendio de resultados se incluían unas recomendaciones, recogidas en la figura 5.8, que desde un principio se intentaron seguir a la hora del diseño de la probeta. En caso de que solo se pueda analizar un supuesto, las recomendaciones fueron usar la opción marcada con una x a la hora de fabricar las probetas de ensayo.

Siguiendo estas recomendaciones y partiendo del material disponible en los laboratorios para realizar las probetas, se decidió iniciar un diseño utilizando la configuración marcada en la figura 5.8.

Plane stresses				
K = 0				K = ∞
d =	50	150	450	150
a = d/2		x		
a = d		x		x
a = 2d	x	X	x	x

Figura 5.8. Recomendaciones sobre los parámetros geométricos para ensayo. En amarillo la configuración elegida sobre la que se partirá para idear una configuración del ensayo [55].

En nuestro caso, la probeta no tendrá ningún encastre lateral, sino que estará libre. Por tanto, $K=0$.

Otro punto a tener en cuenta fue que la profundidad de la probeta se haría en función de los moldes que ya se tenían en los laboratorios, que podían ser usados en parte para la fabricación de las probetas y que, en todos los casos, tenían una profundidad de 40 mm. Debido a que todos los ensayos y resultados aquí propuestos se proponen como un análisis inicial de ensayos en modo II para yesos y yesos compuestos o, visto de otro modo, un punto de partida para trabajos posteriores, la dimensión de profundidad no era clave de cara a obtener unos resultados válidos. Es por eso que no se mantuvieron los 100 mm propuestos en la bibliografía. Así como se varió la profundidad también lo hicieron otros parámetros que no aparecen en la figura.

A continuación, se van a enumerar las distintas fases del diseño de la probeta de ensayo, dando una explicación basada en los recursos disponibles (normativa y bibliografía) de por qué se ha decidido seguir el camino elegido.

5.3.1.2. Fase 1: estimación de la carga máxima de rotura

Llegados a este punto, lo que va a definir en gran parte la configuración de ensayo de este proyecto, va a ser el esfuerzo máximo de tracción que van aguantar las probetas. Todas las suposiciones se basaron en los resultados obtenidos de los ensayos a probetas de hormigón realizados en el “Estudio Experimental de Fractura de Anclaje de Pernos” realizado en el *Institute for Building Materials (Zurich, Switzerland)* [57]. Se eligió este estudio experimental como referencia por usar unas dimensiones similares a las elegidas para este trabajo.

En este estudio se realizaron ensayos con distintas geometrías, presentadas en la figura 5.9. Los materiales fueron A (hormigón), B (mortero) y C (hormigón ligero). La figura 5.10 contiene la composición y propiedades de los materiales usados en los ensayos de Alvaredo et al.

Series	number of specimens	d [mm]	a [mm]	material	K
S1	3	150	2d=300	A	0
S2	3	150	d=150	A	0
S3	3	150	d/2= 75	A	0
M1	3	150	2d=300	A	0
M2	3	150	2d=300*	B	0
M3	2	150	2d=300	C	0
R1	2	50	2d=100	A	∞ ***
R2	3	50	2d=100**	B	∞ ***
R3	3	50	2d=100	C	∞ ****

Figura 5.9. Cantidad, dimensiones y material de las muestras utilizadas en los ensayos [54].

Material	A normal concrete	B mortar	C lightweight concrete
Max. grain size [mm]	16	4	10 (expanded clay)
Cement content [kg/m ³]	350	410	4500
Water content [kg/m ³]	175	205	200
Aggr. content [kg/m ³]	1890	1790	1000 l/m ³ (expanded clay) +400 kg/m ³ (sand)
Compr. strength [MPa]	39.3±4.1*	22.6±0.7**	28.2±2.1**
Mod. of elasticity [MPa]	37600	18290	15070
Fracture energy [N/m]	93.17±10.31***	72.60±5.76***	40.35±3.55***
Density [g/cm ³]	2.41	2.20	1.56

Figura 5.10. Características de los materiales usados en los ensayos [54].

Los resultados experimentales obtenidos mostraron unas curvas tensión-desplazamiento con unas cargas máximas (de rotura) y desplazamientos asociados a dichas cargas máximas. Dichos números están recogidos en la figura 5.11.

Series	Peak load P_{max} [kN]	Displacement at peak load v_m [μ m]
S1	38.4 ±1.8	82.7
S2	61.9 ±5.2	255.4
S3	117.1 ±12.6	248.0
M1	29.4 ±2.5	81.6
M2	21.1 ±1.3*	95.0
M3	15.4 ±0.4	67.5
R1 for K=0	18.3	44
for K= ∞	25.2	3529
R2 for K=0	13.7**	44.3
for K= ∞	33.2**	2469
R3 for K=0	8.2	64.4
for K=	20.8	1306
for $0 < K < \infty$	13.2	3868

Figura 5.11. Datos de carga máxima y desplazamientos asociados. En amarillo marcado el dato de para la obtención de la carga máxima de referencia [54].

Para el caso que nos ocupa, dado que se ha elegido dimensionar los ensayos para una profundidad de encastre del “perno” de 50 mm (d= 50 mm) y una distancia entre los

extremos del perno y los apoyos de 100 mm ($a=2d=100$ mm), se decide tomar como referencia los resultados obtenidos para la muestra R1 para $K=0$.

A partir de la figura 5.11, se observa que para las geometrías de los especímenes R1, R2 y R3, con valores a y d similares, se ha elegido el hormigón con más resistencia a la rotura como dato de referencia, buscando estar siempre dentro del lado de la seguridad.

Como hemos mencionado anteriormente, nuestra probeta tendrá una profundidad de 40 mm, dado que las propiedades de fractura son extensivas, en este caso, una menor profundidad de la probeta supondrá un descenso proporcional de la carga necesaria para el fallo. Según las indicaciones del tutor, siguiendo una regla de proporcionalidad directa, se extrapolaron los siguientes resultados de carga máxima para una probeta de un espesor 40 mm frente al espesor de 100 mm de los ensayos de referencia:

$$P_{max}[kN] = 18.3 \cdot \frac{40}{100} = 7.32 \text{ kN}$$

Es decir, en el caso de que la probeta fuese de un hormigón de propiedades parecidas a las del material A, recogidas en la figura 5.9, y el ensayo se realizara en condiciones geométricas similares al ensayo R1, la carga teórica media de rotura que aguantaría el espécimen sería de 7.32 kN.

5.3.1.3. Fase 2: diseño y fabricación de la T embebida

Con este dato, se pudo empezar a dimensionar las condiciones de la probeta de ensayo. Siguiendo las indicaciones de este compendio de ensayos ELFGREN, Lennart; se tomó la decisión de fabricar una T de acero con resistencia mayor o igual a la carga máxima obtenida en el apartado anterior.

Después de hacer un acopio de las diferentes opciones en función de los materiales disponibles y la capacidad de trabajo de los laboratorios, se debía decidir entre fabricar una T como una sola pieza o como una vertical atornillada a otra horizontal según la figura 5.12.

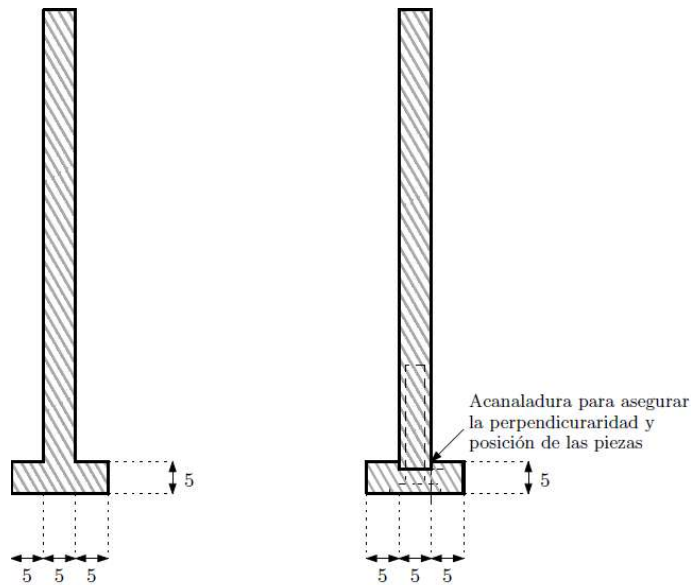


Figura 5.12. Esquema geometría T. A la izquierda la opción de T como una pieza única, a la derecha la opción de T como dos piezas unidas de forma permanente o no permanente (cotas en mm).

Por motivos de sencillez de fabricación, finalmente se optó por una T compuesta por dos piezas unidas perpendicularmente mediante pernos de acero. Teniendo en cuenta que una de ellas contuviera un canal para asentar entre ellas, de forma que la unión fuera totalmente perpendicular.

El siguiente paso consiste en calcular la cantidad y propiedades mínimas de resistencia de los pernos que se van a usar para realizar la unión. Para ello se hizo uso de la Instrucción de Acero Estructural [58] puesto que incluye un artículo referido a uniones atornilladas haciendo uso de tablas de propiedades de tornillería en función de su geometría o procesos de fabricación. A continuación, se describirá el proceso a seguir para la elección de la tornillería, haciendo referencia a las formulas, valores y recomendaciones de la norma.

Se hace referencia al Artículo 58 sobre uniones atornilladas para el dimensionamiento y elección de la tornillería. En este punto, se distinguen cinco categorías según si la sollicitación del tornillo es en la dirección normal a su eje, categorías A, B y C, y otras dos, categorías D y E, en uniones donde los tornillos están sollicitados a tracción, es decir, en la dirección de su eje. Nuestro caso corresponde a de categoría D, o uniones con tornillos trabajando a tracción.

A continuación, se hace referencia al punto 58.7 de la norma "Resistencia a tracción". Según este artículo, la resistencia a tracción de un tornillo viene dada por la siguiente expresión:

$$F_{t,Rd}[N] = \frac{0.9f_{ub}A_S}{\gamma_{M2}} \quad (\text{ecuación 5.1})$$

Siendo,

- f_{ub} [N/mm^2], resistencia a tracción mínima de un tornillo en función de su grado de resistencia. Dato recogido en la tabla 29.2.a de esta misma norma (Figura 5.11).
- A_S [mm^2], sección transversal del tornillo
- γ_{M2} , resistencia a rotura de las secciones transversales en tracción. Dato recogido en la tabla 15.3 de esta misma norma (Figura 5.12).

Coeficientes parciales para la resistencia, para estados límite últimos

Resistencia de las secciones transversales.	$\gamma_{M0} = 1,05^{(1)}$
Resistencia de elementos estructurales frente a inestabilidad.	$\gamma_{M1} = 1,05^{(1), (2)}$
Resistencia a rotura de las secciones transversales en tracción.	$\gamma_{M2} = 1,25$
Resistencia de las uniones.	$\gamma_{M2} = 1,25$
Resistencia al deslizamiento de uniones con tornillos pretensados:	
— En estado límite último (uniones categoría C) (ver apartados 58.2 y 58.8).	$\gamma_{M3} = 1,25$
— En estado límite de servicio (uniones categoría B) (ver apartados 58.2 y 58.8).	$\gamma_{M3} = 1,10$

Figura 5.13. Tabla 15.3 de la Instrucción de Acero estructural [58].

Límite elástico mínimo f_{yb} y resistencia a tracción mínima f_{ub} de los tornillos (N/mm^2)

Tipo	Tornillos ordinarios			Tornillos de alta resistencia	
Grado	4.6	5.6	6.8	8.8	10.9
f_{yb}	240	300	480	640	900
f_{ub}	400	500	600	800	1.000

Figura 5.14. Tabla 29.2.a de la Instrucción de Acero estructural [58].

Se han elegido para hacer los cálculos tornillos avellanados de M5 según, por tanto, se ha de tener en cuenta que la resistencia a tracción será igual al 70% de la dada por la ecuación 5.1 (dato reflejado en el Artículo 57.7 de la Instrucción de Acero Estructural).

Se ha calculado la resistencia para tornillos de grado 4.6 y 8.8, obteniendo los siguientes valores de resistencia a tracción:

$$F_{t,Grado\ 4.6} = 3.96\ kN$$

$$F_{t,Grado\ 8.8} = 7.92\ kN$$

Se decide por tanto usar tornillos DIN 7991 de M5x12 de grado 8.8 o un punto inferior para estar del lado de la seguridad, teniendo en cuenta que la carga máxima que va a aguantar la probeta de ensayo será en todos los casos inferior a 7.32 kN, como se ha calculado anteriormente.

Tras la elección de la tornillería, se ha procedido al diseño y fabricación de la T que irá embebida en las probetas de yeso y yeso con fibras. Para ello, se han tomado como datos geométricos los del ensayo usado como referencia (figura 5.6) como punto de partida,

aplicando algunas modificaciones que se han considerado necesarias dado el método de fabricación elegido:

- La primera modificación fue aumentar el espesor de la zona vertical de la T hasta los 7 mm, puesto que debía alojar tornillos de M5 en ella. La longitud dada según la geometría de referencia era tan solo de 5 mm (figura 5.14 marcado en naranja), insuficiente para mecanizar los alojamientos de los pernos.
- La segunda modificación, derivada de la primera, fue aumentar la distancia marcada en verde en la figura 5.15, sumándole los 2 mm que había aumentado el espesor de la chapa vertical sobre la que se atornilla esta chapa más pequeña.

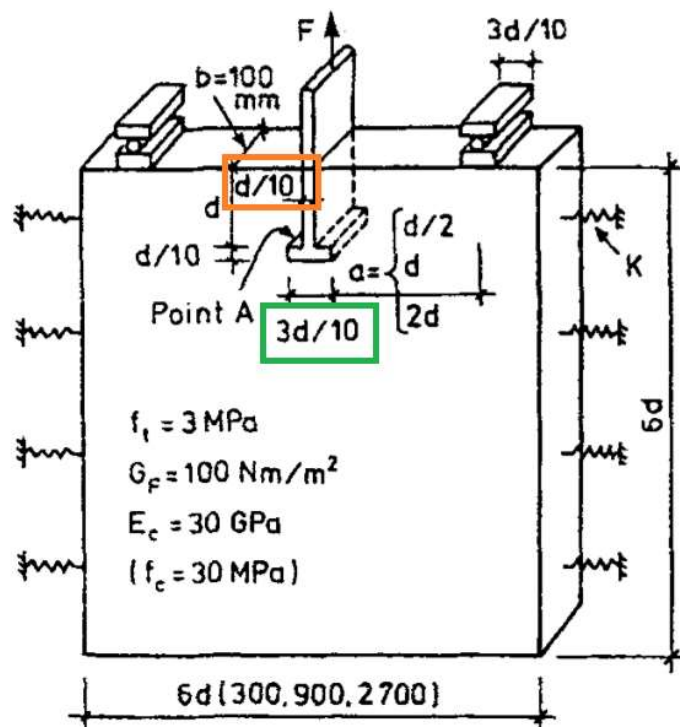


Figura 5.15. Dimensiones a tener en cuenta para el diseño de la T.

En conclusión, se obtiene una T con longitud suficiente para mantener embebidos 50 mm tal como se decidió inicialmente y para facilitar un buen agarre posterior de cara a la realización de los ensayos de pull-out. En la figura 5.16 se muestra una imagen de una de las T fabricadas.



Figura 5.16. Aspecto final de la T fabricada en acero al carbono.

Los planos de ambas piezas se incluyen en el ANEXO 1.

5.3.1.4. Criterios de diseño para la probeta

A partir de las medidas de referencia aportadas por la bibliografía, se decidió fabricar las probetas siguiendo, al menos, los siguientes criterios geométricos (figura 5.16):

- Longitud de la T embebida $d=50$ mm
- Distancia entre final de T y apoyos de $a=2d=100$ mm.
- Longitud total de la probeta total de al menos $3d$, aunque se recomendaba $5d$, se ha intentado guardar una semejanza en forma respecto a la geometría de referencia, teniendo en cuenta las limitaciones geométricas para un manejo posterior de las probetas.

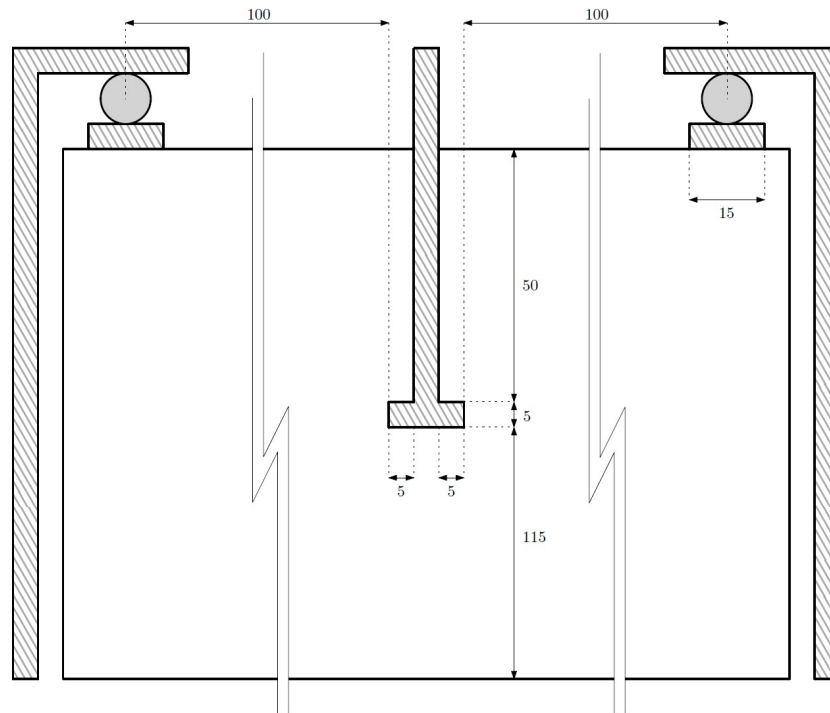


Figura 5.17. Criterios geométricos iniciales para la fabricación de las probetas (cotas en mm).

5.3.2. Diseño y fabricación del molde

A la vez que se establecían los criterios de diseño para las probetas, se trabajó de forma paralela en la elección y mecanizado de los moldes para la fabricación de los especímenes a ensayar.

En los laboratorios se contaba con un molde de material plástico PVC que se consideró apto para este ensayo. En la figura 5.18 se puede ver una disposición general del molde, la pieza marcada en rojo es una pieza extraíble de forma manual, el resto de piezas están atornilladas a la base, también de material plástico PVC.

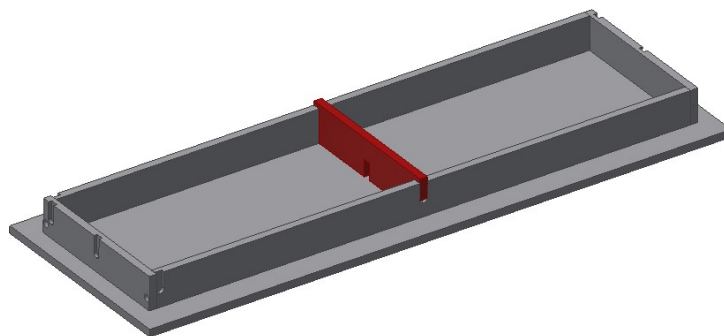


Figura 5.18. Molde disponible en el laboratorio.

En la siguiente imagen (figura 5.19) se muestran las medias interiores de los alojamientos elegidos para la fabricación de las probetas. La profundidad del molde es de 40 mm, tal como se ha mencionado con anterioridad.

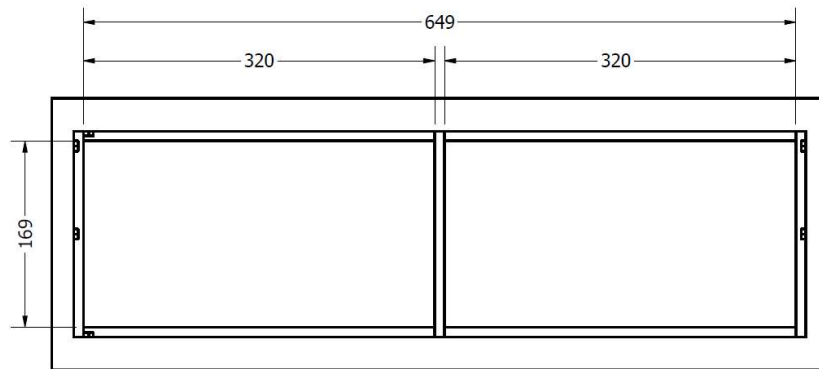


Figura 5.19. Medidas de los alojamientos interiores del molde (cotas en mm).

