

**UNIVERSITAT
JAUME I**

UNIVERSITAT JAUME I

**ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA I CIÈNCIES EXPERIMENTALS
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

***ESTUDIO SOBRE LA CARACTERIZACIÓN
MECÁNICA DE LAS BOBINAS DE ALAMBRE
UTILIZADAS EN LA FABRICACIÓN DE MUELLES***

TRABAJO FIN DE GRADO

AUTOR/A

Carlos García Arbeloa

DIRECTORA

Marta Covadonga Mora Aguilar

Castellón, Septiembre de 2018

Título del trabajo:

Estudio sobre la caracterización mecánica de las bobinas de alambre utilizadas en la fabricación de muelles.

Organismo a los que se dirige:

- Universitat Jaume I (Castellón, España)
- Institut Clément Ader (Toulouse, Francia)
- Institut National des Sciences Appliquées (Toulouse, Francia)

Datos del proyectista:

- **Apellidos:** García Arbeloa
- **Nombre:** Carlos
- **DNI:** 20906683M
- **Dirección:** C/ Rafalafena nº41, 8ºA.
- **CP:** 12003
- **Localidad:** Castellón (España)
- **Teléfono:** (+34) 616215644
- **Dirección de correo electrónico:** carlos.garcia.arbeloa@gmail.com

Datos de la directora del TFG de la Universitat Jaume I:

- **Apellidos:** Mora Aguilar
- **Nombre:** Marta Covadonga
- **Teléfono:** 964 72 81 26
- **Dirección de correo electrónico:** mmora@uji.es
- **Área:** Ingeniería Mecánica
- **Departamento:** Ingeniería Mecánica y Construcción.

Datos del promotor del proyecto:

- **Apellidos:** Paredes
- **Nombre:** Manuel
- **Cargo de la persona en contacto:** Investigador, profesor y jefe del departamento de Ingeniería Mecánica del INSA.
- **Dirección de correo electrónico:** paredes@insa-toulouse.fr

Datos de la empresa:

- **Razón social:** Institut Clément Ader
- **Dirección:** 3, rue Caroline Aigle
- **Localidad:** Toulouse (Francia)
- **CP:** 31400
- **Teléfono:** +33 (0)5 61 17 10 07
- **Fax:** +33 (0)5 61 17 10 80
- **Coordenadas UTM:**
 - X: 378092.72515415476
 - Y: 4824438.220704963
 - Zona: 31
 - Hemisferio: Norte

Agradecimientos

Después de este periodo de prácticas tan enriquecedor, escribo este apartado de agradecimientos para finalizar mi trabajo de fin de grado. Ha sido un periodo de aprendizaje intenso, tanto a nivel científico como personal. Realizar este trabajo ha tenido un fuerte impacto en mí, y es por ello que me gustaría mencionar y agradecer a todas aquellas personas que me han ayudado y apoyado durante su desarrollo.

En primer lugar, quiero agradecer al equipo de investigación de Modelización de Sistemas y Microsistemas Mecánicos del Instituto Clément Ader de Toulouse el haberme acogido como uno más de ellos y por su confianza puesta en mí durante la estancia en dicha institución. Asimismo, agradecer a Manuel Paredes la oportunidad de formar parte del desarrollo de este proyecto, la ayuda prestada y su tiempo personal en la formación recibida. Gracias de todo corazón por enseñarme con tanto placer a disfrutar de esta profesión. Por otra parte, me gustaría agradecer también a mi directora Marta Covadonga Mora por velar por la buena realización de este proyecto. También a todos los profesores, que con sus enseñanzas y buena voluntad, me han hecho posible llegar hasta aquí. Definitivamente me habéis brindado todas las herramientas necesarias para completar mi trabajo de fin de grado satisfactoriamente. Por último, agradecer a Elisa Jiménez, Borja Guijarro, a mi familia y amigos todo su apoyo, sus sabios consejos y comprensión.

Finalmente, me gustaría dedicar este proyecto a Antonio Arbeloa y Vicente García, que por muy lejos que estén son y serán siempre una parte importante de mi motivación y carácter de superación.

Introducción

El grupo de modelización de sistemas y microsistemas mecánicos del Instituto Clément Ader de Toulouse (Francia) basa su actividad en el desarrollo de modelos y metodologías destinadas al estudio multidisciplinario de estructuras y sistemas mecánicos, desde la fase conceptual hasta la fase de verificación/predicción de su vida útil y/o de los acontecimientos accidentales. Dentro de este grupo, un equipo ha dirigido su campo de investigación hacia el estudio de los resortes, sus propiedades y características. [1]

Los resortes son piezas elementales en el funcionamiento de un gran número de máquinas. Entre sus funciones principales se encuentra la absorción de energía o cargas de choque. Un ejemplo claro es el del uso de resortes para la suspensión de vehículos que además, funcionan también como fuentes de energía, ejercen fuerza y absorben las vibraciones experimentadas por el sistema. Estos elementos deben fabricarse con altos estándares de calidad y con el material adecuado en base a la función que va a desempeñar. De lo contrario, se corre el riesgo de que el muelle no resista la fuerza aplicada y se rompa provocando la avería del sistema en el que está instalado. [2]

El trabajo expuesto consiste en realizar un estudio de las características y comportamientos mecánicos de diversas bobinas de alambre sometidas a diferentes ensayos de flexión.

Con el fin de presentar este proyecto, en primer lugar se establece la base teórica del estudio desarrollado y los requisitos de diseño del prototipo de ensayo de flexión que éste propone. Posteriormente, se explican con detalle los cálculos correspondientes al estudio analítico de este estudio. A su vez, por medio del programa Abaqus, se simulan diversos ensayos de flexión variando la geometría de la pieza analizada. A partir del análisis de los resultados proporcionados por el estudio numérico se comprueba si el modelo de ensayo mecánico propuesto proporciona la información suficiente para que sea posible conocer las características mecánicas de cualquier alambre.

Una vez se confirme la veracidad de las relaciones entre resultados proporcionados por el estudio numérico de los ensayos de flexión y tracción, se estudia el dimensionamiento relativo a una máquina que materialice el estudio. Consecutivamente, estas exigencias se ven recogidas en el diseño del prototipo de ensayo de flexión aplicable al contexto de fabricación industrial. Finalmente, se completa el estudio a partir de una base experimental constituida por diversos ensayos de flexión sobre alambres reales de diferentes diámetros.

Por consiguiente, si el fabricante aplica este método de estudio antes de configurar los parámetros de la máquina de enrollado para cada bobina, obtendrá un resorte con características exactas a las requeridas, reduciendo así las pérdidas económicas que conlleva la fabricación de muelles defectuosos o inadecuados.

ÍNDICE DE LOS CAPÍTULOS DEL PROYECTO

CAPÍTULO 1: MEMORIA	11
1 OBJETO	15
2 ALCANCE	17
3 ANTECEDENTES	18
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ENTIDAD	18
3.2 PRODUCCIÓN DE RESORTES	21
4 VIABILIDAD DEL PROYECTO	25
4.1.1 <i>Viabilidad técnica</i>	25
4.1.2 <i>Viabilidad legal</i>	25
4.1.3 <i>Viabilidad económica</i>	25
5 NORMAS Y REFERENCIAS	28
5.1 DISPOSICIONES LEGALES Y NORMAS APLICADAS	28
5.2 PROGRAMAS DE CÁLCULO	30
6 BIBLIOGRAFÍA	31
7 DEFINICIONES Y ABREVIATURAS	33
8 PLAN DE GESTIÓN DE CALIDAD	36
9 SITUACION DE PARTIDA	39
9.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL ESTUDIO.....	39
9.1.1 <i>Ensayo de tracción</i>	39
9.1.2 <i>Micro-ensayo de flexión Stolken & Evans (1998)</i>	41
9.1.3 <i>Ensayo de flexión</i>	43
9.2 REQUISITOS DE ESTUDIO Y DISEÑO	46
9.2.1 <i>Necesidades del cliente</i>	47
9.2.2 <i>Necesidades legales y de seguridad</i>	47
9.2.3 <i>Necesidades económicas</i>	47
9.2.4 <i>Necesidades de aplicación</i>	47
9.2.5 <i>Necesidades técnicas y de fabricación</i>	48
9.3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE DISEÑO	48
9.4 CONCEPTUALIZACIÓN DEL SISTEMA	50
10 ESTUDIO DE LAS ALTERNATIVAS	51
10.1 CONSTITUCIÓN DEL MODELO DE ESTUDIO	51
10.1.1 <i>Análisis numérico</i>	52
10.1.2 <i>Análisis de los resultados del estudio numérico</i>	57
10.1.3 <i>Estudio analítico</i>	61
10.1.4 <i>Análisis del diseño del prototipo</i>	63
10.2 DISEÑO DEL PROTOTIPO DE ENSAYO MECÁNICO DE FLEXIÓN	64
10.3 CONCEPCIÓN DEL CENTRADO DEL ALAMBRE DURANTE EL ENSAYO.	68
10.4 DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN TENSIÓN - DEFORMACIÓN	69
10.5 RESOLUCIÓN DE LA EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS PLANTEADAS	70
11 DESARROLLO DE LA ALTERNATIVA PROPUESTA	71
11.1 IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA 3D DEL ENSAYO DE FLEXIÓN EN 3 PUNTOS.	72