En este caso, el molde debería permitir que las probetas puedan fraguar con la T embebida. Por esta razón se decidió sustituir uno de los lados más largos por una nueva pieza con un diseño que así lo permitiera, fabricada en el mismo material que el resto del molde. La T queda en ambas cavidades se dispone de tal forma que quede centrada en las probetas. El diseño de este nuevo larguero queda recogido en el ANEXO 1.

En la figura 5.20 se muestran las T preposicionadas en las cavidades del molde usado.

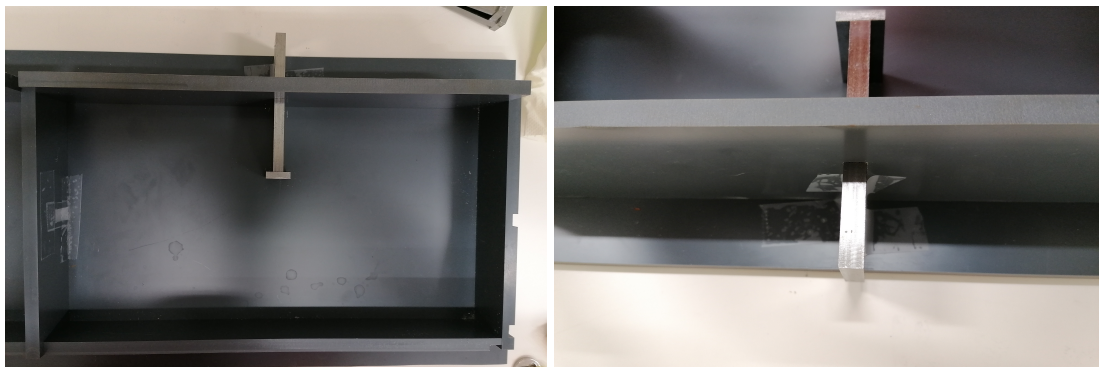


Figura 5.20. Imágenes de muestra de una T alojada en la nueva pieza del molde.

Se decidió fabricar cuatro unidades de cada T completa, para permitir el ensayo de 4 probetas en la misma sesión y facilitar el ritmo de los ensayos.

5.3.3. Fabricación de las probetas

En este trabajo, se ha comprobado el comportamiento en modo II para tres tipos de probetas prismáticas de dimensiones 320x170x40 mm, con las siguientes especificaciones:

- Probeta Y0: yeso sin fibras

- Probeta Y1: yeso con fibras de polipropileno en una proporción de 10kg/m^3
- Probeta Y2: yeso con fibras de NFU en una proporción de 10kg/m^3

Se eligieron mezclas con esta proporción en base a estudios realizados con anterioridad por el Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera de la Universidad de Jaén [59], donde se inició el estudio de este tipo de material con una proporción algo menor.

A la hora de realizar las probetas, el molde elegido permitía la fabricación y curado de dos probetas al mismo tiempo. Por tanto, se fabricaron dos probetas de tipo Y0, una probeta de tipo Y1 y una probeta de tipo Y2.

Fue necesario la aplicación de un desmoldante de tipo aceite mineral indicados para tareas de desenfrado simples. El componente elegido fue un combustible fósil usado en automóviles convencionales tipo diésel (figura 2.21), que fue aplicado mediante brocha sobre las paredes, las aristas y esquinas del molde para facilitar el desmoldado posterior de las probetas, evitando daños en las mismas por desprendimiento de material.



Figura 5.21. Desmoldante y brocha.

Se realizó una preparación previa del molde, colocando las T a la altura correcta en función de la geometría definida. Las T fueron posicionadas mediante cinta adhesiva al molde (figura 5.22), de tal forma que permanecieran lo más perpendiculares posibles a la probeta, evitando en la medida de lo posible su movimiento durante el vertido de la mezcla al molde.

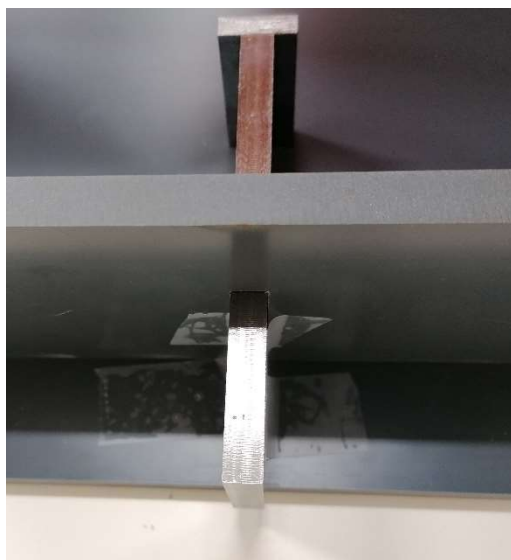


Figura 5.22. Detalle de la cinta adhesiva usada para posicionar una T.

Además, se taparon los huecos del molde con cinta adhesiva para adecuarlo a la geometría necesaria para la fabricación de las probetas (detalle en la figura 5.23). Fue suficiente con esto para evitar la mezcla entre las dos cavidades.



Figura 5.23. Sellado de ranuras del molde con cinta adhesiva.

Durante el proceso de fabricación de las probetas de yeso se siguieron los pasos indicados en la norma [60]. En el caso de las probetas con polipropileno y partes de NFU, se incluyeron algunas modificaciones para la correcta inclusión de las fibras en la mezcla. Para ello se siguieron, en parte, los pasos descritos en el artículo de SUÁREZ, F., et al. [59], explicados a continuación de forma más extensa:

1. Vertido del yeso en agua y amasado manual con paleta durante 40 segundos.

2. Adición completa de las fibras correspondientes y amasado manual con paleta durante 20 segundos, con el fin de mojarlas por completo en la mezcla.
3. Amasado a baja velocidad en amasadora con movimiento planetario durante 60 segundos. Esto es suficiente para que se repartan de forma homogénea las fibras en toda la mezcla.
4. Vertido de la mezcla en el molde, previa aplicación del desmoldante.
5. Aplicación de golpes sobre el molde, con el objetivo de hacer salir posibles burbujas retenidas en la mezcla.
6. Enrasado de la probeta, en la medida de lo posible, puesto que las fibras dificultan un poco esta tarea.
7. Esperar al menos dos horas a que la pasta haya fraguado y efectuar el proceso de desmoldado con ayuda de un martillo, dando golpes suaves al molde.

No superar en ningún caso el tiempo de 10 minutos desde el momento de mezclado para completar el enrasado de la probeta, puesto que el proceso químico de fraguado empieza en cuanto se añade el yeso al agua, siendo importante trabajar la mezcla lo más rápido posible.

En este caso, al realizar dos probetas cada vez, hubo que esperar al fraguado de ambas para desmoldarlas. Además, hubo que tener en cuenta que las piezas del molde estaban atornilladas entre sí y a la base a la hora de proceder al desmoldado.

En la imagen siguiente se muestra un detalle del proceso de fabricación de las probetas ensayadas (figura 5.24).



Figura 5.24. Detalle del molde con una cavidad ocupada por una probeta de yeso con fibras de polipropileno fraguando y la otra cavidad vacía.

Una vez que se desmoldaron las 4 probetas, se mantuvieron en la cámara de curado durante siete días a $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ y a una humedad relativa de $50\pm 5\%$, tal como se indica en la norma [60].

En este caso, las probetas no fueron curadas en estufa y se admitió como suficiente el haber estado dos meses en la cámara climática apagada (condiciones a temperatura ambiente) para un secado suficiente de las probetas.

5.3.4. Diseño y fabricación del dispositivo de agarre de la probeta

Uno de los puntos en los que más se trabajó de este proyecto fue el diseño del dispositivo de agarre de la probeta. Al ser la primera vez que se hacían estos ensayos, no estaban definidos los detalles geométricos del agarre de la probeta, por lo que hubo que definirlo completamente la geometría para el ensayo de pull-out.

A lo largo del desarrollo de este trabajo se propusieron varias alternativas para solucionar esta cuestión. Estas se exponen en orden cronológico, explicando cada una de ellas de forma individual y alegando los motivos por los que se decidió no seguir adelante con ella. Finalmente, de entre las propuestas, se opta por una de ellas y se explican los motivos de su elección.

5.3.4.1. Criterios de diseño

Como se ha mencionado anteriormente, los ensayos fueron realizados en una máquina bicolonna, por tanto, para el diseño del sistema cogida se tuvo que tener en cuenta tanto el agarre de la T o agarre superior, como el agarre de la probeta o inferior. Más abajo se muestra una imagen indicando la posición de los dispositivos de acople para la herramienta o útiles de la máquina (figura 5.25).

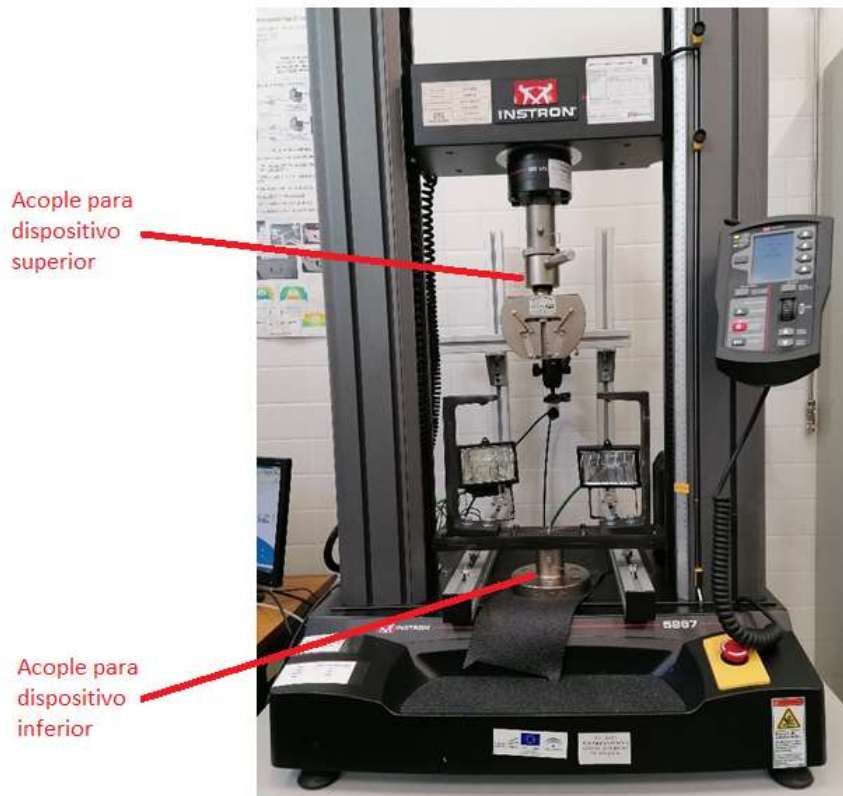


Figura 5.25. Acoples para útiles superior e inferior de la máquina.

En este caso, se contaba con varias mordazas válidas para el agarre superior. En la imagen 5.26 se muestran dos ejemplos útil mordazas disponibles y la forma en la que agarraban la T.

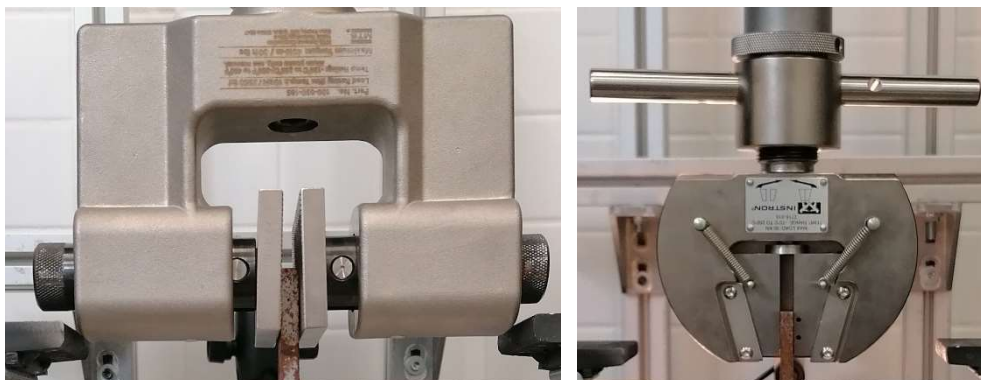


Figura 5.26. Ejemplos de las mordazas disponibles y forma de agarre de la T

5.3.4.2. Agarre inferior. Etapas durante el diseño

Para el agarre inferior se tuvieron en cuenta las geometrías propuestas por la bibliografía consultada, recogidas en la imagen 5.7 al inicio de este apartado. Siguiendo esas pautas y teniendo en cuenta las dimensiones de nuestra probeta, se dispuso un diseño inicial de la configuración de agarres inferiores en base a la geometría inicial pensada (figura 5.17) y que quedó como la que se muestra en la figura 5.27.

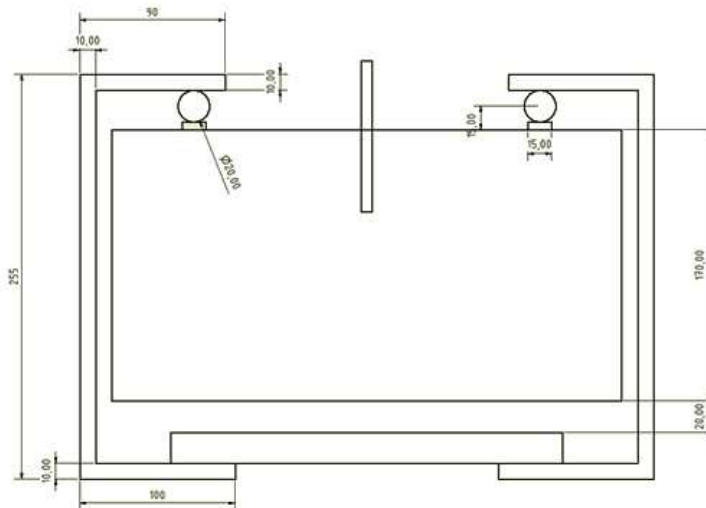


Figura 5.27. Geometría planteada para los agarres inferiores (cotas en mm).

En este primer boceto se utilizaron las medidas reales que iba a tener la probeta, respetando en todo caso las distancias entre los extremos de la T y los rodillos de apoyo. Una vez planteado comenzaba el reto real de diseño.

En una primera instancia se plantearon dos agarres laterales en forma de C para la cogida de la probeta como tres placas atornilladas entre sí y dos rodillos para la aplicación de la fuerza de forma transversal a ambos lados de la T. En la imagen de la figura 5.28 se muestra un boceto en 3D del diseño planteado.

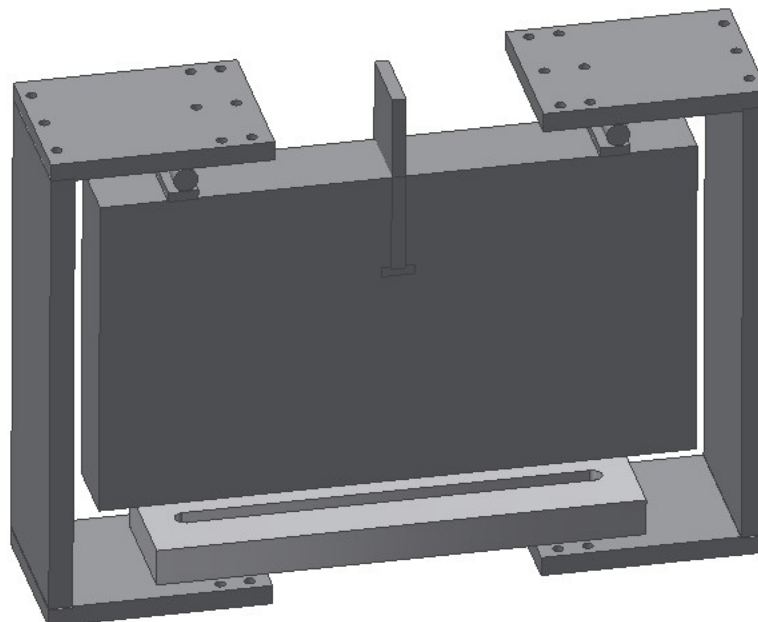


Figura 5.28. Boceto 1. Diseño de agarres en forma de C.

La pieza inferior (más clara) sobre la que se amarraban estas dos C, formaba parte del material existente laboratorio. Se trata de una pieza de aluminio con una ranura

longitudinal con la que se ha trabajado anteriormente en otros ensayos realizados. Esta pieza fue fabricada para poder ser acoplada a la máquina de ensayo bicolumna.

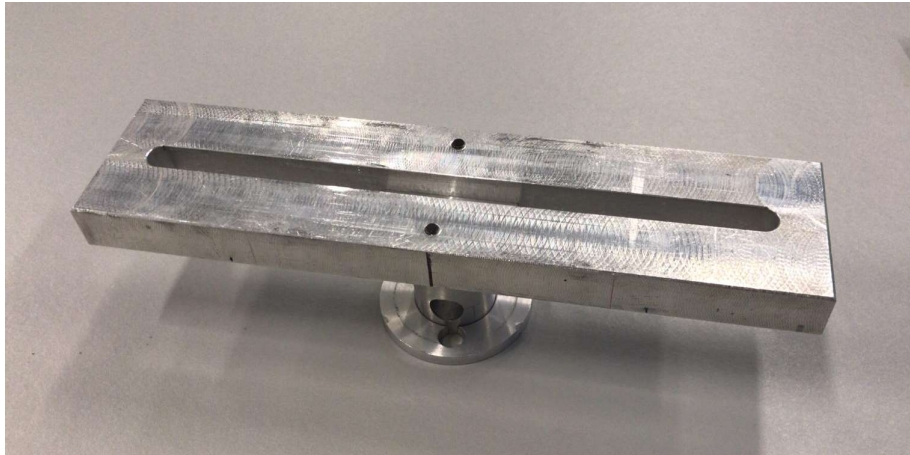


Figura 5.29. Útil auxiliar inferior de aluminio para la máquina bicolumna.

Sobre el modelo, se realizaron algunos cálculos aproximados mediante un software de simulación para comprobar que los esfuerzos introducidos en los agarres laterales en forma de ce (a partir de ahora denominadas Ces, Cs o simplemente C), no sobrepasaban el límite elástico del material elegido para su fabricación (acero al carbono) en puntos críticos como la unión entre las placas o los extremos en voladizo de las placas más cortas. Debido a que el acero es un material mucho más rígido que el yeso, con o sin fibras, usado en estos ensayos, en ningún caso se han considerado las deformaciones acontecidas en el acero puesto que serán claramente menores que las propias en el material de la probeta.

Se llegó a la conclusión de que era necesario un refuerzo extra a modo de cartelas para evitar un colapso de la estructura durante la prueba. Decir que siempre se ha trabajado con la carga máxima expuesta con anterioridad en este trabajo.

Tras varias discusiones, se decidió añadir dos largueros laterales que protegieran la estructura del fenómeno de pandeo a la que podría verse sometida. En la imagen 5.30 se muestran un boceto de estos largueros que se atornillarían a las Ces representados como las dos piezas alargadas en color gris oscuro. Estos largueros también están representados en la figura 5.31 para mayor claridad de la geometría.

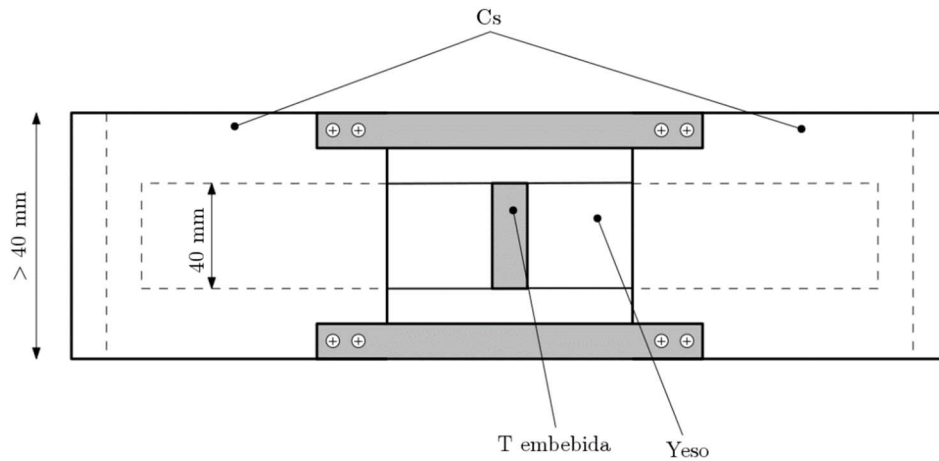


Figura 5.30. Boceto de la configuración con largueros laterales de refuerzo.

Tras este nuevo añadido, se decidió volver a realizar simulaciones aplicando esta nueva condición de contorno. Se descubrió que estas nuevas placas apenas aportaban rigidez a la estructura o puntos críticos, pues no reforzaban la zona de unión entre las placas.

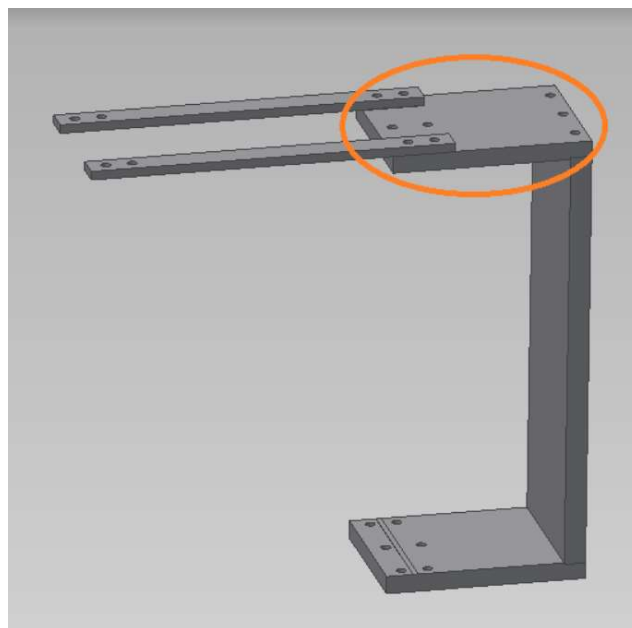


Figura 5.31. Detalle de los refuerzos longitudinales de unión.

Tras comprobar que las chapas horizontales tampoco servían como refuerzo superior, pues se seguía superando el límite elástico, se probó a añadir dos escuadras laterales en ambos lados de la C, además de aumentar el espesor de todas las piezas. A continuación, se volvió a simular observando el comportamiento de la tensión de Von Mises, parámetro de referencia para comprobar el límite elástico del material. Se simuló como un conjunto soldado con ayuda del paquete de simulación incluido en el programa de diseño mecánico Inventor. Los modelos que se obtuvieron fueron los siguientes (figura 5.32).

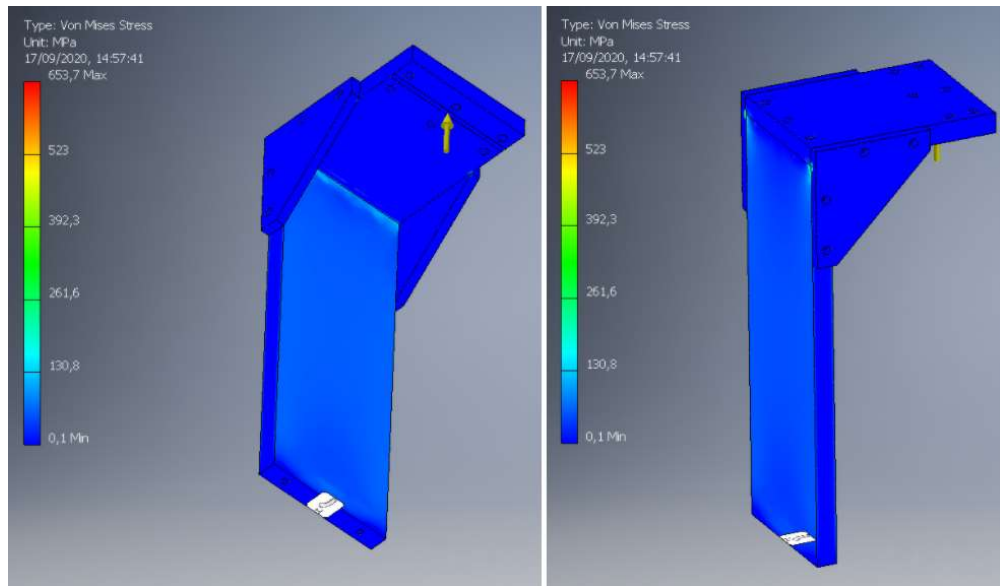


Figura 5.32. Ejemplo de simulación sobre uno de los diseños propuestos.

Para la simulación se consideraron las siguientes entradas:

- Condiciones de contorno de empotramiento en la zona inferior del conjunto.
- Todas las piezas son de material acero al carbono con un módulo de elasticidad de 350 Mpa.
- Todas las piezas se consideran soldadas entre ellas, añadiendo al modelo las pertinentes restricciones.
- La carga aplicada fue de 4 kN. Indicada como una flecha con la dirección de la carga en la figura 5.32

Aunque los datos mostrados por el programa indicaban concentraciones de tensiones en algunos puntos de la estructura, se dieron por válidos los resultados obtenidos, puesto que se reducían las tensiones en la zona de unión de las placas de las Ces. Para realizar la unión de las Ces a la pieza de la figura 5.29 bastaría con mecanizar unos agujeros sobre las chapas de la C para realizar una unión mediante tornillería. En la figura 5.33 se muestran los orificios pensados para realizar esta unión.

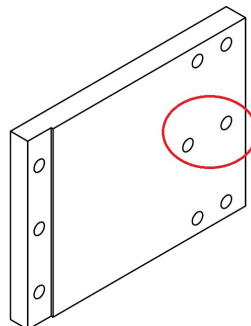


Figura 5.33. Alojamiento pensados para realizar la unión atornillada sobre la pieza disponible en los laboratorios.

5.3.4.3. Agarre inferior. Diseño final

Tras comprobar que las chapas horizontales tampoco servían como refuerzo superior, pues se seguía superando el límite elástico, se probó a añadir dos escuadras laterales en ambos lados de la C, además de aumentar el espesor de todas las piezas. A continuación, se volvió a simular observando el comportamiento de la tensión de Von Mises, parámetro de referencia para comprobar el límite elástico del material. Se simuló como un conjunto soldado. Los modelos que se obtuvieron fueron los siguientes (figura 5.32).

A pesar de que las conclusiones y resultados alcanzados durante la fase de diseño eran óptimos para iniciar la fabricación de los agarres, los medios disponibles para la puesta en marcha de estos bocetos no nos permitían una ejecución en tiempo y forma para cumplir los plazos de entrega. El mayor impedimento radicaba en los mecanizados de las placas que componían las Ces, al no contar con la herramienta necesaria para llevar a cabo estos trabajos de forma sencilla, el proceso podría alargarse mucho más de lo esperado.

A partir de aquí las opciones se reducían y no quedaba claro hasta qué punto se podrían fabricar piezas complejas y con demasiados requerimientos máquina para su mecanizado. Se hacía necesario replantear la fabricación de estas piezas.

Se decidió empezar a buscar perfiles de acero estructural empleados en construcción que cumplieran en menor o mayor medida las necesidades geométricas requeridas para estos ensayos. Inicialmente, se plantearon dos opciones de perfil estructural el UPN y el UAP, por su similitud en forma con el dispositivo de agarres en C hasta ahora planteados. Ambos fabricados en acero con distintas proporciones de contenido en carbono, con buenas prestaciones mecánicas.

UPN y UAP son los nombres usados para definir perfiles estructurales estandarizados dimensionalmente de acuerdo con la norma EN 10365 [61], con tolerancias de fabricación establecidas en la norma EN 10279 [62]. Este tipo de perfiles, son conocidos como en U de alas inclinadas (UPN) y en U de alas rectas (UAP), ambos recogidos en la figura 5.34.

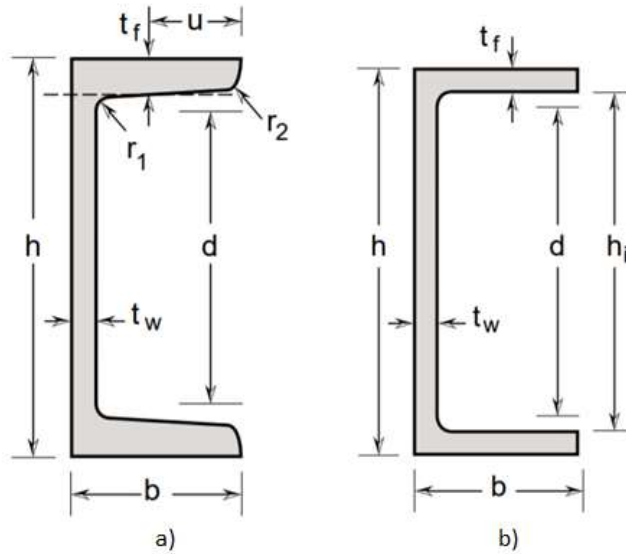


Figura 5.34. Perfiles planteados a) perfil UPN y b) perfil UAP

El perfil UPN es más común en la industria, por lo que se decidió usar este. Teniendo en cuenta las dimensiones de las probetas de ensayo y que los puntos de aplicación de la carga debían estar a 100 mm desde el final de la T, tal como se ha expuesto anteriormente, no cualquier perfil era válido. A continuación, se muestran una tabla con indicaciones del perfil mínimo necesario, para realizar los agarres.

PERFIL	DIMENSIONES								SUPERFICIE		
	G kg/m	h mm	b mm	t _w mm	t _f mm	r ₁ mm	r ₂ mm	A cm ²	d mm	A _L m ² /m	A _C m ² /t
UPN 100	10,6	100	50	6	8,5	8,5	4,5	13,5	64	0,372	35,1
UPN 120	13,4	120	55	7	9	9	4,5	17	82	0,434	32,52
UPN 140	16	140	60	7	10	10	5	20,4	98	0,489	30,54
UPN 160	18,8	160	65	7,5	10,5	10,5	5,5	24	115	0,546	28,98
UPN 180	22	180	70	8	11	11	5,5	28	133	0,611	27,8
UPN 200	25,3	200	75	8,5	11,5	11,5	6	32,2	151	0,661	26,15
UPN 220	29,4	220	80	9	12,5	12,5	6,5	37,4	167	0,718	24,46
UPN 240	33,2	240	85	9,5	13	13	6,5	42,3	184	0,775	23,34
UPN 260	37,9	260	90	10	14	14	7	48,3	200	0,834	22
UPN 280	41,8	280	95	10	15	15	7,5	53,3	216	0,89	21,27
UPN 300	46,2	300	100	10	16	16	8	58,8	232	0,95	20,58
UPN 320	59,5	320	100	14	17,5	17,5	8,75	75,8	246	0,982	16,5
UPN 350	60,6	350	100	14	16	16	8	77,3	282	1,047	17,25
UPN 380	63,1	380	102	13,5	16	16	8	80,4	313	1,11	17,59
UPN 400	71,8	400	110	14	18	18	9	91,5	324	1,182	16,46

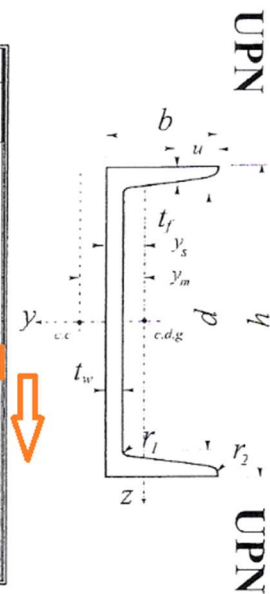


Figura 5.35. Tamaño mínimo del perfil a elegir.

Estos perfiles, normalmente comercializados en vigas de 6 o 12 metros, fueron cortados en dos tramos o rodajas de 6 cm de ancho de un perfil UPN 240. En la figura 5.36 se muestra una imagen del tocho del que se extrajeron estas rodajas.



Figura 5.36. Imagen de un perfil UPN 240.

Respetando las medidas del ensayo, se soldaron dos barras cuadradas sobre las alas de los perfiles UPN sobre las que se pudieran apoyar los rodillos que se usarían para aplicar la carga sobre la probeta, puesto que tenían una cierta inclinación característica de su geometría. Se muestra un detalle de este procedimiento en la figura 5.37.

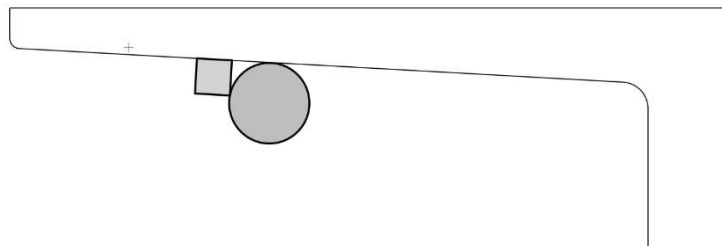


Figura 5.37. Detalle de la posición de un rodillo sobre la barra soldada al perfil UPN. Croquis.

Los rodillos usados fueron unos de aluminio de 10 mm de diámetro y 60 mm de longitud disponibles en los laboratorios, se varió la medida respecto al diseño inicial, dado que este parámetro no era decisivo, sino más bien el punto donde se aplicaría la carga. La siguiente figura muestra las medidas que se calcularon para realizar la soldadura del perfil manteniendo las distancias entre los extremos de la T y los puntos de aplicación de la fuerza elegidas para los ensayos.

Finalmente, tras la adecuación de todas las pautas indicadas se ensamblaron todas las partes disponibles y con la incorporación de algunas mejoras se consiguió fabricar el conjunto de agarres mostrado en la imagen 5.38. Durante el proceso de fabricación y ensamblaje del útil de agarre, se intentaron mantener en la medida de lo posible las dimensiones elegidas durante el diseño del ensayo, si bien es cierto que variaron un poco.

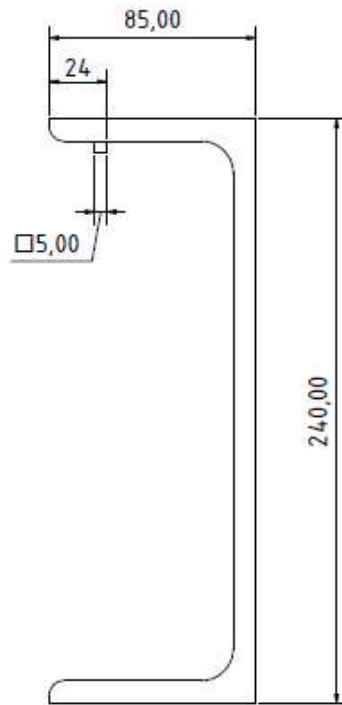


Figura 5.38. Medidas facilitadas para realizar la soldadura de las barras cuadradas (cotas en mm).

Se puede observar que la base de aluminio inicialmente propuesta no pudo ser usada debido a que no tenía longitud suficiente para abarcar la amplitud de las probetas. Por esta razón, se fabricó un nuevo útil al que anclar los perfiles UPN y poder acoplarlo a la máquina correctamente compuesto de dos placas de acero unidas mediante tornillería y reforzadas con perfil cuadrado de acero soldado. Se muestran detalles de los útiles en las figuras 5.39 y 5.40.

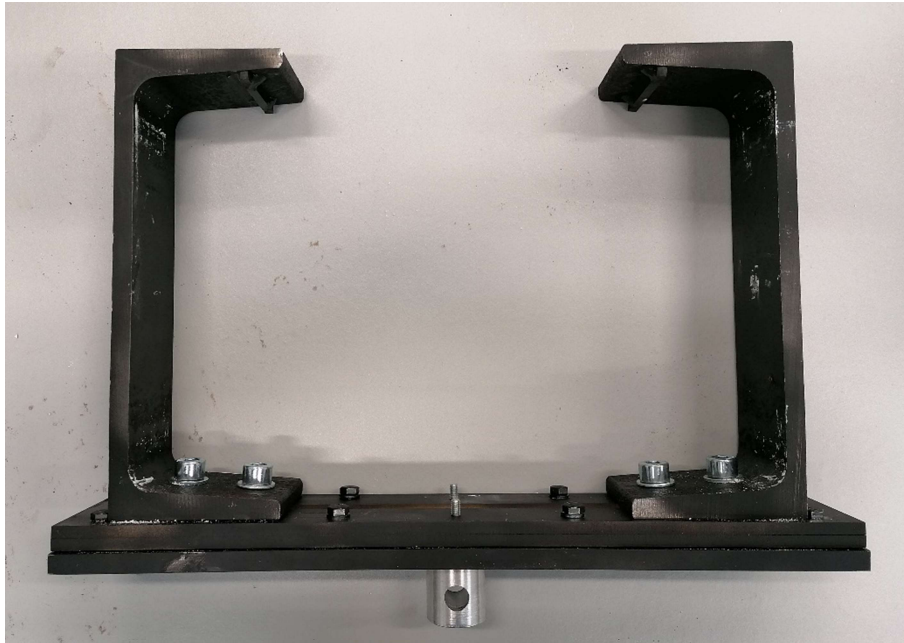


Figura 5.39. Conjunto de agarres usados en este trabajo.

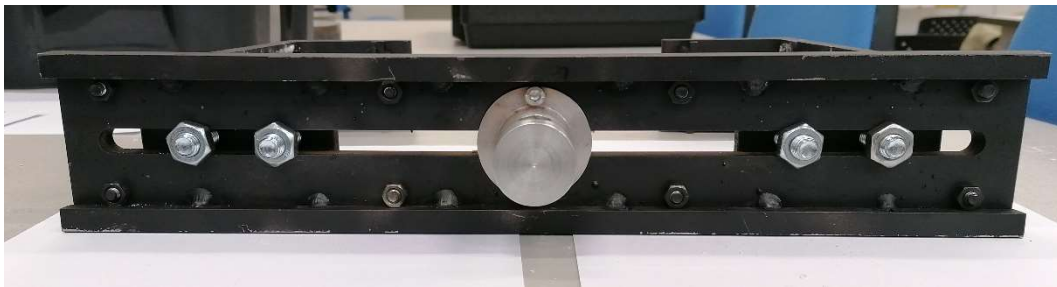


Figura 5.40. Detalle de las nuevas placas de acero fabricadas para estos ensayos. Se observan los puntos de soldadura de los perfiles cuadrados.

5.3.5. Metodología para el procesado mediante (DIC)

La técnica DIC consiste en capturar con una cámara imágenes del objeto o la estructura que se quiera estudiar, de tal manera que se tenga una fotografía del estado cero o imagen de referencia y tantas como situaciones se quieran comparar (imágenes deformadas) [63]. Posteriormente se aplican algoritmos de correlación de imágenes a través del software apropiado para medir los desplazamientos en la superficie de la probeta.

Esta técnica es uno de los métodos ópticos más utilizados en mecánica experimental debido a su versatilidad, el constante descenso del precio de las cámaras o los equipos informáticos o la aparente facilidad para aplicarla. Su rango de aplicación abarca “todo lo que quepa en una foto”: desde fachadas de edificios hasta elementos de escala milimétrica.

Existen dos versiones para este método, en función de la cantidad cámaras que tomen las imágenes. Una versión 2D con una sola cámara enfocada perpendicularmente a la

superficie de ensayo y otra versión 3D con dos cámaras o más. Mientras que la correlación de imágenes 3D permite obtener deformaciones en las tres dimensiones, la 2D solo permite obtener datos de las deformaciones y desplazamientos ocurridos en el plano de trabajo.

Debido a que los requerimientos de sincronización, triangulación y calibración de montaje son más exigentes, la sensibilidad y precisión alcanzadas con 3D-DIC son algo menores que para la técnica 2D [63]. Además, en el caso de la técnica 3D, el desplazamiento debe ocurrir dentro de la profundidad de campo de ambas lentes usadas, lo que podrían estar restringido a la profundidad de campo de una sola cámara. Además, aunque ambas técnicas pueden ser aplicadas en la dinámica, en el caso del 3D es extremadamente importante sincronizar ambas cámaras para que ambas imágenes y la misma área puedan ser capturadas exactamente en el mismo instante desde dos puntos de vista diferentes [64].

En cuanto a la superficie de la probeta, debe tener un patrón aleatorio con un alto contraste conocido como “patrón de speckle” o patrón de puntos. Normalmente se aplica a mano una capa de pintura en espray blanca con manchas negras. A veces, la superficie no necesita preparación si la propia textura del material posee el contraste necesario y suficiente. En la figura 5.41 se muestra un patrón speckle para una superficie donde se realizó un estudio con 3D-DIC.



Figura 5.41. Patrón de puntos o speckle [65].