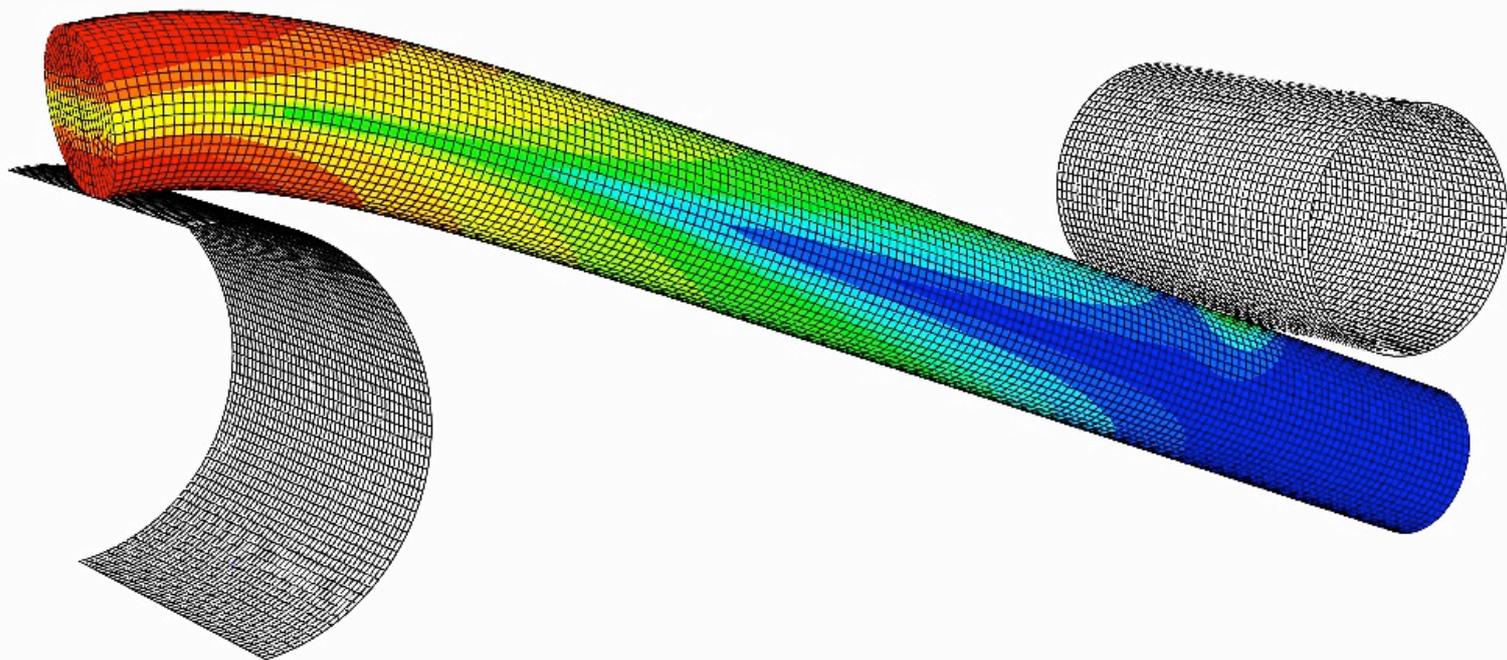
11.2	DIMENSIONAMIENTO DEL PROTOTIPO	76
11.3	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	82
11.3.1	<i>Descripción general</i>	82
11.3.2	<i>Instalación del mecanismo y procedimiento experimental</i>	82
11.3.3	<i>Resultados experimentales</i>	86
11.4	DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN TENSIÓN-DEFORMACIÓN.....	91
11.4.1	<i>Estudio analítico</i>	91
11.4.2	<i>Estudio numérico</i>	93
11.4.3	<i>Análisis de los resultados del estudio numérico</i>	94
11.5	CONCLUSIONES.....	100
12	BENEFICIOS DEL PROYECTO	101
13	PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO.....	102
13.1	GRADO DE CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS.....	104
13.2	SITUACIÓN ACTUAL Y TRABAJO FUTURO.....	105
14	ORDEN DE PRIORIDAD ENTRE LOS DOCUMENTOS.....	107
 CAPÍTULO 2: ANEXOS.....		109
ANEXO 1	CÁLCULOS DEL PLAN DE EXPERIENCIAS INICIAL	113
ANEXO 2	CÁLCULOS DEL PLAN DE EXPERIENCIAS DEL ALAMBRE DE 1,7 MILÍMETROS	116
ANEXO 3	CÁLCULO DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS ALAMBRES REALES.....	117
ANEXO 4	ESPECIFICACIONES DE LOS APARATOS PROPORCIONADOS POR ANDILOG TECHNOLOGIES.....	121
 CAPÍTULO 3: PLANOS		129
PLANO 0:	CONJUNTO DEL SISTEMA.....	133
PLANO 1:	SUBCONJUNTO 1	135
PLANO 1.1:	ESTRUCTURA	137
PLANO 1.2:	STUB D10X55.....	139
PLANO 1.3:	STUB D6.5X55.....	141
PLANO 1.4:	STUB D3X55.....	143
PLANO 1.5:	PLACA EN L.....	145
PLANO 2:	SUBCONJUNTO 2	147
PLANO 2.1:	APLICADOR DE ESFUERZO	149
PLANO 2.2:	EJE DEL DINAMÓMETRO	151
PLANO 2.3:	STUB D3X25.....	153
PLANO 2.4:	STUB D6.5X25.....	155
PLANO 2.5:	STUB D10X25.....	157
PLANO 3:	PLACA EN L ALTERNATIVA.....	159

CAPÍTULO 4: PLIEGO DE CONDICIONES	161
1 ALCANCE DEL PLIEGO DE CONDICIONES	165
2 CONDICIONES GENERALES DEL INSTITUTO	166
2.1 RESPONSABILIDAD	166
3 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE MATERIALES Y EQUIPOS.....	168
3.1 CONTROL DE CALIDAD	168
3.2 MATERIALES EMPLEADOS EN LA FABRICACIÓN	170
3.3 CONDICIONES DE MONTAJE Y EJECUCIÓN	173
4 CONDICIONES DE SEGURIDAD	174
4.1 ACCESO DEL PERSONAL AUTORIZADO AL INSTITUTO	174
4.2 HIGIENE DE LAS INSTALACIONES	174
4.3 PROTECCIÓN INTELECTUAL	174
4.4 INCUMPLIMIENTO DE LAS NORMAS	174
4.5 SANCIONES	175
CAPÍTULO 5: MEDICIONES Y PRESUPUESTO	177
1 ESTADO DE MEDICIONES	181
1.1 EQUIPOS.....	181
1.2 MATERIALES.....	181
1.3 ACCESORIOS	181
2 PRESUPUESTO DEL PROYECTO.....	182
2.1 PRESUPUESTO POR PARTIDAS	182
2.2 PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL.....	183
2.3 PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA	183
2.3.1 <i>Gastos generales</i>	183
2.3.2 <i>Beneficio industrial</i>	183
2.3.3 <i>Presupuesto de ejecución por contrata parcial</i>	183
2.3.4 <i>Presupuesto de ejecución por contrata</i>	184
3 VIABILIDAD ECONÓMICA.....	185
4 ESTUDIO ECONÓMICO.....	186
4.1 RENTABILIDAD ANUAL.....	186
4.2 PERIODO DE RETORNO (PAY-BACK).....	186



**UNIVERSITAT
JAUME•I**

***ESTUDIO SOBRE LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE
LAS BOBINAS DE ALAMBRE UTILIZADAS EN LA
FABRICACIÓN DE MUELLES***



Capítulo 1: MEMORIA

Institut Clément Ader de Toulouse – Septiembre de 2018

➤ Carlos García Arbeloa

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1	OBJETO	15
2	ALCANCE	17
3	ANTECEDENTES	18
3.1	DESCRIPCIÓN DE LA ENTIDAD	18
3.2	PRODUCCIÓN DE RESORTES	21
4	VIABILIDAD DEL PROYECTO	25
4.1.1	<i>Viabilidad técnica</i>	25
4.1.2	<i>Viabilidad legal</i>	25
4.1.3	<i>Viabilidad económica</i>	25
5	NORMAS Y REFERENCIAS	28
5.1	DISPOSICIONES LEGALES Y NORMAS APLICADAS	28
5.2	PROGRAMAS DE CÁLCULO	30
6	BIBLIOGRAFÍA	31
7	DEFINICIONES Y ABREVIATURAS	33
8	PLAN DE GESTIÓN DE CALIDAD	36
9	SITUACION DE PARTIDA	39
9.1	FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL ESTUDIO.....	39
9.1.1	<i>Ensayo de tracción</i>	39
9.1.2	<i>Micro-ensayo de flexión Stolken & Evans (1998)</i>	41
9.1.3	<i>Ensayo de flexión</i>	43
9.2	REQUISITOS DE ESTUDIO Y DISEÑO	46
9.2.1	<i>Necesidades del cliente</i>	47
9.2.2	<i>Necesidades legales y de seguridad</i>	47
9.2.3	<i>Necesidades económicas</i>	47
9.2.4	<i>Necesidades de aplicación</i>	47
9.2.5	<i>Necesidades técnicas y de fabricación</i>	48
9.3	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE DISEÑO	48
9.4	CONCEPTUALIZACIÓN DEL SISTEMA	50
10	ESTUDIO DE LAS ALTERNATIVAS	51
10.1	CONSTITUCIÓN DEL MODELO DE ESTUDIO	51
10.1.1	<i>Análisis numérico</i>	52
10.1.2	<i>Análisis de los resultados del estudio numérico</i>	57
10.1.3	<i>Estudio analítico</i>	61
10.1.4	<i>Análisis del diseño del prototipo</i>	63
10.2	DISEÑO DEL PROTOTIPO DE ENSAYO MECÁNICO DE FLEXIÓN	64
10.3	CONCEPCIÓN DEL CENTRADO DEL ALAMBRE DURANTE EL ENSAYO	68
10.4	DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN TENSIÓN - DEFORMACIÓN	69
10.5	RESOLUCIÓN DE LA EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS PLANTEADAS	70
11	DESARROLLO DE LA ALTERNATIVA PROPUESTA	71
11.1	IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA 3D DEL ENSAYO DE FLEXIÓN EN 3 PUNTOS	72
11.2	DIMENSIONAMIENTO DEL PROTOTIPO	76