Para calcular los desplazamientos, primero se selecciona una región de interés sobre la imagen. Esta región se divide en ventanas o facetas como sea necesario (teniendo en cuenta el grado de precisión que se busque y también del patrón de speckle que se tenga). Estas pequeñas agrupaciones cuadradas o circulares de píxeles, pueden tener un solape entre ellas o no. El algoritmo de correlación buscará, para cada faceta, su posición en las sucesivas imágenes, partiendo siempre de la posición inicial. Los algoritmos pueden

considerar, no solo traslaciones de la faceta sino también posibles giros o distorsiones. El resultado final, asociará a cada centro de faceta un valor de desplazamiento medido. Cuantas más facetas, y más solape entre ellas, mayor definición espacial e los resultados se obtendrá.

Es importante que la colocación de la cámara sea perpendicular a la superficie de ensayo, tal como se muestra en la imagen 5.42, donde Z es la distancia de la cámara a la superficie de ensayo y w es el vector normal a la superficie de ensayo.

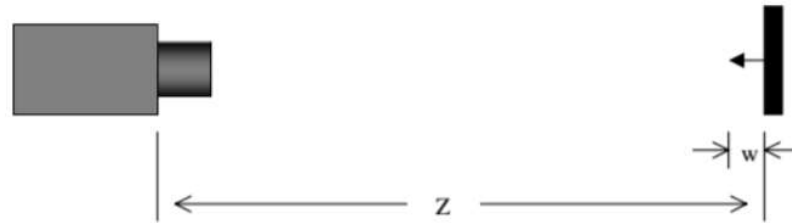


Figura 5.42. Enfoque de la cámara perpendicular a la superficie [66].

Destacan en esta técnica algunas ventajas que la hacen óptima para su uso en diferentes aplicaciones, en comparación con otros métodos ópticos de medición de deformaciones y desplazamientos:

- No requiere condiciones especiales de iluminación, si bien es cierto que a veces se utilizan fuentes de luz externas para mantener las condiciones de los ensayos lo más parecidas posibles unas a otras.
- Es versátil, pudiendo aplicarse a diferentes problemas, no invasiva y llega a tener 0.01 pixel de precisión para la medida de desplazamientos y 0.01% para la medida de deformaciones.
- Los algoritmos que implementa la técnica tienen bajos requerimientos computacionales, pudiendo incluso realizarse el análisis en tiempo real.
- Se trata de una técnica no destructiva.

Esta técnica no será capaz de coger información de las zonas donde la superficie presente roturas, pues no haya material [67]. Además, existen posibles complicaciones de procesamiento de datos derivadas de la captura de imágenes como posibles sombras, iluminaciones, un speckle insuficiente o con poco contraste, entre otras.

El proceso de análisis de los datos a partir de la técnica de correlación digital de consta de tres etapas principales:

- Generación de un patrón de moteado aleatorio o speckle.
- Toma de imágenes a lo largo del ensayo a una velocidad de adquisición de 1 imagen por segundo para las tres probetas ensayadas.

- Procesado de las imágenes mediante el software NCORR.

Se utilizó el software NCORR, una herramienta de procesamiento del entorno MATLAB usada por otros investigadores por tratarse de un sistema de código abierto para el procesamiento de datos de 2D-DIC [68]. El algoritmo DIC usado en este trabajo ha sido elaborado por Blaber et al. [69]. Las imágenes obtenidas fueron importadas a MATLAB para ser procesadas y para realizar la correlación digital de las imágenes.

Para la realización del patrón speckle sobre las probetas de yeso, únicamente fue necesario aplicar un moteado aleatorio en color negro mediante pintura en spray con base acrílica, a modo de contraste, puesto que las probetas tienen un color natural blanco. Se aplicó con el spray mostrado en la figura 5.43.



Figura 5.43. Pintura en spray con base acrílica usada.

Las imágenes obtenidas a través de la cámara, son tomadas a 180° respecto a la posición vista de la zona de ensayo, es decir, están boca abajo. Este hecho, que no afecta al procesamiento ni a la veracidad de los datos obtenidos, se subsanó girando todas las imágenes adquiridas para una mejor interpretación de los resultados.

5.3.6. Preparación de las probetas para el ensayo de pull-out.

Para la preparación de las probetas para el ensayo, primero se aplicó el patrón speckle sobre la superficie a estudiar. Puesto que se disponía de dos superficies aptas para la toma de imágenes, se decidió administrar la pintura en spray sobre la cara de la probeta que tuviera menos imperfecciones. En la figura 5.44 se muestra una probeta con el patrón de contraste aplicado. Las manchas de color marrón oscuro que se ven en la imagen, son debidas a un proceso de oxidación que tuvo lugar alrededor de la T de acero

durante el fraguado del yeso. Se comprobó que eran manchas superficiales que no afectaban de forma relevante a los resultados obtenidos.



Figura 5.44. Patrón speckle aplicado a una probeta.

A continuación, se usó un punzón o raspador para retirar el material de la superficie de estudio que se había depositado sobre las Tes (figura 5.45). Se pretendía que las imágenes tomadas mediante DIC aportaran la mayor cantidad de información posible sobre la rotura de la probeta en la zona cercana a T.

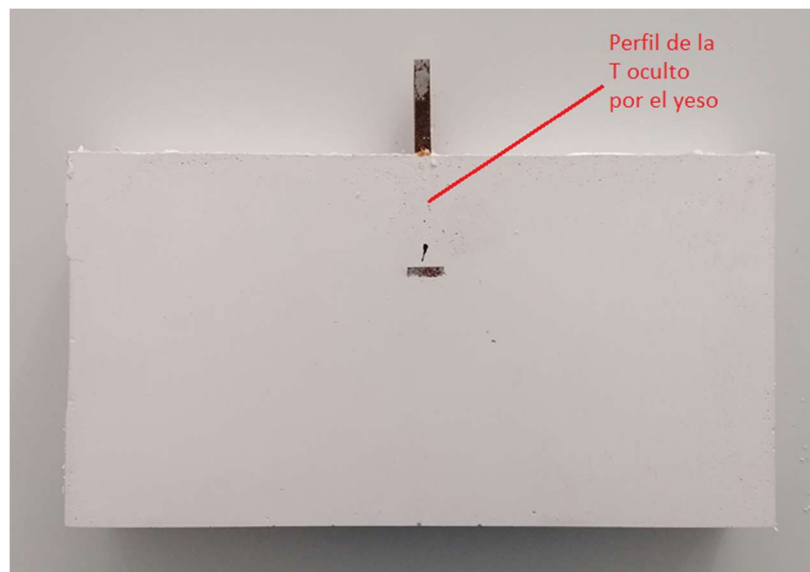


Figura 5.45. Detalle de T semioculta por el yeso.

No fue necesario modificar de ningún modo la geometría global de las probetas fabricadas para este ensayo.

5.3.7. Ensayo de pull-out para estudio de fractura en modo II

Una vez preparadas las probetas para el ensayo, se procede al mismo. Para ello es necesario tener en cuenta tanto el software de la máquina Instron como el software de adquisición de imágenes de la cámara deben estar sincronizados. En la figura 5.46 se muestra la disposición de los elementos principales para realizar el ensayo.



Figura 5.46. Conjunto de la máquina Instron y el sistema DIC.

Esta sincronización se consigue a través del programa que contiene el equipo de la máquina Instron que está conectado físicamente a la cámara tal como se describe a continuación: la máquina permite emitir una señal digital en formato 0-5V en función de los datos programados en el método de ensayo. Esta señal, conectada al sistema de entradas digitales de la cámara, se empleó para sincronizar la captura de imágenes. En concreto, la cámara está configurada para que capture imágenes a una tasa de 1 fps mientras que el pulso este activado (5v). Así, la máquina, cuando comience el ensayo, activará la señal de 5v hasta que éste finalice. Resumiendo, el programa realiza tres fases:

1. Se lanza una señal de apagado al sistema DIC.
2. Se lanza una señal de encendido al sistema DIC.
3. El ensayo comienza y se empiezan a tomar imágenes.

La velocidad del ensayo es de 1mm/min hasta llegar a 10 mm de desplazamiento vertical, cuando acaba. Mientras tanto, la cámara rápida toma imágenes del proceso con una frecuencia de una imagen por segundo hasta que finaliza el ensayo. Además, el programa de la máquina cuenta con una función de tara tanto para la carga como para el desplazamiento. Detalle de la interfaz en la figura 5.47.

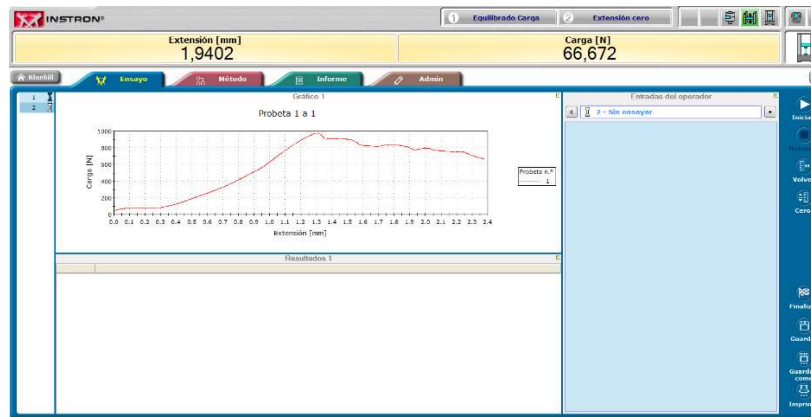


Figura 5.47. Captura del software de la máquina, donde se aprecia los datos de extensión y carga.

A la hora de posicionar las probetas sobre la máquina, son necesarias dos personas para la preparación de este ensayo. En primer lugar, la probeta se debe preposicionar dentro del útil inferior y, mientras una persona la sostiene, la otra se encarga del cierre de la mordaza del agarre superior sobre el extremo saliente de la T (figura 5.48).

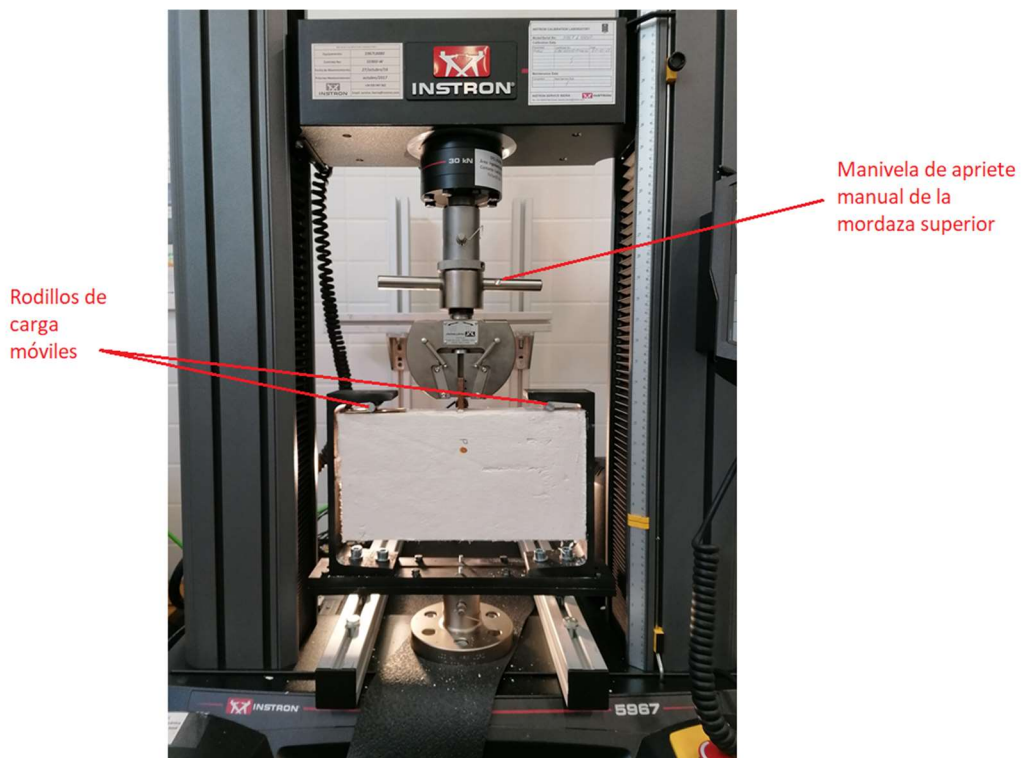


Figura 5.48. Disposición de la probeta para el ensayo de pull-out.

En este momento se debía tarar la máquina en fuerza para que no se tuviera en cuenta el peso de la probeta de cara al dato de carga aplicada. Una vez puesta a cero, se procedió a elevar la probeta hasta preposicionar los rodillos de carga móviles, en la posición que se mostradas en las figuras 5.48 y 5.49. Este ajuste se realiza con ayuda del panel de control manual de la máquina (figura 5.50).



Figura 5.49. Detalle de posición de un rodillo de distribución de carga.



Figura 5.50. Panel de control manual de la máquina.

Una vez posicionados los rodillos de aplicación de la fuerza y aplicada una mínima precarga a la probeta de 4 kilos (esta vez no hay que tarar), se procede al inicio del ensayo. En este momento, nos encontramos con un problema derivado de que una de las mordazas de agarre no realizaba un buen agarre de la T (figura 5.51). Esto provocó que durante el ensayo la probeta se escurriera, dando por inválida la prueba.

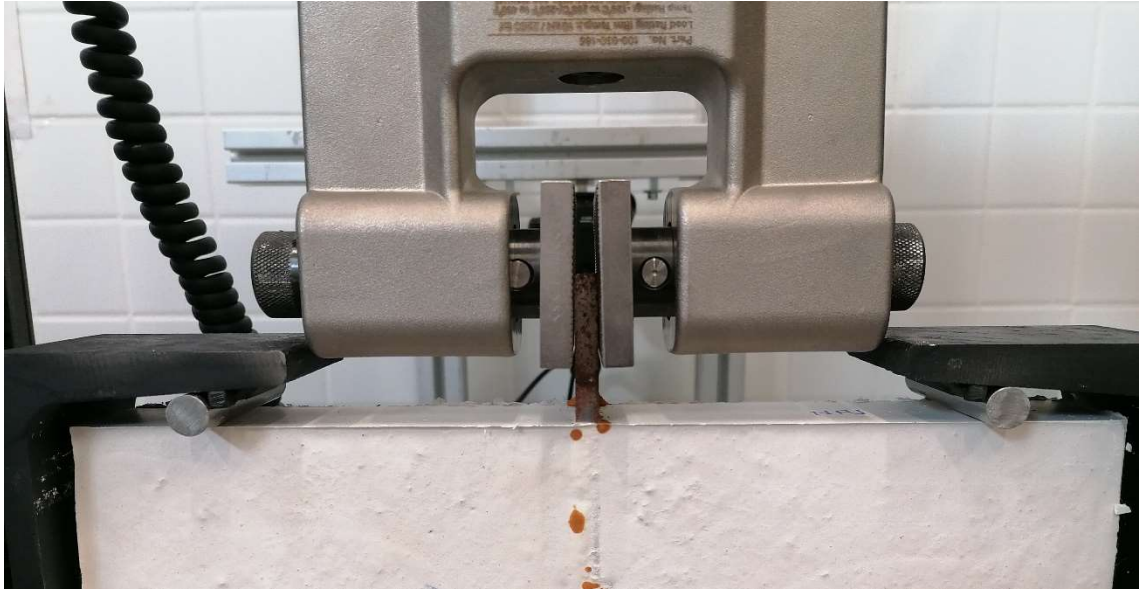


Figura 5.51. Imagen de una de las mordazas disponibles haciendo una cogida insuficiente de la T.

Durante la realización de este primer ensayo, el software de la máquina comenzó repentinamente a tener una pérdida de carga, motivada por un deslizamiento entre la mordaza y la T metálica. En este momento se paró el ensayo sin que la probeta sufriera ningún daño o se generara ninguna grieta. Esta pérdida de carga repentina se aprecia en la figura 5.522, donde se ve como la gráfica sigue un comportamiento errático después de llegar a un máximo de carga de aproximadamente 1000 Newton, un hecho imposible de relacionar con un fenómeno de fractura lineal elástica en materiales.

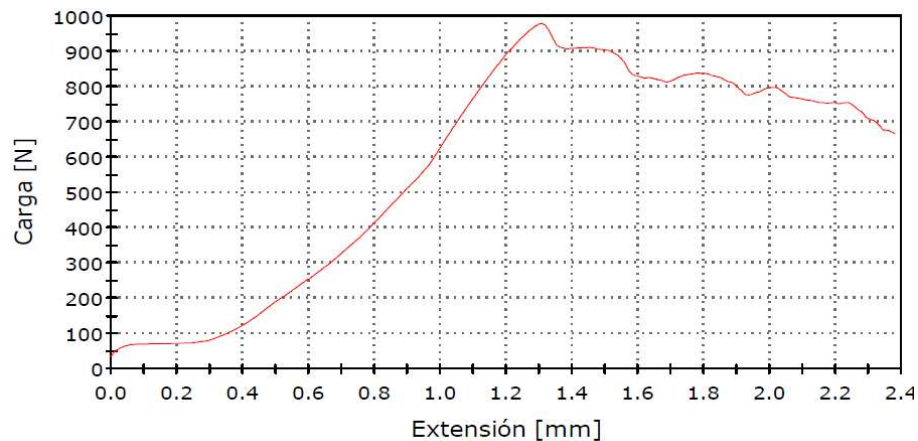


Figura 5.52. Gráfica carga-desplazamiento durante el ensayo por fallo de agarre en la mordaza superior.

En este momento se decidió sustituir la mordaza por otra disponible, que tuvo un funcionamiento óptimo durante todos los ensayos.

Es importante que los dos rodillos apliquen la carga de forma equilibrada a la probeta. Durante la realización de las probetas, una de ellas fraguó con la T un poco inclinada

respecto a la vertical, por esta razón, se tuvo que calzar uno de los rodillos durante uno de los ensayos de pull-out, mediante galgas de latón (figura 5.53).

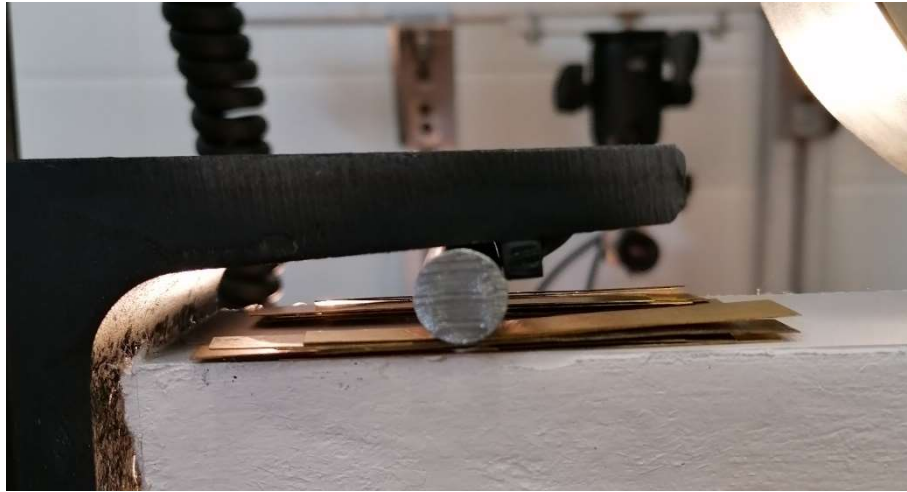


Figura 5.53. Detalle de rodillo con galgas de ajuste.

Solventados los problemas encontrados durante los ensayos de pull-out, se obtuvieron resultados dentro de lo esperado y que guardaban relación en forma con los usados como base para la realización de la configuración de ensayo.

El objetivo principal de estos ensayos ha sido la obtención de la gráfica carga-desplazamiento, la fuerza máxima de rotura en modo II de los materiales y la obtención de un patrón de desplazamiento de grieta, por la acción de cargas de tracción sobre un perno embebido en la muestra de ensayo. Uno de los patrones de grieta conseguidos se muestra en la imagen de ejemplo 5.54

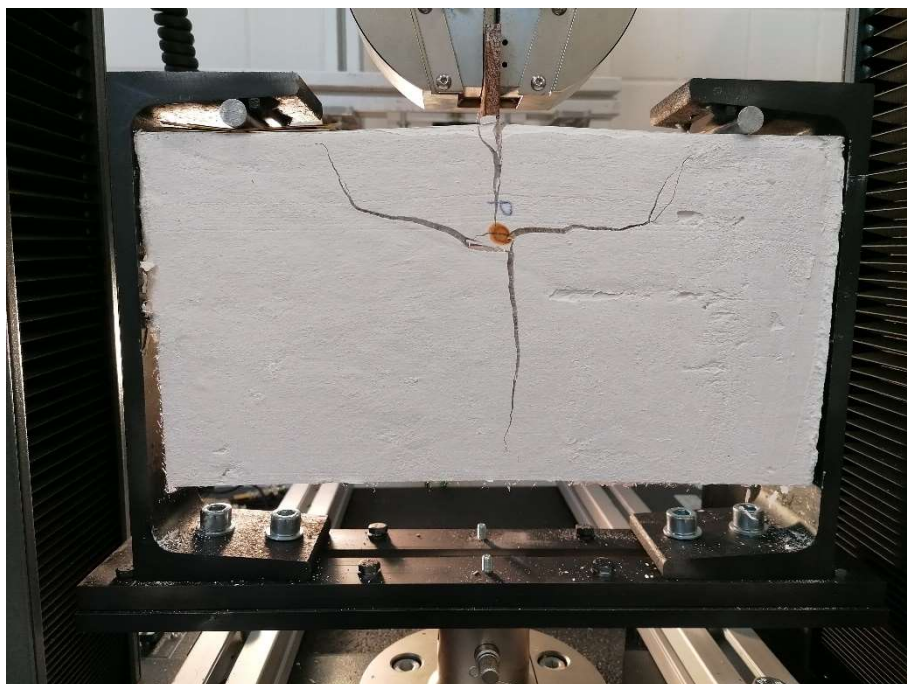


Figura 5.54. Propagación de grieta en probeta fracturada.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este apartado recoge los resultados obtenidos de los ensayos de pull-out realizados a las tres probetas ensayadas en este trabajo. Se mostrarán tanto las gráficas carga-desplazamiento, como los datos obtenidos a partir del procesado de imágenes con NCORR. Es importante destacar que, dado que únicamente se ha ensayado una probeta de cada tipo, no pueden extraerse conclusiones definitivas sobre su comportamiento, sería necesario un estudio más amplio, de al menos tres probetas de cada tipo, para estimar unos resultados extrapolables a otros ensayos similares. No obstante, pueden observarse diferencias entre las mezclas que cabría corroborar y cuantificar adecuadamente con una campaña experimental más amplia.

6.1. Ensayos a fractura en modo II (pull-out)

6.1.1. Análisis de resultados de carga – desplazamiento

Tal como se ha explicado anteriormente, se pretendía obtener la carga máxima antes de la rotura del material. A continuación, se muestran los valores de fuerza máxima en la tabla 2, que han soportado las tres probetas junto con una gráfica de barras para visualizar mejor los resultados y facilitar la comparación de las tres probetas (figura 6.1). En las gráficas se representarán en gris los valores de referencia de la probeta de yeso sin adiciones, en naranja los datos de la probeta de yeso con polipropileno y en azul los datos de la probeta de yeso con fibras NFU.

Tabla 2. Datos ensayo pull-out

Probeta	Carga Máxima (N)
Yeso sin fibras	1358.0
Yeso fibras PP	2512.5
Yeso fibras NFU	1604.5

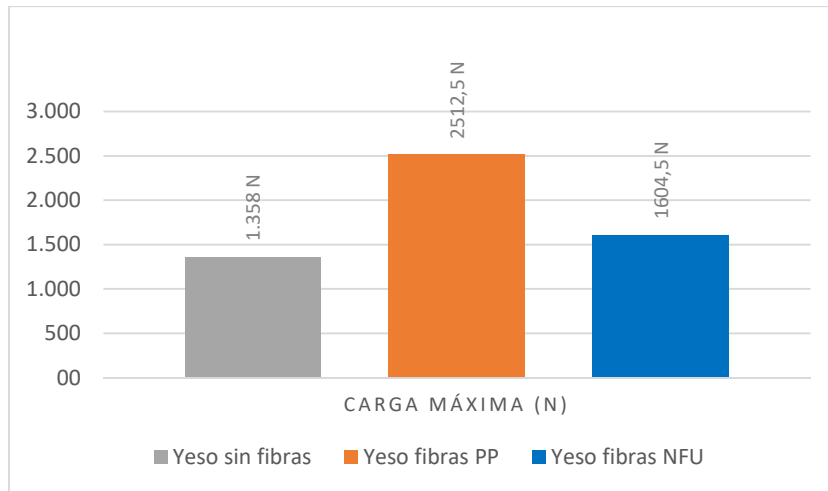


Figura 6.1. Gráfico de barras de los valores de carga máxima.

Analizando los valores obtenidos, se observa como las probetas con adición de fibras aguantan, una mayor carga que la probeta de yeso sin fibras. Además, de estos datos también se observa que las fibras de polipropileno otorgan a la probeta más resistencia que las de NFU.

A continuación, se muestran las gráficas carga desplazamiento obtenidas con la máquina Instron para los tres ensayos de manera conjunta en la figura 6.2.

En la probeta de yeso sin adición se observa un patrón claro de rotura frágil, donde la probeta aguanta hasta un punto en el cual se produce la fractura del material. Este tipo de fractura se produce sin una aparente deformación inicial. Este hecho tampoco fue apenas perceptible por la correlación digital de imágenes.

La adición de fibras al yeso, provocan en ambos tipos de fibras una recuperación durante el proceso de fractura. En la gráfica de la figura se observa este fenómeno que tienen lugar gracias a las fibras de NFU. Se observa cómo después de la rotura de la matriz de yeso, se produce un estancamiento en la pérdida de carga, momento en el cual las fibras de NFU comienzan a absorber la energía del proceso de fractura del material, induciendo un cierto incremento de carga y alargando el proceso de rotura completa de la probeta hasta desplazamientos notablemente mayores que en el caso de la probeta de yeso sin refuerzo.

Como era de esperar, las fibras de polipropileno confirieron a la mezcla buenas propiedades mecánicas, debido a que están fabricadas con este propósito. En la figura 6.2 se observa el momento en el que la matriz de yeso rompe y como las fibras actúan como un refuerzo del material y, además, dan a la probeta de una mayor resistencia tras la rotura inicial de la matriz de yeso, llegando incluso a superar el esfuerzo absorbido por la matriz de yeso. Se observa también el punto en el que se produce una rotura general de las fibras, en el punto de 3.2 mm de desplazamiento (aproximadamente).

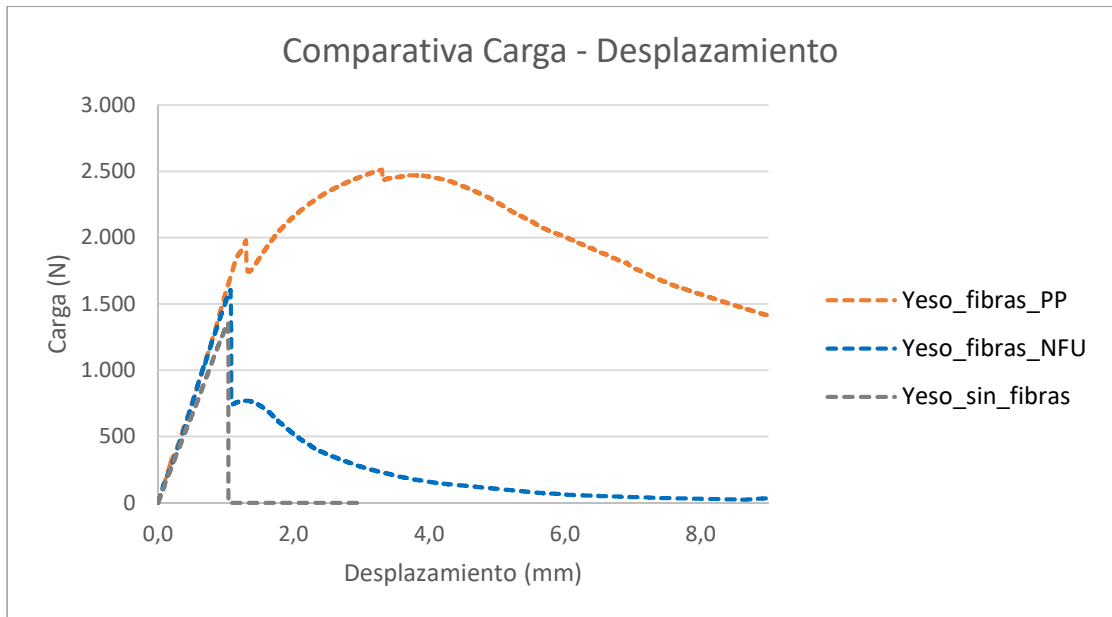


Figura 6.2. Gráfica comparativa Carga-Desplazamiento de las tres probetas.

En general, se aprecia como las fibras aportan un refuerzo extra a la matriz de yeso, además de conseguir un comportamiento menos agresivo del material después de la fractura.

La probeta de yeso con fibras NFU ha conseguido aguantar más carga de rotura que las de su análoga de yeso sin fibras, además de mejorar el comportamiento de la probeta, permitiendo la absorción de una mayor energía durante el proceso de fractura.

En la figura 6.3 se muestra una imagen de las fibras de polipropileno actuando como agente de refuerzo en la matriz, donde se observa el efecto de cosido de las fisuras que ejercen las fibras. Tan solo la probeta reforzada con fibras de polipropileno fue la única que se conservó como una pieza hasta el final del ensayo, mientras que la de NFU, consiguió absorber parte de la rotura, hasta que finalmente se partió en varios trozos.



Figura 6.3. Fibras de refuerzo actuando sobre material fracturado en probeta de yeso con fibras de PP

De la gráfica comparativa, se puede deducir que las fibras de PP son las que mayor refuerzo proporcionan. La probeta de yeso con fibras de PP es, por tanto, la que más energía ha conseguido absorber sin romperse. Esto puede deberse a que las fibras de polipropileno son las que mejor se hayan integrado en la mezcla y también las que mejores propiedades mecánicas tengan.

6.1.2. Análisis mediante Correlación Digital de Imágenes

La fractura frágil sucede sin una apreciable deformación visible y debido a una rápida propagación de una grieta. En este apartado se presentan las imágenes obtenidas tras el procesado DIC. Se pretende demostrar cómo esta técnica de análisis proporciona una información adicional para un posible anticipo a la fractura, intentando estimar en que puntos se iniciará y hacia donde se propagará la grieta.

Se mostrarán imágenes de los desplazamientos y deformaciones en puntos clave de las gráficas mostradas anteriormente. Además, se determinará la energía de fractura para las tres probetas en varios puntos a lo largo del ensayo, de tal manera que se comparará este valor y se buscará una relación entre el tipo de refuerzo y la capacidad de absorción de la grieta de las probetas. Estas imágenes también darán información sobre las zonas donde se concentran los esfuerzos.

En el caso de las deformaciones, solo se ha mostrado la componente E_{yy} , puesto que es la que más información ha arrojado. Esto es debido a que el desplazamiento de la T es vertical, por tanto, esta componente es la más afectada en cuando a variación de su módulo.

6.1.2.1. DIC Probeta de yeso sin fibras

A continuación, se muestra la probeta en el punto de desplazamiento 1,079 mm, momento en el cual se produce el fallo. En la imagen 6.4 se aprecian los mapas de desplazamientos, tanto en x como en y, como los desplazamientos tienen lugar cerca de las líneas de la futura fractura.

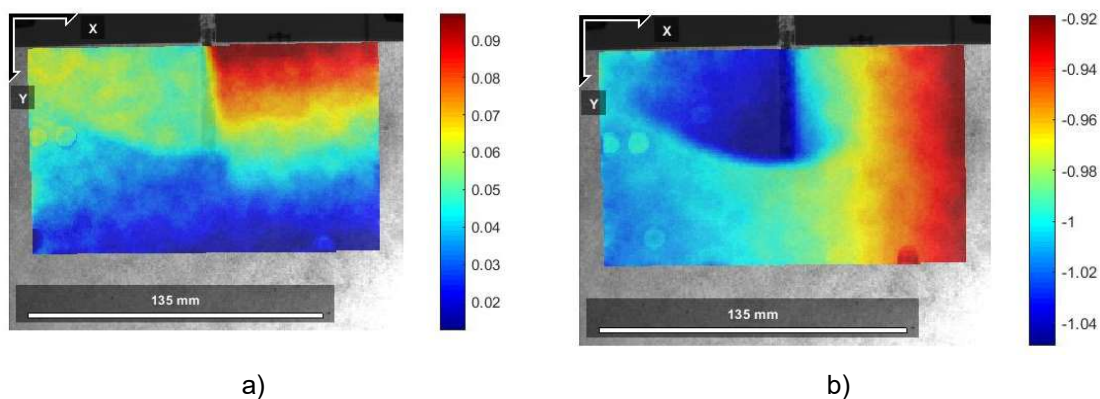


Figura 6.4. Desplazamientos DIC probeta yeso sin fibras a 1,079 mm de desplazamiento desde el punto inicial a) desplazamientos en el eje x; b) desplazamientos en el eje y

En la figura 6.5 se muestran el mapa de deformaciones de la probeta de yeso sin fibras en el momento anterior y posterior a la rotura de la probeta. Se observa como las deformaciones se concentran en los extremos de la T embebida, propagándose esta en la dirección perpendicular a la tensión aplicada. En el caso de esta probeta, la información obtenida de la técnica DIC fue bastante escueta, debido a que el fallo que se produjo fue frágil, apenas se pudo recaudar información útil de cara a poder prevenir un fallo en este tipo de rotura.

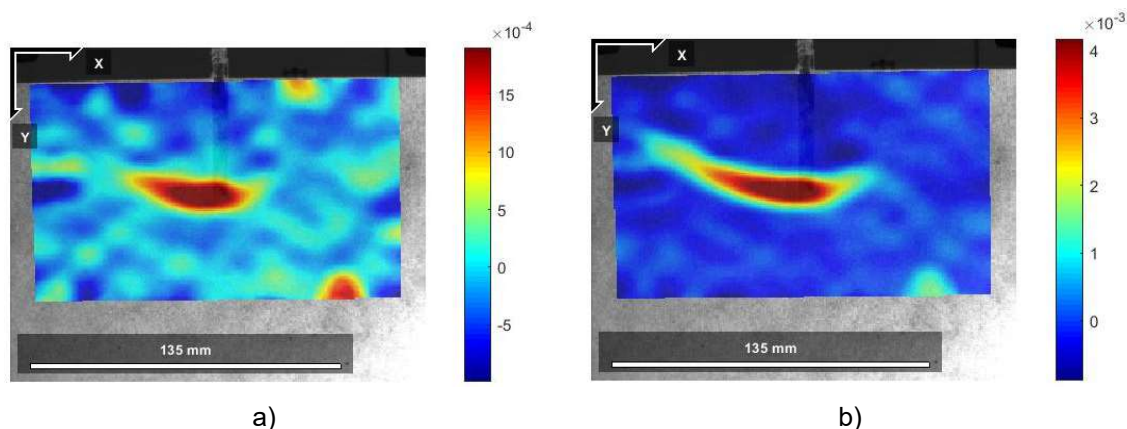


Figura 6.5. Mapa de deformaciones $E_{yy_Lagrange}$ para probeta de yeso sin fibras en el punto de desplazamiento a) 0,99898 mm y b) 1,079 mm.

Este aumento de deformaciones alrededor de los extremos de la T, puede indicar un despegue entre la T y el yeso circundante.

También se observó un cúmulo de deformaciones en los extremos de la T, al menos 15 segundos antes de la rotura, durante la realización de este ensayo (figura 6.5).

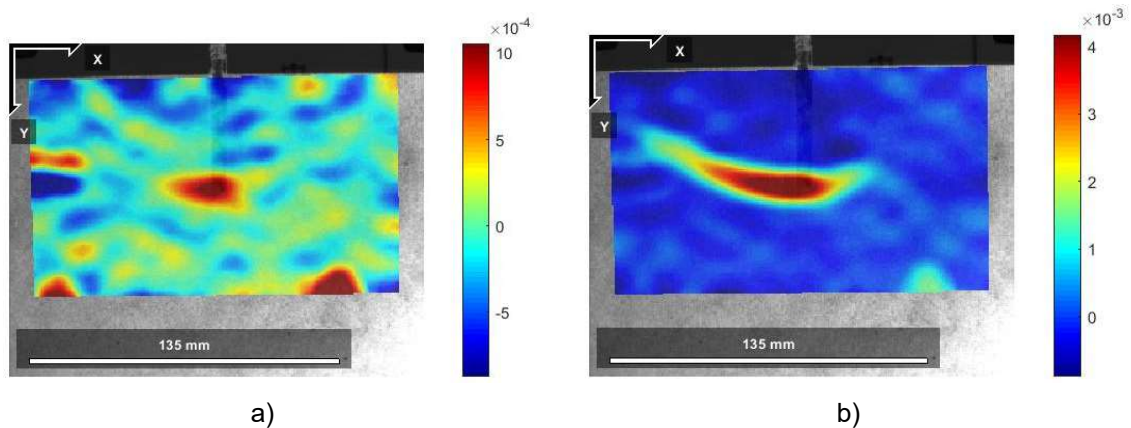


Figura 6.6. Mapas de deformaciones E_{yy} Lagrange para probeta de yeso sin fibras en a) 50 segundos tras iniciar el ensayo y b) 65 segundos después de iniciar el ensayo (momento del fallo).

A partir del momento en el que se rompe la probeta, al ser una fractura frágil, no se puede obtener más información. En el caso de la probeta de yeso quizá hubiera sido interesante realizar el ensayo a una velocidad menor o haber tomado 10 fotos cada segundo, con el objetivo de hallar más información de la técnica DIC.

Se aprecia, tanto en la figura 6.8 como en la 6.9, como antes de que produzca el fallo, los mapas de deformaciones registran gran cantidad de ruido en toda la superficie de estudio. Es en el durante el proceso de fractura cuando se libera tensión a través de la grieta y disminuyen los desplazamientos o ruido que se apreciaban en las figuras. Además, es notable el cambio de escala que tiene lugar tras la fractura del material, siendo los desplazamientos en las inmediaciones de la grieta mayores tras la rotura.

6.1.2.2. DIC Probeta de yeso fibras NFU

Para la probeta adicionada con fibras NFU, tal como se mencionó en apartados anteriores se produjo una pequeña recuperación de la caída de carga mostrada en la gráfica de la figura 6.3. Mediante el análisis DIC se pretende demostrar estos fenómenos.

En esta ocasión se muestran los desplazamientos antes y después del momento de la fractura de la matriz de yeso (figura 6.7).

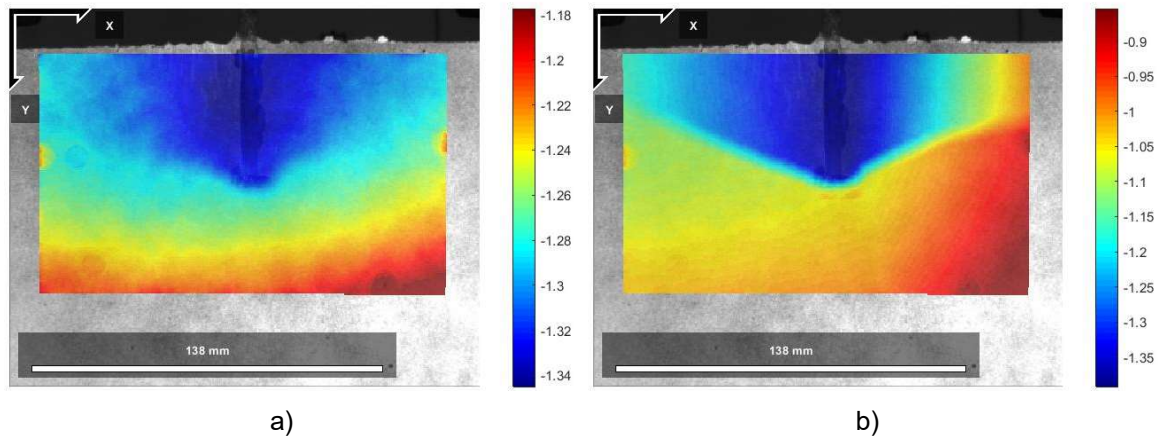


Figura 6.7. Desplazamientos en y de la probeta yeso con fibras NFU antes y después del colapso de la matriz de yeso a) $d=1.3106$ mm; b) $d=1.3245$ mm.