11.3	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	82
11.3.1	<i>Descripción general</i>	82
11.3.2	<i>Instalación del mecanismo y procedimiento experimental</i>	82
11.3.3	<i>Resultados experimentales</i>	86
11.4	DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN TENSIÓN-DEFORMACIÓN.....	91
11.4.1	<i>Estudio analítico</i>	91
11.4.2	<i>Estudio numérico</i>	93
11.4.3	<i>Análisis de los resultados del estudio numérico</i>	94
11.5	CONCLUSIONES.....	100
12	BENEFICIOS DEL PROYECTO	101
13	PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO.....	102
13.1	GRADO DE CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS.....	104
13.2	SITUACIÓN ACTUAL Y TRABAJO FUTURO.....	105
14	ORDEN DE PRIORIDAD ENTRE LOS DOCUMENTOS.....	107

1 OBJETO

El objeto del siguiente proyecto se basa en desarrollar un método de caracterización mecánica aplicable de forma directa a las bobinas de alambre empleadas en la fabricación de muelles. Para ello se propone un prototipo de ensayo mecánico, sustitutivo del ensayo de tracción, con el que conocer el comportamiento elástico y plástico de cualquier alambre y cuya aplicación es concebible en el ámbito industrial.

Con el fin de satisfacer el objeto propuesto, se estudian los objetivos del proyecto que se detallan a continuación:

1. Estudio bibliográfico de las características de los resortes y establecimiento de los requisitos de estudio.

El primer paso de este trabajo consiste en realizar una búsqueda bibliográfica acerca de los resortes y las características que los definen, así como de los diferentes mecanismos de caracterización de los materiales existentes y las bases teóricas sobre las que apoyar la investigación. Por último, se analizan las necesidades a satisfacer con el proyecto junto con los requisitos de diseño relativos al prototipo diseñado para la materialización del estudio.

2. Determinación de la ley de deformación experimental de un acero de referencia.

Se toma como punto de partida los resultados de un ensayo de tracción aplicado a una probeta de acero de uso general que constituye el acero de referencia que se estudia en la siguiente etapa del proyecto. A partir de estos datos, se llevan a cabo una serie de cálculos con el fin de determinar su ley de tensión-deformación. El conocimiento de dicha ley es necesaria para la futura modelización del ensayo de flexión mediante el programa de análisis numérico por elementos finitos Abaqus.

3. Realización de un plan de experiencias.

Una vez estudiada la ley de tensión-deformación del acero de base, variando las características mecánicas de dicho acero, se concibe un plan de experiencias de tipo 2³. Las características mecánicas de ocho aceros diferentes quedan catalogadas en el plan de experiencias planteado, información necesaria para poder analizar numéricamente los ensayos de flexión en 3 y en 4 puntos que se realizarán sobre los aceros a analizar.

4. Modelo aproximativo del ensayo de flexión.

A partir del programa Abaqus, los ensayos de flexión se modelan en 2D considerando los alambres como placas finas metálicas. De esta manera, se llega a una primera aproximación de este estudio evaluando si los resultados del ensayo de flexión proporciona información suficiente para estudiar mecánicamente los alambres. Asimismo, para dicha configuración se estudian dos ensayos de flexión distintos: se distingue entre el ensayo de flexión a 3 puntos y a 4 puntos. Una vez recopilados los resultados de ambas alternativas de estudio, se comparan y se establecen conclusiones en relación al tiempo de cálculo, precisión y facilidad de realización. Cabe indicar que se analizan los 8 aceros de los cuales se ha definido su ley de tensión-deformación en el plan de experiencias inicial.

5. Modelo 3D del ensayo de flexión.

Una vez estudiadas las configuraciones del ensayo de flexión sobre una placa fina metálica, se simula en Abaqus el ensayo de flexión sobre un alambre real. En este caso, el análisis por elementos finitos se configura de manera que los parámetros del modelo simulado se aproximen lo máximo posible a los de las condiciones reales experimentales. El estudio se realiza tanto para cada uno de los aceros indicados en el plan de experiencias, como para los aceros cuyas características vienen definidas en la norma DIN estándar (Acero DH y Acero Inox 302).

6. Dimensionamiento del prototipo de dispositivo de ensayo de flexión.

Con el fin de satisfacer las características de diseño que debe tener el prototipo dedicado a realizar los ensayos de flexión sobre alambres reales en el contexto industrial, se llevan a cabo una serie de cálculos analíticos. Este estudio analítico viene seguido de un análisis numérico con el fin de corroborar el dimensionamiento establecido del prototipo de dispositivo de ensayo de flexión en tres puntos.

7. Concepción de un prototipo destinado a realizar ensayos de flexión en 3 puntos aplicable en el contexto industrial.

El Instituto Clément Ader dispone de un banco de ensayos sobre el que se debe ensamblar el mecanismo destinado a realizar los ensayos de flexión sobre los alambres reales. Dicho banco consta de un dinamómetro para medir la fuerza aplicada sobre el alambre y de un dispositivo para recuperar los valores de desplazamiento vertical del cilindro que aplica la fuerza. Partiendo de este montaje de los requerimientos de diseño planteados y haciendo uso del programa CAD CATIAV5 se lleva a cabo el diseño y ensamblaje de las diferentes piezas que constituirán la máquina para el ensayo de flexión requerido.

8. Realización de diversos ensayos de flexión experimentales con el prototipo creado.

Una vez instalado el mecanismo de ensayo de flexión sobre el banco de ensayos, habiendo tenido en cuenta los requisitos de diseño estudiados en el análisis numérico y analítico, se puede medir la fuerza de deformación aplicada sobre cada alambre en función del desplazamiento vertical del dinamómetro.

9. Definición de la relación entre la curva Tensión-Deformación propia de un ensayo de tracción y la curva Fuerza-Desplazamiento obtenida en los ensayos de flexión.

Tras haber realizado los ensayos de flexión experimentales sobre el prototipo creado, se introduce un método aproximativo con el que es posible transformar la curva que describe el comportamiento de fuerza-desplazamiento, obtenido en cada ensayo de flexión, en la de tensión-deformación. Entonces, se llega al objeto propuesto de estudiar las características mecánicas de los alambres reales a través de la aplicación de un ensayo de flexión.

10. Análisis de los resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto.

El último objetivo propuesto consiste en determinar el grado de consecución del objeto del proyecto mediante el prototipo planteado a través del contraste de los resultados obtenidos de manera analítica, numérica y experimental. Finalmente, a modo de conclusión, se exponen las indicaciones sobre los aspectos a tratar por los futuros proyectistas para continuar el desarrollo y profundización de esta investigación.

2 ALCANCE

El ámbito de aplicación de este proyecto es la sección de Modelización de Sistemas y Microsistemas Mecánicos, dentro de la misma se centra en la optimización del uso de bobinas de alambre como recurso en el proceso de fabricación de resortes. Para ello, el proyecto se desarrolla de tal forma que su resultado pueda ser aplicado en la industria de fabricación de muelles.

El estudio tendrá como consecuencia la reducción de las pérdidas económicas que supone la fabricación de resortes defectuosos, así como la variación significativa que pueda darse entre el resorte final fabricado y el deseado al inicio del proceso. Esta situación viene provocada por una diferencia existente entre las características mecánicas de las bobinas de alambre proporcionadas por el proveedor y las reales propias de cada bobina de alambres. Fenómeno provocado por el hecho de aproximar las características mecánicas propias de una probeta normalizada sometida a un ensayo de tracción con las de una bobina de alambre de mismo material ya preparada para la fabricación de resortes.

La actividad principal del Instituto Clément Ader se focaliza en el estudio de estructuras, de sistemas y de procesos mecánicos para llegar a concebir mecanismos capaces de optimizar la amplia gama procesos industriales existentes hoy en día. Dicha actividad tiene como fin el reducir los recursos materiales desperdiciados así como las pérdidas de capital que pueda experimentar un proceso industrial, a la vez que trata de mejorar considerablemente el rendimiento del producto resultante.

3 ANTECEDENTES

3.1 Descripción de la entidad

El Instituto Clément Ader (ICA) de Toulouse (Francia), es un laboratorio relativamente joven, ya que fue creado el 30 de junio de 2009 mediante el agrupamiento de tres entidades, el LGMT (Laboratorio de Ingeniería Mecánica de Toulouse INSA-UPS), el CROMeP (Centro de Investigación de Herramientas, Materiales y Procesos del ENSTIMAC), y el DMSM (Departamento Mecánico de Estructuras y Materiales del ISAE (Instituto Superior de Aeronáutica y del Espacio)). El ICA cuenta con seis establecimientos asociados repartidos en tres ciudades de Francia de la siguiente manera.