Tanto la figura 6.7 como la 6.6 muestran el momento de fractura de la probeta de yeso con fibras de NFU. Se observa, gracias a los mapas de desplazamientos, la existencia de una concentración de deformaciones en la zona de la T. Hay que volver a hacer hincapié en la magnitud de las escalas de medida, puesto que los valores de deformaciones registrados en el caso de las probetas con fibras fueron mayores que para la probeta de yeso sin adición de material de refuerzo. Se vuelve a apreciar en la imagen b) como después de la rotura, las deformaciones se concentran en los puntos alrededor de la zona de propagación de la grieta, liberando las tensiones en el resto del material.

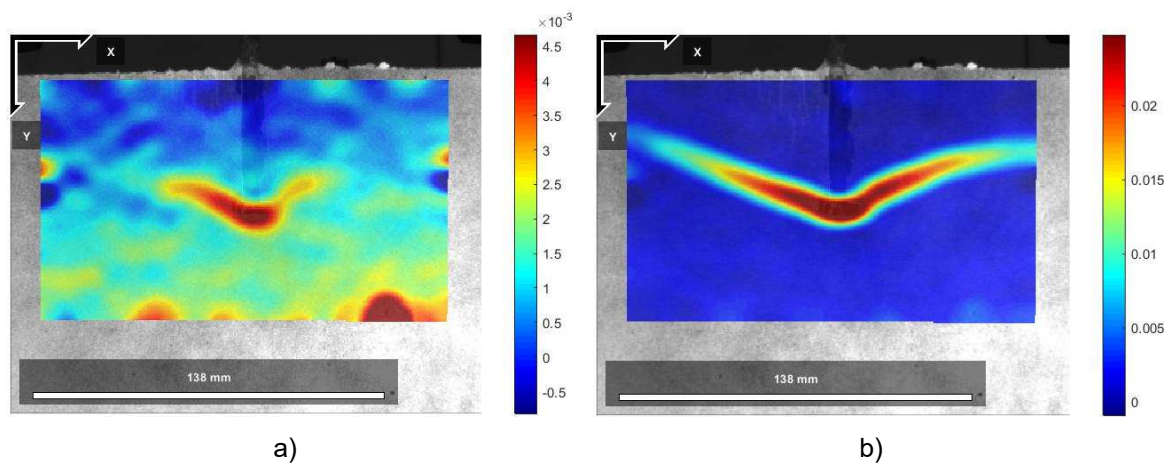


Figura 6.8. Mapa de deformaciones $E_{yy_Lagrange}$ para probeta de yeso con fibras NFU en el punto de desplazamiento a) $d=1.3106$ mm; b) $d=1.3245$ mm.

A continuación, en la figura 6.9 se muestra una imagen 20 segundos después de la rotura de la probeta, lo que demuestra como las fibras NFU son capaces de absorber una mayor energía de rotura, permitiendo un desplazamiento superior sin que la probeta se separe en varios trozos.

Este comportamiento podría suponer una mejora en elementos fabricados con yeso, si bien un aporte de estas fibras no incrementa visiblemente las propiedades mecánicas en

ensayos de pull-out, consigue una mejora frente al comportamiento de propagación de la grieta, evitando un fallo catastrófico tan típico en materiales de rotura cuasi-frágil.

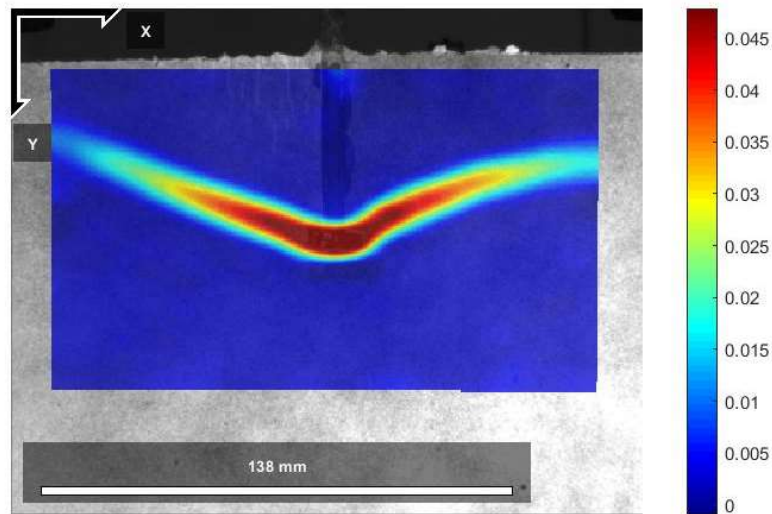


Figura 6.9. Mapa de deformaciones $E_{yy_Lagrange}$ para probeta de yeso con fibras NFU en el punto de desplazamiento $d=1,6822$ mm.

6.1.2.3. DIC Probeta de yeso fibras polipropileno (PP)

En la probeta de yeso con fibras de PP, existen, tal como se discutió con la gráfica carga-desplazamiento en el apartado anterior, varios puntos durante el ensayo donde se han producido fenómenos destacables: la rotura de la matriz de yeso, la mejora de la carga gracias a las fibras y la rotura del refuerzo de fibras de PP y la posterior caída de carga.

Dicho esto, se presentan algunas imágenes del análisis que se relacionan con estos fenómenos del proceso de fractura.

En la figura 6.10 se muestran el instante anterior y posterior a la caída de carga en la probeta de yeso con fibras de PP, se observa como antes de la rotura ya aparecen deformaciones livianas en la zona cercana a los extremos de la T. Además, se puede deducir por los mapas de deformaciones las zonas de inicio y propagación de grieta.

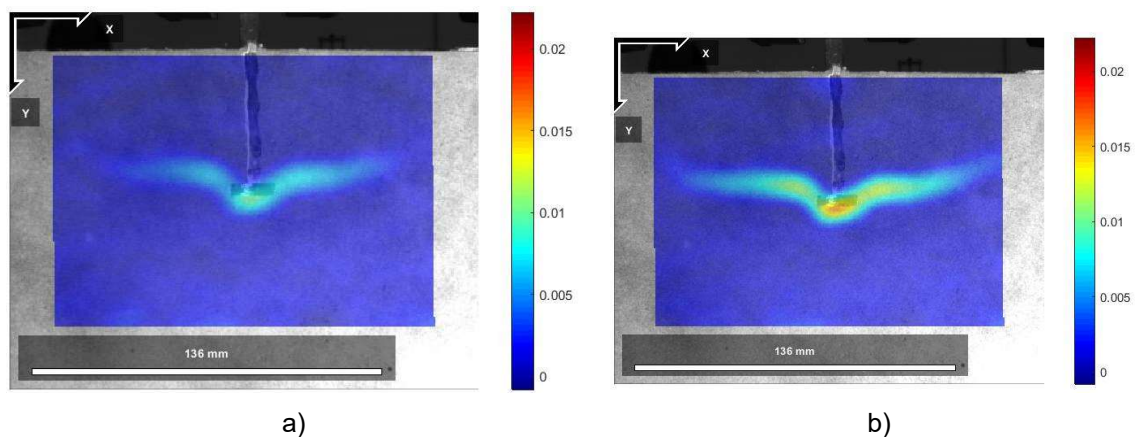


Figura 6.10. Mapa de deformaciones $E_{yy_Lagrange}$ para probeta de yeso con fibras PP en el punto de desplazamiento a) $d=1,9206$ mm; b) $d=1,95708$ mm.

En la figura 6.11 se observa como el material compuesto con fibras de PP es capaz de absorber gran cantidad de deformaciones en la zona de la grieta sin llegar a desgarrarse por completo, siendo las fibras de PP las que aportan esta característica a la mezcla.

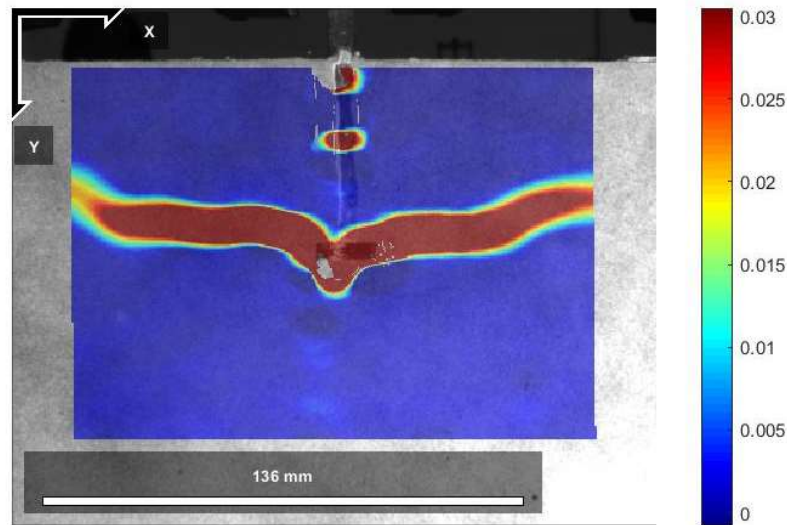


Figura 6.11. Mapa de tensiones $E_{yy_Lagrange}$ para probeta de yeso con fibras PP en el punto de desplazamiento $d=3,8321$ mm.

En el caso de la probeta de yeso con fibras de PP, la técnica DIC realizada no aporta demasiada información relevante a la actuación de las fibras en el proceso de fractura, puesto que las grietas provocan mucha distorsión en este tipo de análisis, siendo imposible captar información en aquellos puntos de la imagen donde no hay material. A pesar de ello, sí que resultó interesante observar las deformaciones en los alrededores de la T antes, durante y después de la rotura de la matriz de yeso.

El análisis de los datos obtenidos a partir de la técnica DIC arrojó datos interesantes sobre el fenómeno del proceso de formación y crecimiento de grieta. Es aconsejable para futuros trabajos ampliar la zona de visión para enmarcar toda el área de propagación de la grieta generada en el extremo de la T e incluso realizar más imágenes o un patrón de speckle con más contraste.

6.1.3. Análisis del patrón de inicio y propagación de grieta.

Para terminar el análisis de los resultados, se van a mostrar unas imágenes de las probetas tras el ensayo, comentando los patrones de propagación de la grieta en las diferentes mezclas.

Tal como se ha visto en estudios consultados, la dirección con la que se propaga una grieta es aproximadamente perpendicular a la dirección de las cargas aplicados originando una superficie de fractura aproximadamente plana [70]. Esto también puede observarse en los ensayos realizados (figura 6.1, figura 6.13 y figura 6.14)

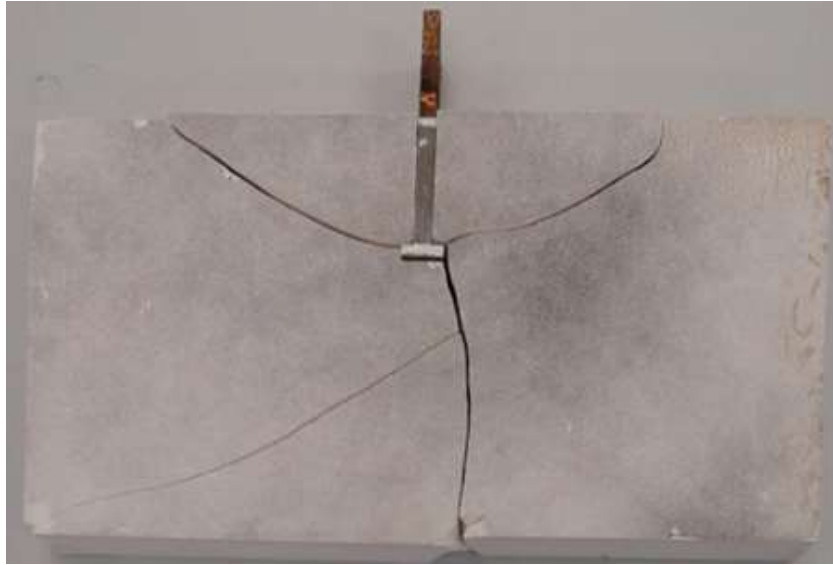


Figura 6.12. Patrón de fractura en probeta de yeso sin fibras.



Figura 6.13. Patrón de fractura en probeta de yeso con fibras NFU.

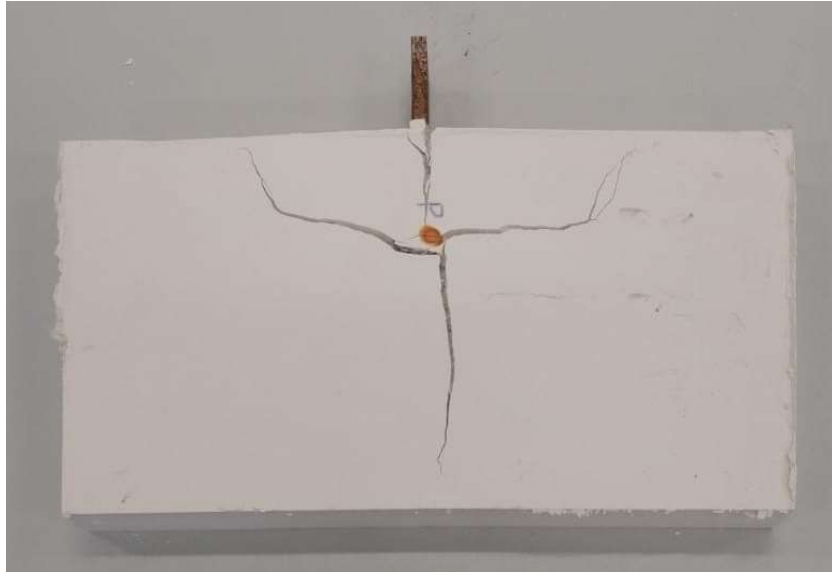


Figura 6.14. Patrón de fractura en probeta de yeso con fibras PP.

Se observa en los tres ensayos unos patrones de propagación de grieta similares a los recogidos con anterioridad en los antecedentes de este trabajo. El frente de grieta se propaga “buscando las zonas de los rodillos de apoyo”.

En los casos de probeta con adición de fibras este fenómeno de propagación incontrolada se reduce considerablemente, es de suponer que las fibras aportan al material un refuerzo extra, o lo que es lo mismo un impedimento más para que la grieta se propague libremente por la matriz. En la imagen 6.15 se observa este fenómeno.

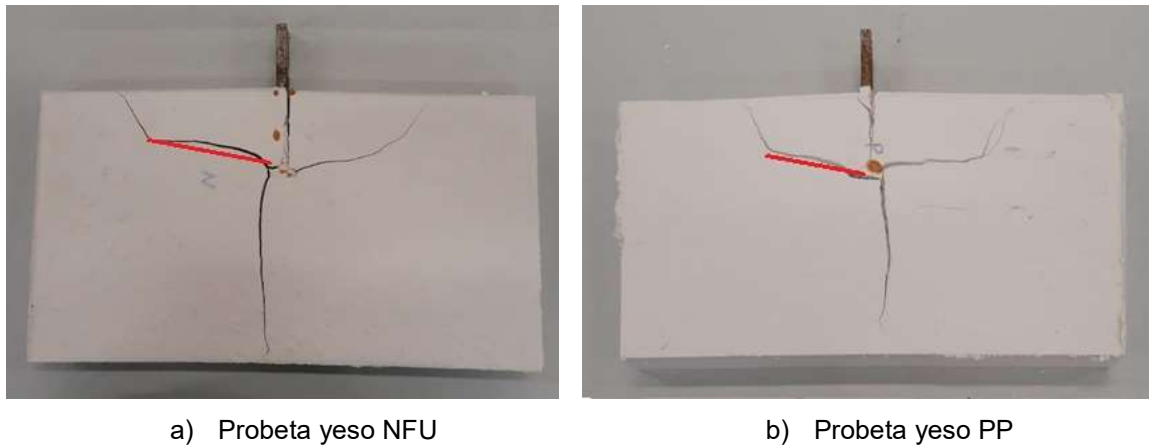


Figura 6.15. Medidas aproximadas de la apertura de grieta incontrolada indicadas con la línea roja a) 85 mm y b) 52 mm.

Para el caso de las fibras de NFU la grieta se desarrolló a lo largo de una longitud mayor antes de presentar un quiebro en la propagación de fisura que en la probeta con fibras de PP. Esta diferencia puede deberse a unas mejores propiedades mecánicas de las fibras de polipropileno frente a las de neumático fuera de uso. Si bien este hecho era de esperar, los resultados obtenidos de los ensayos de yeso adicionado con fibras NFU han

arrojado unos resultados interesantes al compararlos con el comportamiento de unas fibras producidas expresamente como refuerzo de materiales cuasifrágiles, como son las fibras de polipropileno.

Otro dato relevante es que en la probeta con fibras de polipropileno las fibras mantuvieron todo el material unido a pesar del desplazamiento de la T. Sin embargo, en la probeta con fibras de NFU, se produjo una rotura completa del material en varias partes.

6.1.3.1. Energía de fractura

Por último, se introducirá el término de la energía de fractura como un valor obtenido a partir de los datos generados por la máquina de ensayos. Este valor representa la energía necesaria para crear una unidad de área de fisura real (que no transmite tensiones).

La energía de fractura viene dada por el área encerrada bajo la curva carga-desplazamiento y se calcula como la integral definida entre los valores de desplazamiento cero y el valor de estudio. En este caso, se calculará la energía de fractura para un desplazamiento de 1 mm, 3 mm y 8 mm para las tres probetas. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Energía de fractura para distintos valores de desplazamiento δ .

Energía de fractura (N·mm)			
	$\delta=1$ mm	$\delta=3$ mm	$\delta=8$ mm
Yeso sin fibras	666.7	714.9	714.9
Yeso fibras NFU	751.7	1855	2395.3
Yeso fibras PP	767	5010	15545.7

Los valores obtenidos en las tres probetas corroboran lo apreciado durante la realización de los ensayos. En la tabla 3 se ha coloreado en naranja más oscuro el valor más alto de esta energía, que se corresponde con la probeta de yeso con fibras de PP para un desplazamiento de 8 milímetros. También se han resaltado en un tono un poco más claro los valores de energía superiores al doble del valor máximo obtenido por la probeta de yeso sin fibras.

Se observa un aumento 3 veces superior de la energía de fractura absorbida para un desplazamiento de 8 mm de la probeta de yeso con fibras NFU en comparación con la energía capturada por la probeta de yeso sin fibras. Este valor sería más de 20 veces superior en el caso de la probeta de yeso con fibras de PP.

7. CONCLUSIONES

Todas los datos y explicaciones recogidos en el apartado de resultados y discusiones sobre los ensayos realizados con probetas de yeso simple y yeso con fibras, permiten obtener las siguientes conclusiones:

- En las probetas de yeso con adición de fibras, tanto para microfibras de polipropileno como para fibras NFU, se observa una mejora de las propiedades de rotura y una mayor absorción de la energía de fractura, en comparación con la probeta de yeso simple.
- Las fibras de polipropileno mejoran la respuesta a la fractura de las probetas adicionadas con dicho refuerzo impidiendo la libre propagación de grieta en mayor medida que las fibras de NFU, que consiguen frenar en parte un crecimiento aleatorio de la grieta.
- Los patrones de grieta observados se corresponden en gran medida con los resultados de la bibliografía consultada para ensayos de pull-out, por lo que estamos ante una rotura con componente predominante en modo II.
- El uso de la técnica DIC, resulta de gran ayuda para la comprensión de los comportamientos mostrados por las probetas de ensayo. Sin embargo, hubiera sido favorable ampliar el enfoque de estudio a una zona más amplia que permitiera ver los apoyos a través de esta técnica. Cabría tener en cuenta esta apreciación en futuras campañas experimentales.

Teniendo en cuenta lo novedoso de la metodología experimental de este trabajo, se han obtenido resultados interesantes en todos los aspectos. Las fibras han demostrado ser un material de refuerzo óptimo en materiales cuasi frágiles para ensayos de pull-out. Además, se ha demostrado que las fibras de NFU, aumentan la capacidad de absorción de energía del material durante la fractura, llegando incluso a transformar una fisura aleatoria en una grieta con una dirección que puede ser, en parte, estimada.

En general, la matriz frágil del yeso mejora notablemente su tenacidad gracias a la adición de material de refuerzo en forma de fibras sin que se aprecie un desprendimiento de dicho refuerzo durante la realización de los ensayos.