- **En Toulouse:**

- El *Institut National des Sciences Appliquées (INSA)*: La docencia en el INSA se apoya mucho en el alto nivel de los laboratorios para que los estudiantes desarrollen habilidades y que sepan imaginar y materializar nuevas tecnologías para el futuro. Creado en 1963, forma parte de una red nacional de seis escuelas de ingenieros INSA: Centre Val de Loire, Lyon, Rennes, Rouen, Strasbourg y un INSA internacional: INSA Euro-Méditerranée en Fès (Marruecos). [3]
- El *ISAE-SUPAERO* es líder mundial de la enseñanza superior en Ingeniería Aeroespacial. El centro dirige su enseñanza hacia la investigación e innovación, ofertando una gama muy completa de formaciones científicas de alto nivel. [4]
- La *Université Toulouse III – Paul Sabatier* es una de las primeras universidades francesas de renombre por su influencia científica, su gran diversidad de laboratorios y formaciones que propone dentro del campo de la ciencia, salud, deporte, tecnología e ingeniería. [5]
- El *Centro nacional de la investigación científica (CNRS)* es una de las instituciones de investigación más importantes a nivel mundial. Con el objetivo de hacer frente a los desafíos presentes y futuros, sus científicos exploran la materia, el Universo y el funcionamiento de las sociedades humanas. [6]

- **En Albi:**

- El *IMT Mines Albi* también es miembro asociado de la Universidad federal de Toulouse Midi-Pyrénées. Es una escuela de ingenieros generalistas, innovadora, humanista e internacional. La excelencia científica, aplicabilidad y pertinencia económica son el corazón de la investigación en el IMT Mines Albi. [7]

- **En Tarbes:**

- Desde hace más de 40 años, el *IUT de Tarbes* juega su rol de institución universitaria, pero además, ofrece acceso a cursos de Formación Continua con el fin de reforzar sus relaciones con el mundo laboral. Estas enseñanzas están dirigidas a aquellas personas que estén interesadas en completar su formación científica o técnica, mejorar su cualificación profesional, incorporarse al mercado laboral, reorientar su carrera y desarrollar habilidades y estrategias relacionadas con su proyecto profesional. [8]



Figura 1.1. Organismos de tutela del Instituto Clément Ader de Toulouse.

A continuación, se adjunta una imagen en la que se pueden observar dónde están situados geográficamente tanto el ICA como sus establecimientos asociados a lo largo de la región de Midi-Pyrénées (Francia).



Figura 1.2. Situación geográfica de los organismos relacionados con el ICA.

El ICA es un laboratorio de investigación focalizado en el estudio de estructuras, de sistemas y de procesos mecánicos. Sus sectores de actividad están bien relacionados con la industria mecánica, en particular con el sector aeronáutico, espacial, energético y de transporte. Sus trabajos de investigación se basan normalmente en la modelización del comportamiento, la instrumentación y el estudio de la durabilidad de las estructuras o productos considerados. Una parte importante de sus investigaciones trata sobre los materiales compuestos, los cuales ocupan un lugar importante hoy en día en las estructuras aeroespaciales.

El ICA está formado por unos 80 profesores investigadores, 20 investigadores temporales, 20 responsables administrativos, técnicos e ingenieros, 90 alumnos de doctorado, así como numerosos estudiantes en periodo de prácticas universitarias.

Los investigadores que forman parte del ICA de Toulouse, son a su vez profesores pertenecientes a cuatro grandes establecimientos asociados, tales como la UPS y el INSA pertenecientes al Ministerio de Enseñanza Superior de Investigación, la ISAE perteneciente al Ministerio de Defensa y Mines Albi perteneciente al Ministerio de Industria (Figura 1.1). A su vez, el personal que forma parte del ICA está repartido entre los tres lugares geográficos de la región de Midi-Pyrénées mencionados anteriormente (Albi, Tarbes y Toulouse) (Figura 1.2).

La dirección del instituto está compuesta de un director y dos directores adjuntos, que representan a los tres ministerios. Estos, que se encargan de la tutela del ICA, están representados por un equipo que gestiona el día a día del Instituto y aplica su política científica con la ayuda de un comité de dirección y un consejo de laboratorio. Por otra parte, el equipo compuesto por el personal administrativo, técnicos e ingenieros está organizado en tres grupos, uno por cada ministerio. Finalmente, cada grupo de investigación existente reúne al personal de cada institución, independientemente de su situación geográfica.

Adicionalmente, junto al grupo de investigación de Modelización de Sistemas y Microsistemas Mecánicos, el Instituto Clément Ader engloba otras unidades de investigación que realizan sus estudios dentro del marco de acción de la institución a la que pertenecen. Estos grupos adicionales son:

- Grupo MSC: Materiales y Estructuras Compuestas (*Matériaux et Structures Composites*).
- Grupo SUMO: Superficie, Fabricación, Materiales y Herramientas (*Surface, Usinage, Matériaux et Outillages*).
- Grupo MICS: Metrología, Identificación, Control e Inspección (*Métrologie, Identification, Contrôle et Surveillance*). [1]

A continuación se presenta una imagen que representa la vista satélite de las instalaciones del Instituto Clément Ader de Toulouse (Figura 1.3).

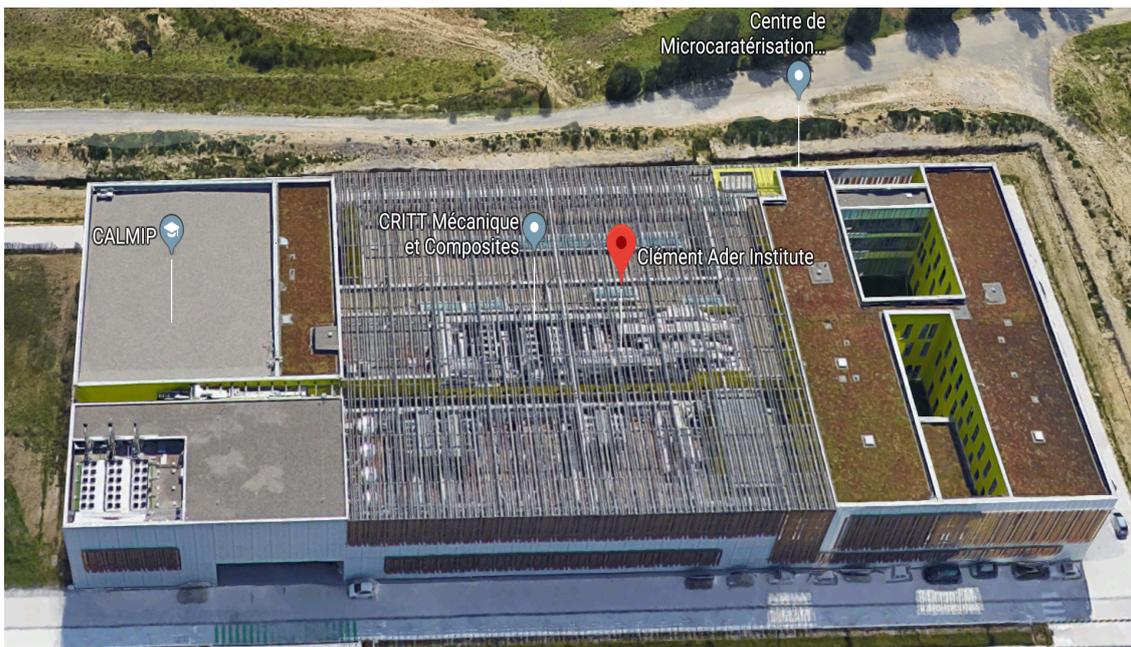


Figura 1.3. Vista aérea del Instituto Clément Ader de Toulouse.

3.2 Producción de resortes

En una gran cantidad de maquinaria y muchas aplicaciones en las cuales se registran muchos esfuerzos y vibraciones, es necesario que dichos esfuerzos sean absorbidos de tal manera que esta energía asimilada no afecte la infraestructura y la funcionalidad de las máquinas. Para ello se conciben los muelles, elementos mecánicos fabricados a partir de diversos materiales, capaces de absorber la energía proveniente de grandes esfuerzos y vibraciones por su gran capacidad de deformación elástica.

Producir un resorte requiere de un proceso tecnológico logrado de principio a fin por especialistas. El conjunto de procedimientos necesarios a realizar se agrupan en dos etapas generales:

Proceso de producción del alambre:

Actualmente el alambre es fabricado por medio de máquinas especializadas, las cuales son capaces de producir un alambre libre de imperfecciones. Los materiales que más se utilizan para fabricar el alambre son: el acero inoxidable, las aleaciones de níquel, plata, hierro, latón, cobre y aluminio. Se nombra alambre a todo tipo de hilo delgado producido a partir del estiramiento de diferentes materiales otorgándole ductilidad.

La fabricación del alambre se realiza a partir del proceso de laminado. Este proceso industrial consiste en la reducción del espesor o conformación de la sección transversal de planchas o barras, pasándolas por parejas de rodillos.

En algunos casos, el tamaño requerido no se puede obtener directamente de la laminadora. En ese caso, se emplea el proceso de trefilado. Este proceso consiste en reducir la sección transversal del elemento forzando su pasaje a través de un dado cónico mediante la aplicación de un esfuerzo mecánico sobre el material que se ubica a la salida del dado (Figura 3.4). Los tubos son revestidos con una solución que actúa como lubricante para reducir la fricción durante el proceso de embutición en frío. La producción del alambre se hace en máquinas continuas que contienen múltiples dados de trefilación (generalmente entre 4 y 12) separados por tambores de acumulación entre los dados en el que se embobina el alambre.

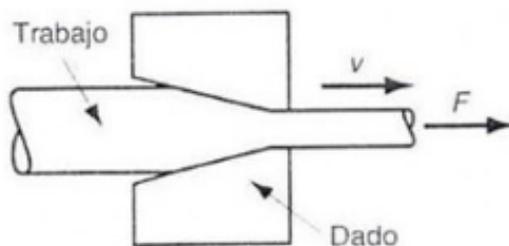


Figura 3.4. Detalle de reducción del diámetro del alambre por el proceso de trefilado.

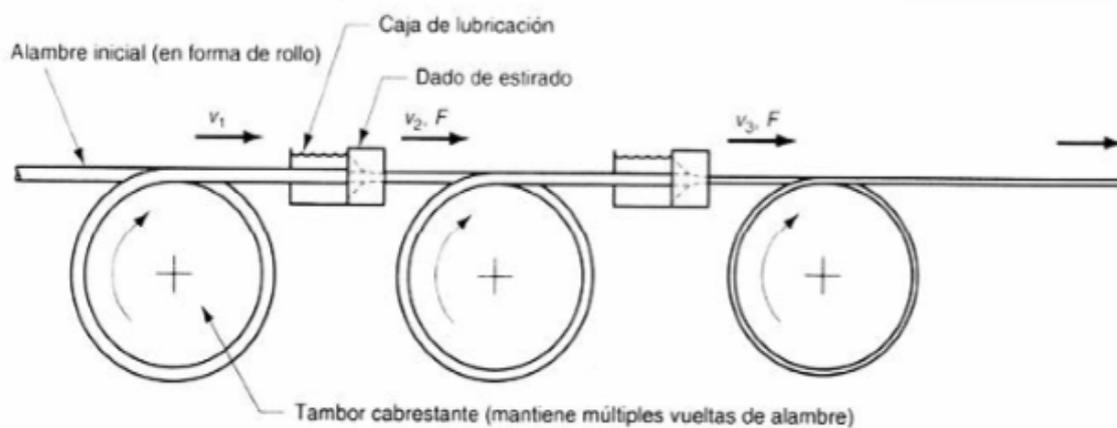


Figura 1.5. Proceso general de trefilado del alambre

Las altas deformaciones aplicadas al alambre pueden producir un estado hidrostático de tensión cerca de la línea central. Por lo que debe aplicarse un tratamiento de revenido al alambre ya conformado para liberar la energía de estas tensiones internas, aumentando la vida útil del alambre y reduciendo el riesgo de aparición de micro-roturas. Finalmente, el alambre es sujeto a limpieza e inspección técnica del cumplimiento de las especificaciones requeridas. Una vez aprobada la calidad del alambre se distribuye en forma de bobinas a las empresas demandantes de este producto.

Cuando se dispone de los rollos de alambre ya confeccionados se inicia la etapa de **producción del resorte**, la cual se divide en diversos procesos:

1. Enrollado en caliente.

Una vez que el alambre es cortado con la longitud requerida, se mete en un horno para aumentar su temperatura hasta 900°C. Posteriormente, una vez el alambre está suficientemente caliente, se introduce la pieza en la máquina de enrollado para conformar el muelle. Esta máquina ha de ser configurada previamente en función de las propiedades mecánicas del material a deformar y las características del muelle a conseguir (Figura 1.6).



Figura 1.6. Proceso de enrollado del alambre en caliente.

2. Templado.

En este proceso se endurece y consolida el material, en el caso de producción de muelles a partir de alambre, el acero. Para ello se enfría rápidamente el resorte de manera que se lleva su temperatura hasta 60°C.

3. Revenido.

En este punto se vuelve a calentar la pieza pero esta vez hasta que alcance los 400°C. El tratamiento de revenido tiene como fin reformar la disposición interna del acero, eliminar las tensiones internas provocadas por las operaciones anteriores y otorgar al alambre enrollado la elasticidad necesaria para convertirse en un muelle. Al final de este proceso debe desaparecer cualquier posibilidad de puntos de rotura dentro de la longitud del resorte.

4. Acabado.

A continuación se disparan micro-esferas de acero contra el resorte para eliminar la posibilidad de que existan micro-fisuras en el material, incrementando así la vida útil del muelle en un 100%.

5. Rectificado.

En función de las características requeridas del resorte a fabricar y de su futura utilización, las puntas de éste son rectificadas en plano. Hecho que otorga una mayor calidad al resultado del proceso de producción.

6. Prensado.

El resorte se comprime hasta que sus espiras se toquen, así se asegura que la pieza no modificará su altura durante su utilización. Esto impedirá que su forma ceda o se deforme.

7. Medición.

A continuación se establece el proceso de inspección al que se somete cada resorte fabricado. Éste se mide para que cumpla con las especificaciones de dimensión requeridas.

8. Pintura.

Finalmente, posterior a la inspección de medición, se pinta el resorte para dar un resultado más presentable y de mejor calidad de acabado. Además, la pintura constituye una capa protectora ante el óxido. [9]

Los fabricantes de muelles emplean alambres de los cuales, generalmente, el único dato que el proveedor proporciona es el valor mínimo de resistencia mecánica a la rotura. El conocimiento de otras propiedades mecánicas sería de gran utilidad para ajustar rápidamente los parámetros de las máquinas que, a partir de los cuales, deforman los alambres para fabricar los muelles.

En repetidas ocasiones se encuentran numerosos resortes defectuosos en la cadena de producción a pesar de haber sido fabricados a partir de las características mecánicas proporcionadas por el proveedor de la bobina de alambre. La principal razón de este fenómeno es que los valores correspondientes a las características mecánicas proporcionados por el proveedor son determinados a partir de un ensayo de tracción sobre una probeta normalizada de mismo material. Se puede constatar que existe una variación significativa entre las características mecánicas de la probeta normalizada y las del alambre fabricado con el mismo acero. Esto tiene como consecuencia un incremento de la posibilidad de avería de la máquina en la que dicho resorte se ha instalado.

Por lo tanto, surge la necesidad de conocer de manera exacta dichas características de cada bobina con el fin de reducir notablemente las diferencias mecánicas entre el resultado final del muelle y el calculado. De esta manera, se incrementaría la fiabilidad del muelle por lo que se reduciría el riesgo de fallo mecánico de un sistema causado por un comportamiento mecánico defectuoso de dicho resorte.

En un contexto industrial no es posible introducir ensayos estándares de tracción de manera directa sobre los alambres para obtener las características mecánicas buscadas al no presentar éstos la geometría de probeta normalizada que el ensayo requiere. Por ello se quiere concebir un método que caracterice directamente el alambre que se va a emplear en la fabricación del resorte, suprimiendo la necesidad de estudiar una probeta normalizada y la contratación de un operario con un grado de conocimiento considerable en el campo de ensayos mecánicos de tracción.

4 VIABILIDAD DEL PROYECTO

Con el fin de que el proyecto sea viable y se pueda llevar a cabo satisfactoriamente, se deben analizar varios aspectos, tales como las exigencias técnicas, legales y económicas. Así se podrá cuantificar los costes de cada elemento buscando la manera de simplificar su fabricación y de esta manera reducir los gastos económicos totales del proyecto para no sobrepasar el límite del presupuesto marcado por la institución.

4.1.1 Viabilidad técnica

En el aspecto técnico del dispositivo de ensayos de flexión a concebir, se tienen en cuenta que todos los componentes que lo forman tengan una fabricación lo más sencilla posible. De esta manera se evitan operaciones de fabricación y conformado muy complicadas que necesiten herramientas o máquinas especiales, mano de obra más cualificada y tiempos de trabajo más elevados. Se intenta llegar a una concepción del dispositivo que no requiera la necesidad de dirigirnos a empresas especializadas para cumplir con el proceso de producción.

También se trata de aumentar la utilización de piezas estandarizadas con las que se cumplan igualmente las exigencias técnicas marcadas al inicio del proyecto, ya que así se reduce el tiempo y los costes de fabricación.

4.1.2 Viabilidad legal

Con el fin de que el producto desarrollado sea viable en su legalidad, tanto su estudio como desarrollo debe cumplir la normativa específica vigente marcada por el Ministerio de Educación Nacional de la Enseñanza Superior y la Investigación francesa. De esta manera se siguen ciertas pautas y restricciones para desarrollar el estudio del proyecto y su posterior concepción en cuestión de requisitos de diseño. Ni que decir tiene que los materiales de los elementos que componen el mecanismo han de estar siempre dentro de la legalidad vigente.

4.1.3 Viabilidad económica

El límite de presupuesto marcado por el instituto de investigación para el desarrollo del prototipo es de 1.000 €, por lo que el coste de fabricación del producto debe encontrarse dentro de dicho rango. Los aspectos que se exponen a continuación ayudarán a que la parte económica se vea optimizada.

*Ver estudio de precio en el *Capítulo 5 Mediciones y Presupuesto*.

La financiación de I&D en Francia por las asociaciones territoriales es relativamente estable desde 2009. En 2014, estas asociaciones han invertido cerca de 1,3 millones de euros en la investigación y desarrollo tecnológico, superando en nivel de inversión de 2009, año marcado por el Plan de Reactivación Económica. (Figura 1.7).