8. TRABAJO FUTURO

Se hacen necesarios futuros trabajos de investigación en esta línea para tener una comprensión más profunda de las propiedades de fractura de los materiales compuestos en modo II. A continuación, se enumeran algunas propuestas de investigación que han quedado abiertas en relación al trabajo presentado:

- Ampliar el estudio realizado a un mayor número de geometrías y de probetas con la intención de inferir en unos resultados que puedan servir como referente estadístico para estos ensayos. El objetivo sería encontrar modelos de repetitividad de los patrones de propagación de grieta encontrados. En esta línea también sería interesante buscar una relación entre el tipo y la proporción de fibras adicionadas frente al patrón de propagación de grieta.
- Caracterización de las fibras NFU usadas (porosidad, longitud, diámetro, etc), así como una búsqueda de los procesos de obtención de este tipo fibras de forma que conserven unas mejores propiedades mecánicas como agente de refuerzo. En este punto podrían estudiarse fibras NFU procedentes de distintos proveedores o procesos de extracción, buscando un posible vínculo con sus propiedades mecánicas.
- Basarse en el método experimental descrito en este trabajo para estudiar el efecto tamaño en la propagación de grieta en materiales compuestos con fibras para ensayos de pull-out tal como menciona Zdeněk BAŽANT en su estudio sobre este tema [71].

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASKELAND, Donald R. Ciencia e Ingeniería de los materiales, Tercera Edición ed. *Universidad de Missouri-Rolla*, 1998.
- [2] VILELA, Cristina Monteserín. *Estrategias para la mejora de las prestaciones de materiales compuestos*. 2017. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco.
- [3] Southwest Research Institute [consulta: 05-10-2020]. Disponible en: <https://www.swri.org/newsroom>
- [4] SHACKELFORD, James F.; GÜEMES, Alfredo; MARTÍN, Nuria. *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. 2005.
- [5] BELLÓN CANEIRO, J. M., et al. Reparación de defectos de pared abdominal con prótesis composite. Estudio del comportamiento peritoneal. *Cir. Esp. (Ed. impr.)*, 2000, p. 432-437.
- [6] MARTÍNEZ, José A. Torralba, et al. Hernia de Morgagni gigante. Tratamiento laparoscópico mediante prótesis bilaminar (composite) de poliéster. *Cirugía Española*, 2002, vol. 72, no 5, p. 303-305.
- [7] MORALES, Angel Renato Pozo; GÜEMES, Aeronáutico Alfredo; LÓPEZ, Aeronáutico Antonio Fernández. *Materiales compuestos de fibras naturales*. 2019. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- [8] NAZER, Amin, et al. Hormigón sustentable basado en fibras de neumáticos fuera de uso. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 2019, vol. 35, no 3, p. 723-729.
- [9] Sika México [consulta 26-11-2020]. Disponible en: <https://mex.sika.com/es/construccion/reparacion-y-reforzamiento/reforzamiento-estructuralfibrasdecarbono.html>
- [10] Wikipedia [consulta 26-11-2020]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_de_vidrio
- [11] Psi Concreto [Consultado 26-11-2020]. Disponible en: <https://psiconcreto.com/fibra-de-polipropileno/#:~:text=Caracter%C3%ADsticas%20y%20beneficios%20de%20la%20fibra%20de%20polipropileno,-Esta%20fibra%20se&text=Presenta%20excelente%20resistencia%20a%20soportes,las%20t%C3%A9cnicas%20de%20procesamiento%20existentes.>
- [12] MUÑOZ CEBRIÁN, Fernando. *Comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibra de polipropileno multifilamento: influencia del porcentaje de fibra adicionado*. 2011. Tesis Doctoral.
- [13] Alibaba [Consultado 26-11-2020]. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/high-density-polyethylene-fiber-pp-concrete-fiber-1380529572.html>

- [14] GRIFFITH, Alan Arnold. VI. The phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character, 1921, vol. 221, no 582-593, p. 163-198.
- [15] KNOTT, John Frederick. *Fundamentals of fracture mechanics*. Gruppo Italiano Frattura, 1973.
- [16] ÁVILA ÁLVAREZ, Guillermo. *Estudio de la retracción y el agrietamiento de arcillas. Aplicación a la arcilla de Bogotá*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2005.
- [17] MORALES, Ángel Andrés Andrade; VELASQUEZ, Wilfor Alejandro Mosquera; VANEGAS-USECHE, Livardo Vicente. Modelos de crecimiento de grietas por fatiga. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 2015, vol. 9, no 18, p. 39-48.
- [18] PARIS, Pe; ERDOGAN, Fazil. A critical analysis of crack propagation laws. 1963.
- [19] BROEK, David. *Elementary engineering fracture mechanics*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [20] LÓPEZ MENÉNDEZ, Anastasio. Nueva metodología de ensayo para la caracterización a fractura en modo III de materiales compuestos laminados. 2015.
- [21] RODRÍGUEZ VÁZQUEZ, Carlos Alfonso. *Patrones y mecanismos de fractura en los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras*. 2013. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- [22] ARANA BILBAO, José Luis; GONZÁLEZ MARTÍNEZ, Javier Jesús. *Mecánica de fractura*. Servicio Editorial de la EHU-UPV, 2002.
- [23] PLANAS, Jaime; ELICES, Manuel. Fractura del hormigón en régimen no lineal. Intentos para medir la energía de fractura GF. Informes de la Construcción, 1985, vol. 37, no 372, p. 35-52.
- [24] SHACKELFORD, James F.; GÜEMES, Alfredo; MARTÍN, Nuria. Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros. 2005.
- [25] Ministerio de transición ecológica. [consultado 06-11-2020]. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/neumaticos/>
- [26] España. Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso. Boletín Oficial del Estado, 3 de enero de 2006, núm.2, p.352.
- [27] CONSEJERIA DE AGRICULTURA, MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO RURAL, Acuerdo de gobierno 7444, Castilla La Mancha, 2016.

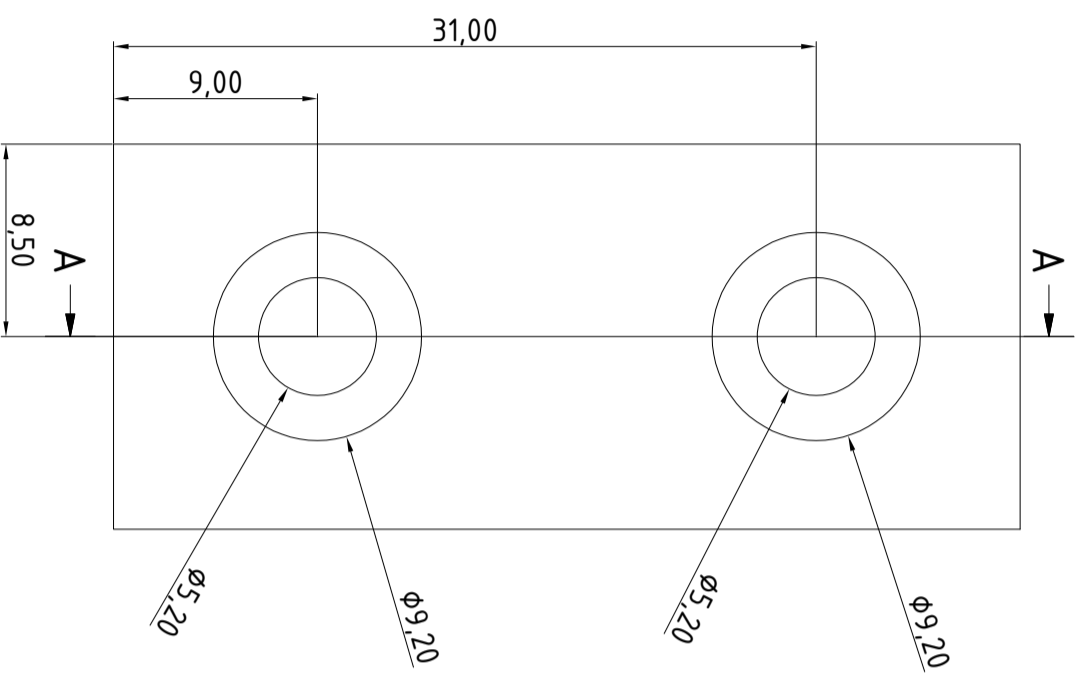
- [28] MINISTERIO DE FOMENTO [consultado 06-11-2020]. Disponible en: <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/32/neumaticos-fuera-de-uso/305/valorizacion.html>
- [29] Fuente: ETRA, European Tyre Recycling Association
- [30] SERRANO, Encarnación Cano; GARCÍA, Lidia Cerezo; FRAILE, Marina Urbina. *valorización material y energética de neumáticos fuera de uso*. CEIM, 2007.
- [31] RAMOS, G.; ALGUACIL, F. J.; LÓPEZ, F. A. Reciclado de neumáticos fuera de uso. Revisión tecnológica. *Revista de Metalurgia*, 2011, vol. 47, no 3, p. 273-284.
- [32] OLAVARRI, Alejandra Herrero. ARQUITECTURA RECICLADA.
- [33] FOMENTO, Ministerio. Instrucción de hormigón estructural EHE-08. *Fomento, Madrid, España*, 2008.
- [34] UNE-EN 14889-1:2008. Fibras para hormigón. Parte 1: Fibras de acero. Definición, especificaciones y conformidad, AENOR, 2008.
- [35] UNE-EN 14889-2:2008. Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad, AENOR, 2008.
- [36] CRISTINA, M^a Cruz Alonso; BARRAGAN, Bryan. Respuesta al fuego de HAC con y sin refuerzo de fibras.
- [37] SERRANO SOMOLINOS, Rubén, et al. *Estudio del comportamiento frente al fuego del hormigón en masa con adición de nanofibras de carbono (CNFS) y su comparación con hormigones sin adición y con otras adiciones*. 2018. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- [38] ENFEDAQUE, A.; GÁLVEZ, J. C.; SUÁREZ, F. Analysis of fracture tests of glass fibre reinforced cement (GRC) using digital image correlation. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 75, p. 472-487.
- [39] SOETENS, Tim; MATTHYS, Stijn. Shear-stress transfer across a crack in steel fibre-reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2017, vol. 82, p. 1-13.
- [40] CORDERO, Ángel Francisco Nistal; ABRIO, María Teresa Ruiz; MAQUEDA, María Jesús Retana. El hormigón: Historia, antecedentes en obras y factores identificativos de su resistencia. *Tecnología y desarrollo*, 2012, vol. 10, p. 13.
- [41] DI PRISCO, Marco; PLIZZARI, Giovanni; VANDEWALLE, Lucie. Fibre reinforced concrete: new design perspectives. *Materials and structures*, 2009, vol. 42, no 9, p. 1261-1281.

- [42] KAKOOEI, Saeid, et al. The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 27, no 1, p. 73-77.
- [43] SHAH, Surendra P.; SWARTZ, Stuart E.; OUYANG, Chengsheng. *Fracture mechanics of concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials*. John Wiley & Sons, 1995.
- [44] BRANDT, Andrzej M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite structures*, 2008, vol. 86, no 1-3, p. 3-9.
- [45] ROSSI, Pierre. Ultra-high performance fiber-reinforced concretes. *Concrete international*, 2001, vol. 23, no 12, p. 46-52.
- [46] AIELLO, Maria Antonietta, et al. Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: pull-out behaviour, compressive and flexural strength. *Waste management*, 2009, vol. 29, no 6, p. 1960-1970.
- [47] MOSQUERA BARRIONUEVO, Paola Elizabeth; TENELEMA BARRE, Rosa Estefanía. *Análisis de vigas de hormigón sometidas a flexión que incorporan fibras metálicas obtenidas de neumáticos reciclados*. 2017. Tesis de Licenciatura. Quito: UCE.
- [48] SERDAR, Marijana, et al. Shrinkage behaviour of fibre reinforced concrete with recycled tyre polymer fibres. *International Journal of Polymer Science*, 2015, vol. 2015.
- [49] SANTOS, Alfonso García. Comportamiento mecánico de yeso reforzado con polímeros sintéticos. *Informes de la Construcción*, 1988, vol. 40, no 397, p. 67-89.
- [50] CASTILLA-GONZALO, Francisco J. Estudio de las propiedades mecánicas del yeso con adición de fibras. 2019.
- [51] SUÁREZ, F., et al. On the fracture behaviour of fibre-reinforced gypsum using micro and macro polymer fibres. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 244, p. 118347.
- [52] DEL CURA, Sofía Herrero, et al. Análisis experimental de la incorporación de diferentes fibras en el comportamiento mecánico de compuestos de escayola-caucho NFU= Experimental analysis of the incorporation of different fibers in the mechanical behaviour of plaster and ELT rubber composites. *Anales de Edificación*, 2019, vol. 5, no 3, p. 1-7.
- [53] PICAZO, A., et al. Assessment of the shear behaviour of polyolefin fibre reinforced concrete and verification by means of digital image correlation. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 181, p. 565-578.

- [54] ELFGREN, L. *Round Robin Analysis and Tests of Anchor bolts in Concrete Structures*, RILEM Technical Committee 90-FMA, 'Fracture Mechanics to Concrete-Applications'. With a summary by L. Elfgren, R. Eligehausen, and J. Rots, Research Report 1998: 14, (Div. of Structural Engineering, Luleå Univ. of Technology, 1998) 60+ 371 p, 1998.
- [55] ELFGREN, Lennart; ELIGEHAUSEN, Rolf; ROTS, Jan G. Anchor bolts in concrete structures: summary of round robin tests and analysis arranged by RILEM TC 90-FMA 'Fracture Mechanics of Concrete-Applications'. *Materials and Structures*, 2001, vol. 34, no 8, p. 451-457.
- [56] ZAMORANO CANTÓ, Manuel. *INVESTIGACIÓN CON FIBRA RECICLADA DE NEUMÁTICO (FRN) PARA APLICACIONES ACÚSTICAS*. 2016. Tesis Doctoral.
- [57] ALVAREDO, A. M.; SLOWIK, V.; WITTMANN, F. H. Experimental study on the fracture of anchorage of bolts. Research Report—Round Robin Analysis and Tests of Anchor Bolts in Concrete Structures, 1998.
- [58] FOMENTO, D. E. Instrucción de Acero Estructural. 2011.
- [59] SUÁREZ, F., et al. *COMPORTAMIENTO A FRACTURA DE YESO CON ADICIÓN DE FIBRAS POLIMÉRICAS*, 2019.
- [60] UNE-EN 13279-2. Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo, AENOR, 2014.
- [61] UNE-EN 10365:2018. Perfiles en U, en I y en H de acero laminado en caliente. Dimensiones y masas, AENOR, 2018.
- [62] UNE-EN 10279:2001. Perfiles en U de acero laminado en caliente. Tolerancias dimensionales, de la forma y de la masa, AENOR, 2001.
- [63] SUTTON, Michael A.; ORTEU, Jean Jose; SCHREIER, Hubert. *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [64] SESÉ, LUIS ANTONIO FELIPE; GARRIDO, DR D. FRANCISCO ALBERTO DÍAZ; SIEGMANN, DR D. PHILIP. INTEGRACIÓN DE PROYECCIÓN DE FRANJAS Y CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES 2D PARA LA MEDIDA DE DEFORMACIONES Y DESPLAZAMIENTOS 3D.
- [65] LUYCKX, Thomas, et al. Digital image correlation as a tool for three-dimensional strain analysis in human tendon tissue. *Journal of experimental orthopaedics*, 2014, vol. 1, no 1, p. 7.
- [66] PARDO BORRERO, Álvaro. Aplicaciones de la correlación digital de imágenes a diversos ensayos mecánicos. 2014

- [67] LÓPEZ-ALBA, E., et al. Aplicación de correlación digital de imágenes para el análisis de problemas de contacto. En *XIX congreso nacional de ingeniería mecánica, Asociación Española de Ingeniería Mecánica*. 2012.
- [68] KUMAR, Srinidhi Lakshmish; ARAVIND, H. B.; HOSSINEY, Nabil. Digital Image Correlation (DIC) for measuring strain in brick masonry specimen using Ncorr open source 2D MATLAB program. *Results in Engineering*, 2019, vol. 4, p. 100061.
- [69] BLABER, J.; ADAIR, B.; ANTONIOU, A. Ncorr: open-source 2D digital image correlation matlab software. *Experimental Mechanics*, 2015, vol. 55, no 6, p. 1105-1122.
- [70] CARRION ESPINOSA, Juan Pablo; ROMERO MICHILENA, Edison Patricio. Análisis de la mecánica de fractura mediante ensayos de fatiga para muestras de aceros estructurales ASTM A-36 y grado maquinaria AISI 1045. *Facultad de Ingeniería Mecánica. ESPE. Sede Sangolquí*, 2008
- [71] BAŽANT, Zdeněk P. Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal. *Journal of engineering mechanics*, 1984, vol. 110, no 4, p. 518-535.

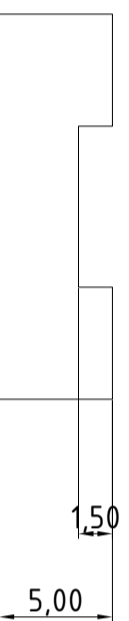
ANEXO I: PLANOS



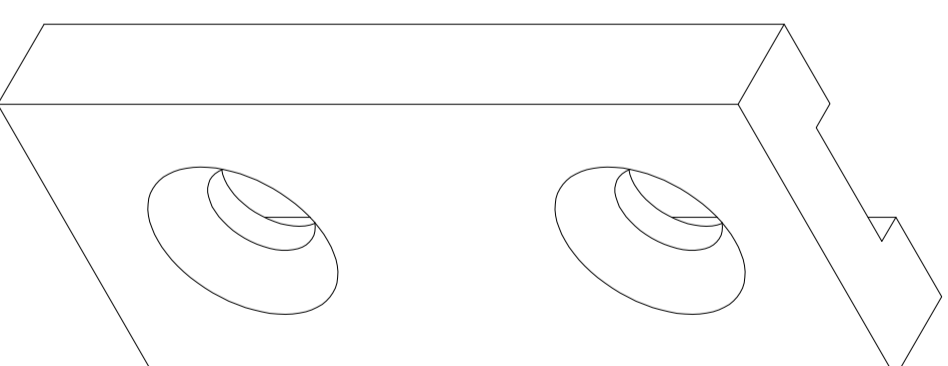
VISTA FRONTAL



A-A (5 : 1)

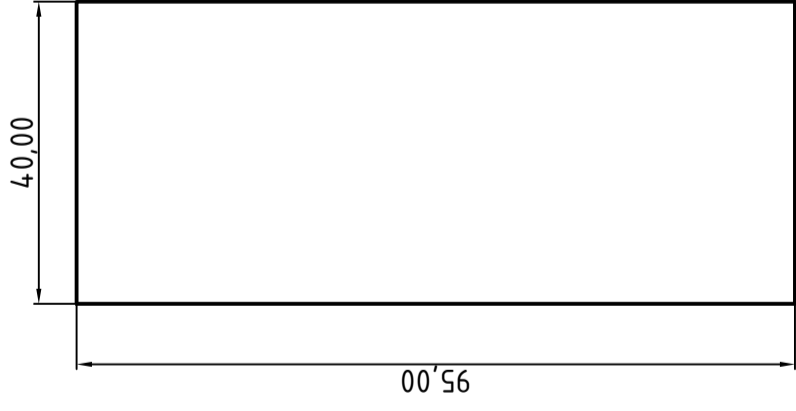


VISTA SUPERIOR

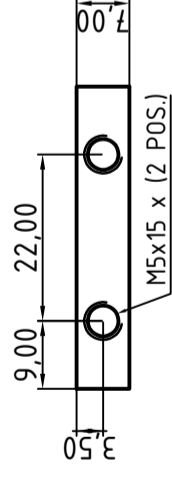


VISTA ISOMETRICA

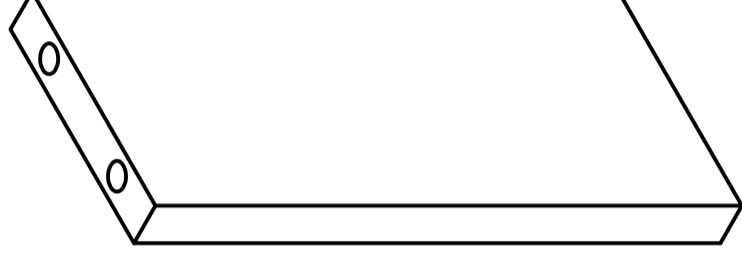
DIBUJADO	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
COMPROBADO	19/01/20	S. DELGADO		
	21/01/20	F. SUAREZ		
ESCALA:				
3:1	Evaluación de propiedades de fractura en modo II en mezclas de yeso con fibras			
PIEZA T TRANSVERSAL				
Nº PLANO				1/3
SUSTITUYE A:				
SUSTITUIDO POR:				