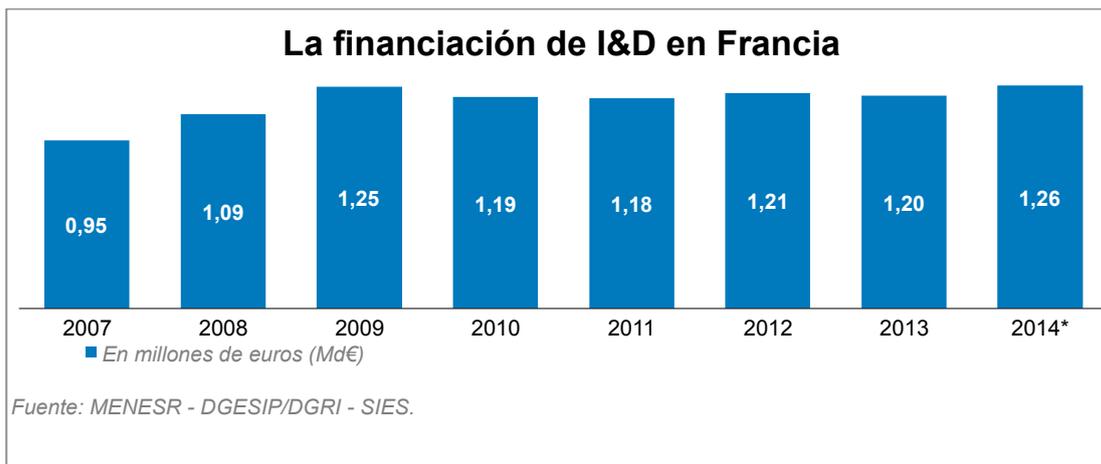


Figura 1.7. Evolución la financiación en I&D por parte de las asociaciones territoriales en Francia.

De esta manera, en 2013 las empresas que ejercen trabajos de I&D declararon haber recibido por parte de los colectivos territoriales más de 1 millón de euros para financiar sus trabajos de investigación científica. Este crecimiento puede relacionarse con el nuevo marco constitucional de 2003 y con la Ley del 13 de agosto de 2004 relacionada con las libertades y responsabilidades locales.

Las prioridades de esta financiación de I&D por parte de los colectivos territoriales se orientan hacia los bienes inmuebles y el desarrollo tecnológico. Las operaciones inmobiliarias absorbieron, en 2014, el 36% de la financiación. Los colectivos intervienen también en la construcción de laboratorios, universidades, empresas innovadoras e institutos de formación de investigadores. La segunda prioridad de los colectivos territoriales es dirigir la ayuda económica hacia el desarrollo industrial que representa el 30% de sus inversiones. Otras operaciones directamente relacionadas con el trabajo de investigación pública, los equipos usados en los laboratorios, el apoyo de diferentes proyectos de investigación y ayudas económicas otorgadas a los investigadores, representan en total el 30% de la financiación económica (Figura 1.8).

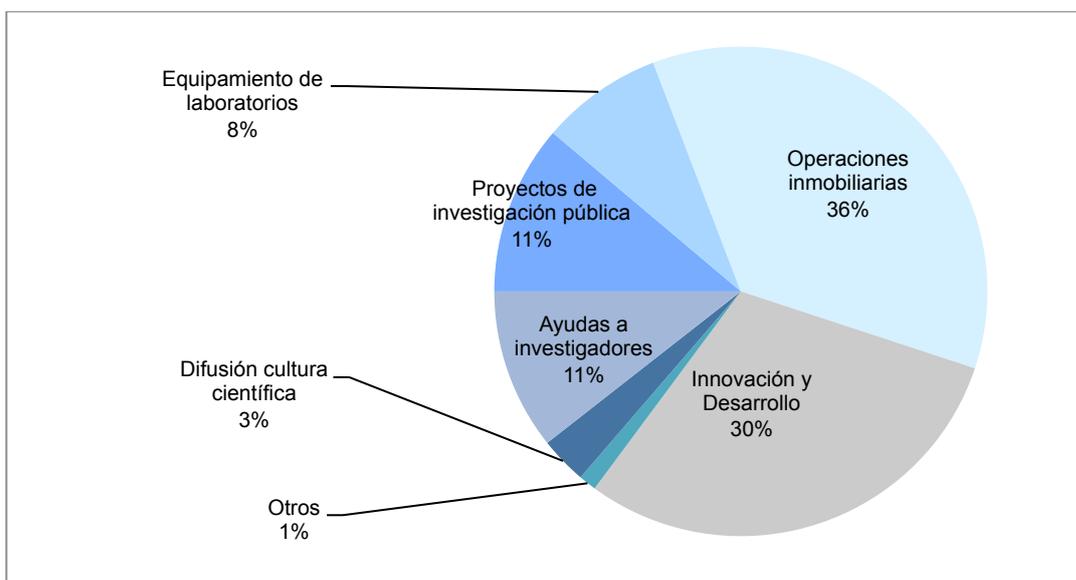


Figura 1.8. Distribución la financiación en I&D por parte de las asociaciones territoriales en Francia.

Por último, los estudios de la financiación económica de 2014 efectuados en cada región de Francia, muestran que la mitad de los territorios aportan más de 100 M€ a la I&D. Solo tres regiones invierten menos de 70 M€ a favor de la Investigación y Desarrollo tecnológico. En especial, en la región de Midi-Pyrénées donde se sitúa el Institut Clément Ader de Toulouse, se privilegia los proyectos de investigación de los laboratorios pertenecientes a instituciones públicas. A lo largo de 2014, en esta región, los esfuerzos a favor de la I&D es entre 15 y 20 €/hab. El resultado de esta financiación es un incremento importante en la apertura de nuevos campos de investigación y profundización en los mismos, así como la aparición de nuevos ingenieros investigadores y proyectos de investigación, situando a Francia entre los líderes de la innovación científica a nivel mundial (Figura 1.9). [10]

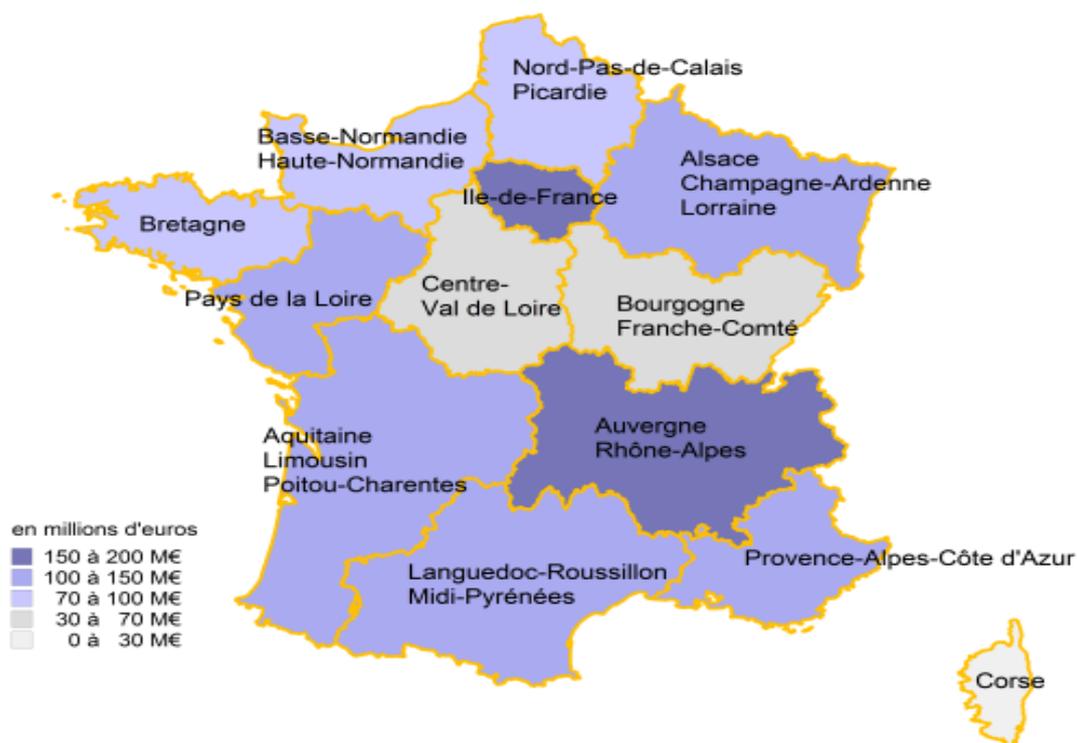


Figura 1.9. Financiación en I& registrada en 2014 en función de las regiones de Francia.

5 NORMAS Y REFERENCIAS

A continuación se detallan el conjunto de restricciones impuestas por leyes, reglamentos y normativas que ha sido necesario tener en cuenta a lo largo del desarrollo del proyecto.

1. Cumplimiento de la normativa y leyes regionales acerca de la investigación científica (Midi-Pyrénées).
2. Cumplimiento de la normativa y leyes nacionales que incumben a la investigación científica y procesos de fabricación de piezas (Francia).
3. Cumplimiento de los Global Procedure.
4. Cumplimiento de las Normas IP establecidas por la IEC (International Electrotechnical Commission)

5.1 Disposiciones legales y normas aplicadas

A continuación se nombran las normativas cuyo cumplimiento ha sido necesario para la correcta redacción y ejecución del proyecto.

Normativa relativa a las características de los resortes helicoidales de compresión:

- **DIN estándar.** Características límite de algunos materiales empleados en los resortes helicoidales de compresión (Acero DH y Acero Inox 302).

Normativa relativa a los ensayos de flexión:

- **UNE-EN ISO 7438:2016.** Especificaciones del método para determinar la habilidad de los materiales metálicos de sufrir los efectos de deformación plástica.
- **ASTM E290.** Especificaciones del ensayo de flexión aplicado a piezas planas metálicas.

Normativa relativa a la redacción de proyectos:

- **UNE 157001.2014.** Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico.
- **UNE-ISO 21500:2012.** Orientación sobre la gestión de proyectos. Proporciona un alto nivel de descripción de los conceptos y procesos que se consideran para formar buenas prácticas en la gestión de proyectos.
- **UNE 66916.2003.** Sistemas de gestión de la calidad. Proporciona las directrices necesarias para la gestión de la calidad de los proyectos técnicos.

Normativa relativa a la realización de planos:

- **UNE 1032:1982.** Dibujos técnicos. Principios generales de representación.
- **UNE 1039.** Dibujos técnicos. Acotación. Principios generales, definiciones, métodos de ejecución e indicaciones especiales.
- **UNE 1135:1989** Dibujos técnicos: Lista de elementos (**ISO 7573:1983**).
- **UNE-EN ISO 5455:1996.** Dibujos Técnicos. Escalas.

- **UNE-EN ISO 5456-1.** Dibujos técnicos. Métodos de proyección. Parte 1: Sinopsis. (ISO 5456-1:1996).
- **UNE-EN ISO 5456-2.** Dibujos técnicos. Métodos de proyección. Parte 2: Representaciones ortográficas. (ISO 5456-2:1996).
- **UNE-EN ISO 5456-3.** Dibujos técnicos. Métodos de proyección. Parte 3: Representaciones axonométricas. (ISO 5456-3:1996).
- **UNE-EN ISO 5456-4:2002.** Dibujos técnicos. Métodos de proyección. Parte 4: Proyección central
- **UNE-EN ISO 5457:2000.** Documentación técnica de producto. Formatos y presentación de los elementos gráficos de las hojas de dibujo. (ISO 5457:1999).
- **UNE-EN ISO 6433:1996.** Dibujos técnicos: Referencia de los elementos (**ISO 6433:1981**)
- **UNE-EN-ISO 7200:2004.** Gestión de bloques de títulos.
- **UNE 82100-0.** Magnitudes y unidades. Parte 0: Principios generales.
- **UNE-EN ISO 11442-1.** Documentación técnica de productos. Gestión de la información técnica asistida por ordenador. Parte 1: Requisitos de seguridad. (**ISO 11442-1:1993**).
- **UNE-EN ISO 11442-2.** Documentación técnica de productos. Gestión de la información técnica asistida por ordenador. Parte 2: Documentación original. (**ISO 11442-2:1993**).
- **UNE-EN ISO 11442-3.** Documentación técnica de productos. Gestión de la información técnica asistida por ordenador. Parte 3: Fases del proceso de diseño de productos. (**ISO 11442-3:1993**).

Normativa relativa al Instituto de investigación Clément Ader de Toulouse y a su acción de investigación científica.

Tanto su organización como funcionamiento viene regida por el conjunto de decretos, normativas y modificaciones, relacionados con la investigación científica que establece:

- El Ministerio de Educación Nacional de la Enseñanza Superior y la Investigación francesa.
- El Comité Nacional de Investigación Científica.

Este conjunto de reglamentos se ven enmarcados en el “Journal Officiel de la République Française” el cual se publica cada día de la semana a excepción de los lunes y recoge todos los acontecimientos legislativos (leyes), órdenes ministeriales, decretos, declaraciones oficiales y publicaciones legales de la República Francesa.

Normativa ambiental:

- **Ley de programa del 13 de julio de 2005**, por la que se fijan las orientaciones de la política energética.

- **Ley N° 2005-205, del 1° de marzo de 2005**, introduce en Francia la carta del medio ambiente. En ella se enumeran en diez artículos los derechos y deberes en materia de medio ambiente, cuyos principios generales, versan sobre los principios de precaución, de acción preventiva y de corrección.
- **UNE-EN ISO 14001**. Certificación de sistema de gestión ambiental.
- **UNE-EN ISO 9001**. Sistemas de gestión de la calidad.
- **OHSAS 18001**. Occupational Health & Safety.

5.2 Programas de cálculo

A continuación se exponen los diferentes programas empleados a lo largo del desarrollo del proyecto en función de las tareas para las cuales han sido empleados.

Dimensionamiento del prototipo:

- **Excel**: la hoja de cálculo que nos ofrece este programa ha servido para realizar el estudio analítico que se expone en este documento. A su vez, también ha sido usado para generar una base de datos con los aceros estudiados, los requisitos de diseño que debe presentar el prototipo a concebir y representar gráficamente los resultados obtenidos.
- **Abaqus**: a partir de este programa de análisis por elementos finitos ha sido posible dimensionar el sistema dedicado a la realización de ensayos de flexión en alambres reales. Se han llevado a cabo varios ensayos de flexión virtuales sobre alambres de diferentes características para comprobar que el prototipo resistirá bajo las condiciones reales de aplicación sin experimentar pérdidas de sus capacidades funcionales. Mediante las simulaciones se puede estudiar si el modelo servirá para el propósito para el que se ha creado, sin necesidad de realizar prototipos previos, con el consiguiente ahorro de tiempo y dinero que esto supone. A su vez, estas simulaciones pueden servir para obtener información acerca de que el sistema no proporcione todo su potencial.

La filosofía de diseño que se ha seguido ha sido potenciar al máximo la etapa de análisis y estudio teórico de forma que los ensayos sobre los alambres sean una mera comprobación de la bondad de los resultados teóricos.

A partir del análisis realizado mediante estas dos herramientas, se ha podido evitar la concepción de un sistema infradimensionado o sobredimensionado. De esta manera se ha obtenido un sistema justamente dimensionado que realiza a la perfección el trabajo para el cual ha sido concebido sin perder su funcionalidad.

Concepción del prototipo:

- **Catia V5**: Se ha empleado este programa de diseño asistido por ordenador para diseñar los componentes que forman el prototipo de ensayos de flexión. Así como para estudiar el ensamblaje del sistema y obtener los planos explicativos de cada componente siguiendo las normativas de diseño previamente expuestas.

El gran volumen de archivos que ha supuesto tanto el estudio analítico, como el numérico o el diseño del dispositivo mecánico, ha necesitado de una gestión responsable de localización y almacenamiento de estos archivos.

6 BIBLIOGRAFÍA

Se presentan las páginas consultadas en internet que han servido para la elaboración del Proyecto.

- [1] Página web del Instituto ClémentAider. Fuente: <http://institut-clement-ader.org/>
- [2] Información sobre muelles. Fuente: <https://rehisaresortes.mx/que-materiales-utilizan-los-resortes/>
- [3] Página web del INSA de Toulouse. Fuente: <http://www.insa-toulouse.fr/fr/index.html>
- [4] Página web del ISAE-SUPAERO. Fuente: <https://www.isae-superaero.fr/fr/isae-superaero/1-isae-superaero-206/>
- [5] Página web de la UPS de Toulouse. Fuente: <http://www.univ-tlse3.fr/accueil-+/>
- [6] Página web del CNRS. Fuente: <http://www.cnrs.fr/fr/le-cnrs>
- [7] Página web del IMT Mines Albi. Fuente: <https://www.imt-mines-albi.fr/fr>
- [8] Página web del IUT de Tarbes. Fuente: <http://www.iut-tarbes.fr/L-IUT-de-Tarbes-en-48-pages.html>
- [9] Proceso de fabricación de los muelles. Fuente: <http://www.alcortamendizabal.com/proceso/>
- [10] La financiación de I&D por los colectivos territoriales en Francia. Fuente: http://cache.media.enseignementsup-recherche.gouv.fr/file/2016/52/4/NF16-02_COLLTERR_V3_538524.pdf
- [11] Extracto del artículo científico “A microbend test method for measuring the plasticity length scale” (J. S. Stölken, A. G. Evans). Fuente: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645498001530?via%3Dihub>
- [12] Determinación de las propiedades a flexión. Fuente: <http://plasturgiejp.free.fr/Laboratoire/Comportement%20m%E9canique/Flexion/Cours-flexion%20iso178.pdf>

Páginas web de consulta general para la redacción del proyecto:

- Dibujo técnico. Interpretación gráfica para la formación profesional. Fuente: <https://ibiguridt.wordpress.com/temas/conjunto/>
- Manual del programa Abaqus. Fuente: <http://abaqus.software.polimi.it/v6.14/index.html>
- <https://www.obs-edu.com/int/blog-investigacion/project-management/que-es-la-calidad-en-un-proyecto>
- <https://www.recursosenprojectmanagement.com/plan-de-calidad-de-un-proyecto/>
- Noción de los planes de experiencias. <https://www.rocq.inria.fr/axis/modulad/numero-34/Goupy-34/goupy-34.pdf>
- Introducción a los planes de experiencias. GOUPY Jacques «Introduction aux Plans d'expériences». Dunod. Paris. 303 pages. (2001).

- Ensayo de tracción.
https://jmcacer.webs.ull.es/CTMat/Practicas%20Laboratorio_archivos/traccion.pdf

Páginas web acerca de las características de los materiales empleados en el proyecto:

- <http://metacrilato.makinolo.com/web2.html>
- <https://www.mwmaterialsworld.com/es/materiales/metacrilato-y-policarbonato/plancha-de-metacrilato-transparente-cristal.html>

Páginas web referentes a la relación entre el comportamiento Fuerza-Desplazamiento y Tensión-Deformación:

- <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6863/11Sf11de14.pdf>
- http://www.eis.uva.es/reic/Elas_Web/teoria/ELAS4_breve.pdf
- https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250131/2012/Elasticitat-Plasticitat.pdf
- http://manardb.free.fr/Casa-trotter/Nidaplast/Resistance_en_flexion.pdf

7 DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

En este apartado se presenta la explicación de algunos de los conceptos a los que se hace alusión y que no aparecen de manera explícita cuando se nombran en los diversos apartados a lo largo de este documento. Es importante tener claro estos conceptos para conseguir una mayor comprensión de los procesos y objetivos a los que se llega en el proyecto.