VISTA FRONTAL

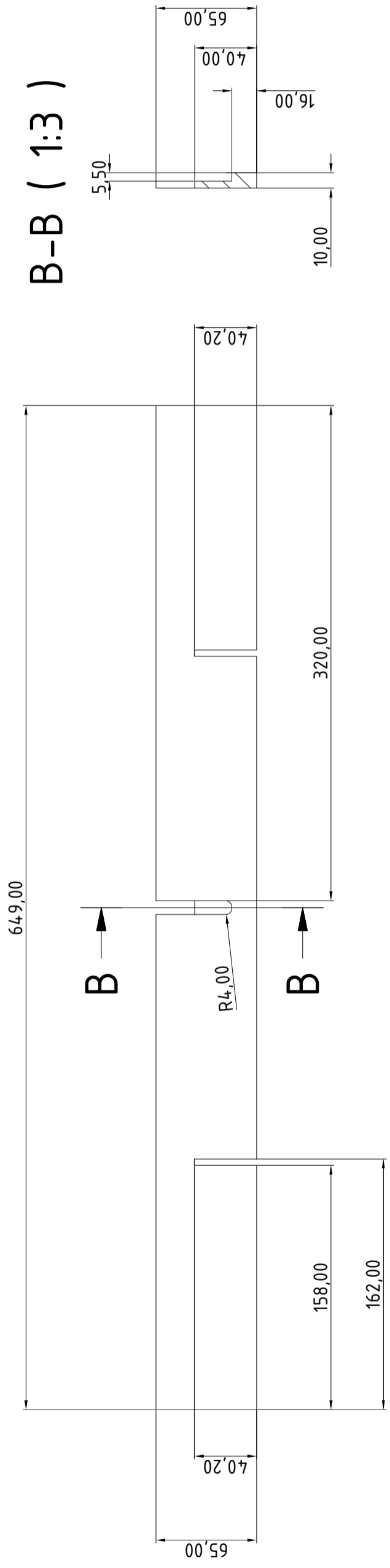


VISTA SUPERIOR

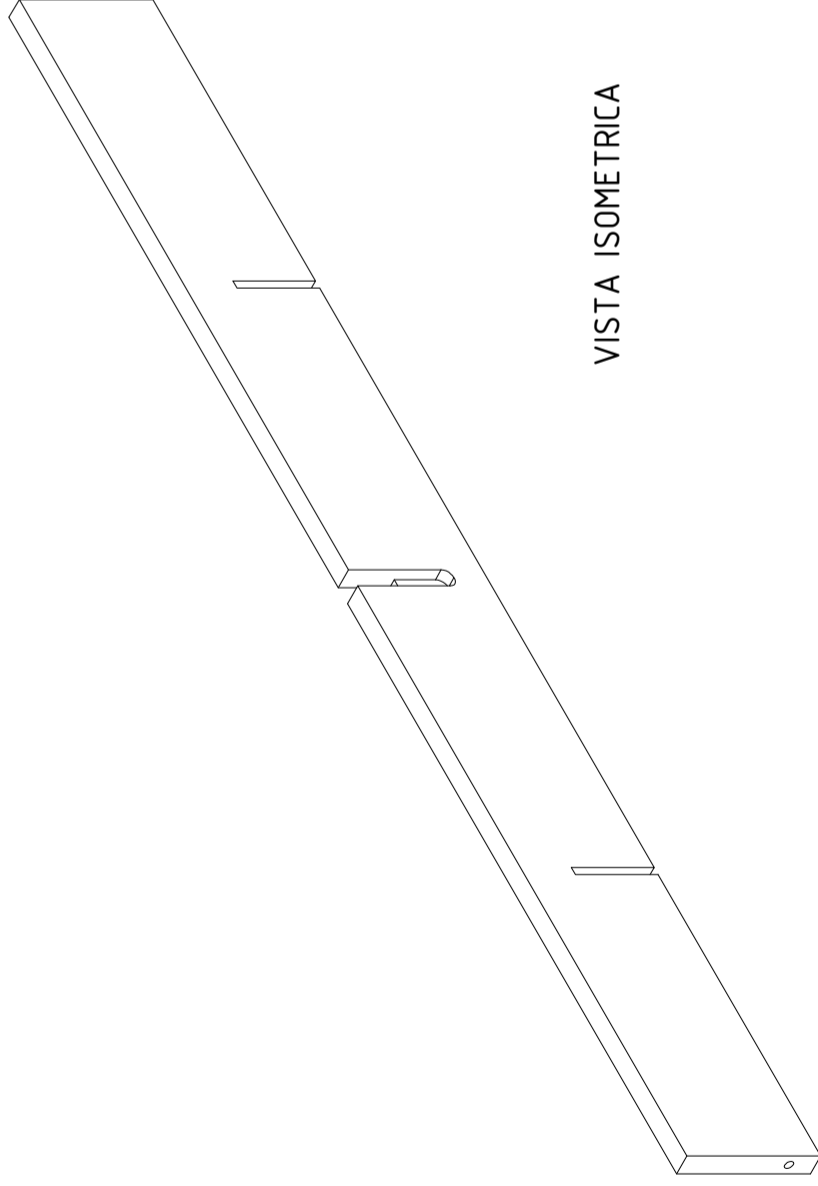


VISTA FRONTAL

DIBUJADO		FECHA	NOMBRE		FIRMA	
COMPROBADO		19/01/20	S. DELGADO			
		21/01/20	F. SUAREZ			
ESCALA:		Evaluación de propiedades de fractura en modo II en mezclas de yeso con fibras				
1:1		PIEZA T LONGITUDINAL				
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES			Nº PLANO		2/3	
			SUSTITUYE A:			
			SUSTITUIDO POR:			



VISTA FRONTAL



VISTA ISOMETRICA

B-B (1:3)

DIBUJADO	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
COMPROBADO	19/01/20	S. DELGADO		
	21/01/20	F. SUAREZ		Nº PLANO
ESCALA:	Evaluación de propiedades de fractura en modo II en mezclas de yeso con fibras			3/3
1:3	LARGUERO MOLDE ENSAYOS PULL-OUT			SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:

*ANEXO II: FICHAS TÉCNICAS DE LAS FIBRAS DE POLIPROPILENO Y LA MÁQUINA
INSTRON*

SikaFiber® M-12



Fibras de polipropileno monofilamento para el refuerzo de hormigones y morteros

Descripción del Producto	Es una fibra monofilamento de polipropileno diseñada para ser mezclada con hormigones y morteros con el fin de aumentar su durabilidad y evitar la fisuración.
Usos	<p>Se utilizan añadiéndose al hormigón o mortero, para mejorar las características siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Resistencia a la fisuración. ■ Resistencia al impacto. ■ Resistencia a flexotracción. ■ Resistencia a la abrasión. <p>Su uso está especialmente indicado en:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Losas de hormigón (soleras, forjados). ■ Pavimentos de hormigón. ■ Hormigón y Mortero de revestimiento en túneles, cavernas, estructuras enterradas como protección pasiva frente al fuego ■ Morteros. ■ Revocos de fachadas. ■ Elementos prefabricados. ■ Revestimiento de canales. <p>Sustituye a la armadura destinada a absorber las tensiones que se producen durante el fraguado y endurecimiento del hormigón. En cambio no sustituye a las armaduras principales obtenidas mediante cálculo.</p>
Características/Ventajas	<p>La adición en la masa de hormigón o mortero de estas fibras aporta las ventajas siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Perfecta dispersión en la masa del hormigón o mortero. ■ Asegura la distribución homogénea y uniforme de las tensiones en la masa de hormigón o mortero, evitando la formación de fisuras y los consiguientes puntos débiles. ■ Debido a su coeficiente de esbeltez y a su composición, es perfecta para reducir el fenómeno de spalling provocado en los hormigones/morteros sometidos a muy altas temperaturas. ■ La red de canales generados dentro del hormigón una vez desaparecido el material, permiten un escape perfecto del vapor de agua generado en el interior del hormigón o mortero ■ Reduce la fisuración por retracción. ■ Aumenta la impermeabilidad. ■ Reduce el riesgo de disgregación de la masa. ■ Mejora la resistencia a compresión y a tracción. ■ Aumenta la resistencia al impacto, reduciendo la fragilidad.
Ensayos	
Certificados/Normas	Cumple con la norma UNE 14889-2: Fibras poliméricas para hormigón. Clase 1-a: "Microfibra Monofilamentosa"



Datos del Producto

Forma

Presentación Bolsas de 600 g. Autodestruibles en la masa de hormigón o mortero. Caja de 20 bolsas

Almacenamiento

Condiciones de almacenamiento/Conservación En lugar seco y fresco. Conservación ilimitada

Datos Técnicos

Composición química Fibras de polipropileno

Densidad (20°C) Aprox. 0,91 kg/l

Absorción de agua Nula

Alargamiento a rotura 80-140%

Resistencia a compresión (Mpa)

Hormigón testigo
Hormigón con SikaFiber® M-12

7 días	28 días
21,4	26,7
25,4	28,9

Resistencia a tracción Indirecta (Mpa)

Hormigón testigo
Hormigón con SikaFiber® M-12

7 días	28 días
2,13	2,76
2,63	2,9

Resistencia a flexión (Mpa)

Hormigón testigo
Hormigón con SikaFiber® M-12

7 días	28 días
2,74	3,5
3,01	3,79

Resistencia al impacto (N de golpes)

Hormigón testigo
Hormigón con SikaFiber® M-12

7 días	28 días
28	39
31	42

Resistencia química Resistente a los rayos ultravioletas. Inerte a los álcalis del cemento, ácidos en general, agua de mar, residuos alimentarios y ganaderos, aceites vegetales. Imputrescible, resistente a hongos y bacterias.

Longitud 12 mm

Tenacidad ~ 280-310 N/mm² / 30-34 cn/tex

Punto de fusión ~ 163 - 170°C

Diámetro de fibras ~ 31 µm

Número de fibras ~ 102 millones/kg

Información del Sistema

Detalles de Aplicación

Consumo/Dosificación Para mejorar la fisuración por retracción:
Una bolsa de 600 gramos por cada metro cúbico de hormigón o mortero.
Como protección pasiva frente al fuego:
- Entre 0,5 a 3 kg por cada metro cúbico de hormigón o mortero. (Se recomienda la realización de ensayos previos para la determinación de la dosificación adecuada).
Nota: la dosificación más genérica dada en proyectos suele ser 2kg/m³

Instrucciones de Aplicación	<p>Se agrega, en planta o a pie de obra, añadiendo la bolsa cerrada directamente a la hormigonera en cualquier momento del mezclado o al final del mismo, pero nunca directamente sobre el agua antes de agregar el resto de los componentes. Una vez añadido el SikaFiber® M-12 basta con prolongar el amasado durante al menos 5 minutos. Pasado este tiempo, la bolsa se deshace al entrar en contacto con el medio alcalino del hormigón.</p> <p>Se emplea preferentemente en morteros, microhormigones y hormigones con tamaño máximo de áridos de 20 y resistencias mínimas de 17,5 MPa.</p>
Notas de aplicación /Limitaciones	<p>No reduce la trabajabilidad del hormigón, aunque por observación visual puede parecerlo.</p> <p>No sustituye a las armaduras principales y secundarias resultantes del cálculo.</p> <p>No evita las grietas derivadas de un mal dimensionamiento.</p> <p>No sustituye las labores convencionales de curado de las masas de hormigón o mortero.</p> <p>No elimina la retracción por secado.</p> <p>Es compatible con cualquier otro aditivo de SIKA®.</p> <p>Para cualquier aclaración rogamos consulten con nuestro Departamento Técnico.</p>
Notas	<p>Todos los datos técnicos indicados en esta Hoja de Datos de Producto están basados en ensayos de laboratorio. Las medidas reales de estos datos pueden variar debido a circunstancias más allá de nuestro control.</p>
Instrucciones de Seguridad e Higiene	<p>Para cualquier información referida a cuestiones de seguridad en el uso, manejo, almacenamiento y eliminación de residuos de productos químicos, los usuarios deben consultar la versión más reciente de la Hoja de Seguridad del producto, que contiene datos físicos, ecológicos, toxicológicos y demás cuestiones relacionadas con la seguridad.</p>
Notas Legales	<p>Esta información y, en particular, las recomendaciones relativas a la aplicación y uso final del producto, están dadas de buena fe, basadas en el conocimiento actual y la experiencia de Sika de los productos cuando son correctamente almacenados, manejados y aplicados, en situaciones normales, dentro de su vida útil, de acuerdo a las recomendaciones de Sika. En la práctica, las posibles diferencias en los materiales, soportes y condiciones reales en el lugar de aplicación son tales, que no se puede deducir de la información del presente documento, ni de cualquier otra recomendación escrita, ni de consejo alguno ofrecido, ninguna garantía en términos de comercialización o idoneidad para propósitos particulares, ni obligación alguna fuera de cualquier relación legal que pudiera existir. El usuario de los productos debe realizar las pruebas para comprobar su idoneidad de acuerdo al uso que se le quiere dar. Sika se reserva el derecho de cambiar las propiedades de sus productos. Los derechos de propiedad de terceras partes deben ser respetados. Todos los pedidos se aceptan de acuerdo a los términos de nuestras vigentes Condiciones Generales de Venta y Suministro. Los usuarios deben de conocer y utilizar la versión última y actualizada de las Hojas de Datos de Productos local, copia de las cuales se mandarán a quién las solicite, o también se puede conseguir en la página «www.sika.es».</p>



**OFICINAS CENTRALES
Y FABRICA**

Madrid 28108 - Alcobendas
P. I. Alcobendas
Carretera de Fuencarral, 72
Tels.: 916 57 23 75
Fax: 916 62 19 38

**OFICINAS CENTRALES
Y CENTRO LOGÍSTICO**

Madrid 28108 - Alcobendas
P. I. Alcobendas
C/ Aragoneses, 17
Tels.: 916 57 23 75
Fax: 916 62 19 38





The difference is measurable®

5960 Series | Dual Column Tabletop

5960 Series systems perform tensile, compression, bend, peel, tear, puncture, creep, and cyclic tests on all raw materials and finished goods. These testing instruments are engineered for precision, built for durability, and offer flexibility for changing requirements. They are designed with features that increase testing efficiency and improve the testing experience for the operator.

The performance and versatility of the 5960 Series systems makes them the industry standard throughout the biomedical, automotive, and electronics industries to test materials and products made from plastics, metals, elastomers, adhesives, biomedical devices, composites, textiles, and more. The wide variety of global testing applications has led us to offer multiple height and width systems in a range of maximum force capacities such as 5, 10, 30, and 50 kN.

Features

- Meets or exceeds requirements of all national and international standards; namely ISO, ASTM, BS, DIN, EN, and AFNOR
- Thousands of accessories to meet test requirements in almost any application or industry: biomedical, automotive, electronics, plastics, metals, composites, elastomers, aerospace, textiles, and many more
- Supported by the largest global Service organization in the industry; delivering high-quality calibrations, training, preventative maintenance, and technical support
- Productivity Panel with Live Display, Soft keys and Specimen Protect for enhanced usability and productivity



Bluehill® Universal and Instron® Connect

Designed from the ground up for touch, Instron's static testing software, Bluehill Universal, is easy-to-use, increases testing efficiency, and contains modular features that enable users to run the most complex of tests.

With ISO 9001 accreditation, our goal is to provide the best ownership experience by delivering the highest quality products, expert support, and world-class service. Instron Connect provides users with a powerful communication platform via a secure connection between the Instron system at your facility and Instron's global technical support engineers. With Instron Connect, users receive faster remote technical support, reduce risk with schedule verification and preventive maintenance reminders, and are effortlessly able to keep up to date with the latest software features.

Specifications

		5965	5966	5967	5969
Force Capacity ⁴	kN	5	10	30	50
	lbf	1125	2250	6750	11250
Vertical Test Space ^{3,8}	mm	1256 (E1)	1256 (E1)	1212 (E1)	1212 (E1)
		1756 (E2)	1756 (E2)	1712 (E2)	1712 (E2)
	in	49.4 (E1)	49.4 (E1)	47.7 (E1)	47.7 (E1)
Horizontal Test Space ⁴	mm	418	418	418 (F1)	418
	in	16.4	16.4	16.4 (F1)	16.4
Testing Speed Range Min-Max (Return)	mm/min	0.001-3000 (3200)	0.001-1500 (1700)	0.001-1000 (1000)	0.001-600 (600)
	in/min	0.00004-120 (128)	0.00004-60 (67)	0.00004-40 (40)	0.00004-24 (24)
Position Control Resolution	nm	167	86	45	27
	µin	6.6	3.4	1.8	1.1
Frame Axial Stiffness	kN/mm	60	60	115 (F1)	180
	lb/in	342600	342600	75 (F2)	1027800
Maximum Force at Full Speed	kN	5	10	30	50
	lbf	1125	2250	6750	11250
Maximum Speed at Full Force	mm/min	3000	1500	1000	600
	in/min	120	60	40	24
Height	cm	163 (E1)	163 (E1)	163 (E1)	163 (E1)
		216 (E2)	216 (E2)	216 (E2)	216 (E2)
	in	64 (E1)	64 (E1)	64 (E1)	64 (E1)
Width ⁵	cm	78	78	78 (F1)	78
	in	31	31	128 (F2)	31
Depth	cm	73	73	73	73
	in	29	29	29	29
Weight	kg	146 (E1)	146 (E1)	192 (E1+F1),	250 (E1)
		161 (E2)	161 (E2)	210 (E2+F1),	273 (E2)
Maximum Power Requirement	VA	322 (E1)	322 (E1)	435 (E1+F2),	
		355 (E2)	355 (E2)	453 (E2+F2)	
	lbs	423 (E1+F1),		463 (E2+F1),	551 (E1)
		322 (E1)	322 (E1)	959 (E1+F2),	602 (E2)
		355 (E2)	355 (E2)	999 (E2+F2)	

Notes:

1. Meets or exceeds ASTM E4, BS 1610, DIN 51221, ISO 7500/1, EN 10002-2, JIS B7721, JIS B7733, and AFNOR A03-501 standards. Instron recommends that systems are verified on-site at the time of installation as required by ASTM E4 (par. 20.3) and ISO 7500-1 section 9) standards.
2. All systems conform to all relevant European standards and carry a CE mark.
3. Vertical test space on all systems is the distance from the top surface of the base platen to the bottom surface of the moving crosshead, excluding load cell grips and fixtures.
4. Horizontal test space on dual column systems is the distance between the inside edge of the columns.
5. This is the system footprint width. The Operator Dashboard monitor may add 300mm (12in) to the overall width of the frame.
6. These specifications were developed in accordance with Instron's standard procedures and are subject to change without notice.
7. Extra-high or wide load frames and extra-high or low speed drive systems are also available. Contact your nearest Instron office for details.
8. F2 width option on 5967 uses a thicker crosshead and base beam reducing vertical test space by 10mm

Common Specifications

Force Measurement Accuracy:

± 0.4% of reading down to 1/100 of load cell capacity with 2525, 2530 or 2580 Series load cells; ± 0.5% of reading down to 1/1000 of load cell capacity with 2580 Series load cells (with Advanced Performance Option); ± 0.5% of reading down to 1/500 of load cell capacity with 2580 Series load cells; ± 0.5% of reading to 1/250 of load cell capacity with 2525 or 2530 Series load cells. ¹

Displacement Measurement Accuracy:

±0.01 mm or 0.05% of displacement (whichever is greater)

Strain Measurement Accuracy:

Meets or surpasses the following standards: ASTM E83, ISO 9513, and EN 10002-4.

Testing Speed Accuracy:

(Zero or constant load): ±0.1% of set speed

Data Acquisition Rate at the PC:

Up to 2.5 kHz (Advanced option) simultaneous on force, displacement, and strain channels, 1 kHz (Standard)

Facility Requirements and Operating Environment

Single Phase Voltage:

100, 120, 220, or 240 VAC ±10%, 47 to 63 Hz. Power supply must be free of spikes, surges or sags exceeding 10% of the average voltage.

Operating Temperature:

+10 to +38 °C (+50 to +100 °F)

Storage Temperature:

-40 to +66 °C (-40 to +150 °F)

Humidity Range:

+10 to +90%, non-condensing

Atmosphere:

Designed for use under normal laboratory conditions. Protective measures may be required if excessive dust, corrosive fumes, electromagnetic field, or hazardous conditions are encountered.

www.instron.com



Worldwide Headquarters
825 University Ave, Norwood, MA 02062-2643, USA
Tel: +1 800 564 8378 or +1 781 575 5000

European Headquarters
Coronation Road, High Wycombe, Bucks HP12 3SY, UK
Tel: +44 1494 464646