Conceptos generales relativos al Proyecto:

- **ICA:** Institut Clément Ader de Toulouse.
- **MS2M:** Modelización de Sistemas y Microsistemas Mecánicos.
- **MNESR:** Ministerio de Educación Nacional de la Enseñanza Superior y la Investigación de la República Francesa (*Ministère de l'Éducation et l'Enseignement Supérieur et de la Recherche*).
- **Resorte / Muelle:** Se le conoce como resorte o muelle a un operador elástico doblado en espiral capaz de almacenar energía y desprenderse de ella sin sufrir deformación permanente cuando cesan las fuerzas o la tensión a las que es sometido. Sin muelles y resortes, no importa qué diseño, ningún sistema mecánico o mecatrónico funcionaría.
- **Alambre:** Filamento generalmente metálico empleado en el proceso de enrollado para la fabricación de los muelles.
- **Bobina de alambre:** Cilindro de alambre que se encuentra arrollado sobre un tubo de cartón, metal u otro material. Sistema de almacenaje y distribución del alambre.
- **Metacrilato (PMMA):** El Metacrilato es un polímero termoplástico amorfo que se puede encontrar en dos formatos, extruido y en colada. Su nombre completo es Polimetil Metacrilato y su abreviatura es PMMA.
- **100Cr6:** Acero empleado en la fabricación de herramientas.
- **Acero DH:** Acero de alta densidad empleado en la fabricación de alambres.
- **Ensayo mecánico de tracción:** Forma básica de obtener información sobre el comportamiento mecánico de los materiales. Mediante una máquina de ensayos se deforma una muestra o probeta del material a estudiar, aplicando la fuerza uniaxialmente en el sentido del eje de la muestra. El resultado es una curva de carga frente a alargamiento, que transformados en tensión y deformación, en función de la geometría de la probeta ensayada, aportan una información más general.
- **Ensayo mecánico de flexión en 3 puntos:** El ensayo de flexión de 3 puntos sirve para la determinación de valores característicos de las características de flexión y también para la evaluación visual del canto de flexión. La probeta tiene 3 puntos de contacto con el mecanismo de ensayo.
- **Ensayo mecánico de flexión en 4 puntos:** Difiere del anterior en que en este caso la probeta presenta 4 puntos de contacto con el mecanismo de ensayo.

- **Plan de experiencias:** Permiten organizar lo mejor posible los ensayos que acompañan una investigación científica o estudios industriales. Son aplicables a numerosas disciplinas y a todas las industrias a partir del momento en que se busca la relación que existe entre una magnitud Y de interés, y variables, X_i .
- **Banco de ensayos:** plataforma para la experimentación de proyectos cuyo desarrollo está protegido de los riesgos de las pruebas en un ambiente de producción. Los bancos de pruebas brindan una forma de comprobación rigurosa, transparente y repetible de teorías científicas, elementos computacionales, y otras nuevas tecnologías.
- **Dinamómetro:** Instrumento de medida empleado para determinar la fuerza o el peso que tienen los objetos. En este proyecto se empleará para medir la fuerza de deformación aplicada sobre el alambre en los ensayos de flexión.
- **Difusión de las características elástico-plásticas:** fenómeno que se identifica con la variación de las propiedades mecánicas existente entre dos bobinas de filamentos de mismo material y geometría.
- **Análisis numérico:** Rama de las matemáticas encargada de crear algoritmos para que, a través de números y reglas matemáticas simples, basándose en éstos se puedan simular procesos matemáticos más complejos aplicados a procesos existentes en la realidad. Este modelo de estudio se lleva a cabo con la ayuda de programas de análisis de elementos finitos como Abaqus.
- **Análisis analítico:** Método de la investigación que consiste en emplear expresiones matemáticas para estudiar el comportamiento físico de un sistema real.
- **Análisis experimental:** Método de estudio de un sistema recurriendo a un experimento controlado para determinar las características físicas de su comportamiento y establecer relaciones entre las variables de interés.

Características mecánicas de los materiales:

- **Módulo de Young (E) o módulo de elasticidad:** Constante que representa la relación entre la tensión y la deformación producida dentro de la zona elástica.
- **Ley de Hooke:** Las deformaciones producidas en un elemento resistente son proporcionales a la fuerza que lo producen ($\sigma = E * \varepsilon$).
- **Límite elástico (σ_e):** Punto de la gráfica de tensión-deformación que representa el nivel de tensiones máximo que puede soportar un material sin sufrir deformaciones permanentes.
- **Resistencia a la tracción / Resistencia última a la tracción (σ_m):** Representa el valor máximo de tensión que puede soportar un material sin romperse.
- **Elongación:** Magnitud que mide el aumento de longitud que tiene un material cuando se le somete a un esfuerzo de tracción antes de producirse su rotura.
- **Estricción:** Reducción de la sección de la probeta que se observa al final del ensayo de tracción.
- **Dureza:** Oposición que ofrecen los materiales a alteraciones físicas como la penetración, la abrasión y el rayado

- **Tenacidad:** Medida de la cantidad de energía que un material puede absorber antes de fracturarse.
- **Ductilidad:** La ductilidad es la capacidad que presentan los materiales en deformarse sin romperse. Aunque los materiales dúctiles también pueden llegar a romperse bajo el esfuerzo adecuado, esta rotura sólo se produce tras producirse grandes deformaciones.
- **Fragilidad:** La fragilidad se relaciona con la cualidad de los objetos y materiales de romperse con facilidad. Aunque técnicamente la fragilidad se define más propiamente como la capacidad de un material de fracturarse con escasa deformación.

8 PLAN DE GESTIÓN DE CALIDAD

El plan de calidad de un proyecto es uno de los documentos importantes a desarrollar durante la fase de planificación. Cuando se habla de calidad en dirección de proyectos se trata del grado de cumplimiento que este tiene respecto a sus requisitos. En este sentido es importante remarcar que se considera que un proyecto no cumple con los requisitos tanto cuando no llega a conseguir estos, como cuando los excede. Estos requisitos se diferencian de la siguiente manera:

- **Requisitos del proyecto:** Son los relativos a la normativa interna, definida anteriormente, que el proyecto debe seguir. Es el departamento de proyectos del ICA quien determina estos requisitos y los hace comunes a todos los proyectos por el hecho de desarrollarse dentro de esta organización.
- **Requisitos del producto:** éstos engloban las características necesarias que debe presentar el producto final con el fin de satisfacer las necesidades del cliente expuestas en los “Antecedentes” del proyecto.

Es importante realizar un plan de gestión de calidad durante y después del proceso previo a la concepción final del producto si se quiere garantizar el éxito del proyecto. Para ello, una vez conocidos los objetivos y criterios de aceptación que afectan al proyecto, es necesario identificar todos los factores que intervienen en él negativamente aumentando la imprecisión y la probabilidad de concebir un mecanismo mal dimensionado. Si existe un error en el estudio previo a la concepción y durante el proceso de fabricación, se debe apartar el producto no conforme para evitar que llegue al cliente ya que no es posible asegurar un funcionamiento adecuado del mismo.

Entonces, tras haber catalogado dichos factores, es el momento de planificar las acciones que se llevarán a cabo durante la ejecución del proyecto para garantizar que estos no se producen y que se cumple con los objetivos y requisitos de diseño del mismo. Estas acciones que conciben el plan de calidad del proyecto se dividen en base a dos bloques, los cuales son la calidad preventiva y el control de la calidad.

En primer lugar, entre las acciones de calidad preventiva de este proyecto se encuentran principalmente los procesos de estudio analítico y numérico realizados sobre los diferentes alambres y componentes del dispositivo concebido. Entre estas acciones se encuentran:

- **Calidad de la normativa aplicable:** en un primer momento es necesario conocer la normativa que ha de cumplirse a lo largo de la totalidad del desarrollo del proyecto. Los aspectos tratados y las fronteras de este proyecto de investigación han de encontrarse siempre dentro del marco de competencias asociadas al grupo de investigación en el que se realiza el estudio (grupo MS2M). Seguidamente, en un nivel superior, dicho equipo de investigación ha de ceñirse a los límites presupuestarios y de acción que marca el Institut Clément Ader. Finalmente, la institución depende de la normativa estipulada por el Ministerio de Educación Nacional de la Enseñanza Superior y la Investigación de la República Francesa.
- **Calidad de los resultados analíticos:** todos los cálculos correspondientes al estudio analítico de cada apartado del proyecto se han repetido un mínimo de tres veces y revisado por el responsable del proyecto con el fin de garantizar el éxito del proyecto.

- **Calidad de las hipótesis seleccionadas:** todas las hipótesis seleccionadas a lo largo del proyecto, han de estar fundadas y provenir de fuentes fiables. Posteriormente, mediante los resultados finales obtenidos a los que se ha llegado empleando dichas hipótesis, se comprobará la veracidad de las mismas y su compatibilidad con el modelo estudiado.
- **Calidad de las simulaciones:** el estudio numérico de los elementos del dispositivo de ensayo de flexión y del funcionamiento del prototipo es de vital importancia para conseguir un dimensionamiento correcto del mismo. Por ello, se ha cuidado mucho la creación de los modelos de simulación tratando de afinar lo máximo posible el mallado de la zona más crítica del alambre a estudiar (Figura 1.10). Este recurso, junto con otros más como es el de crear particiones de las piezas que conforman nuestro modelo, se explica con mayor detalle en el apartado “5 Desarrollo de la alternativa propuesta”. Posteriormente, se contrastan cuantitativa y cualitativamente los resultados obtenidos de este estudio numérico con los obtenidos previamente en el análisis analítico.

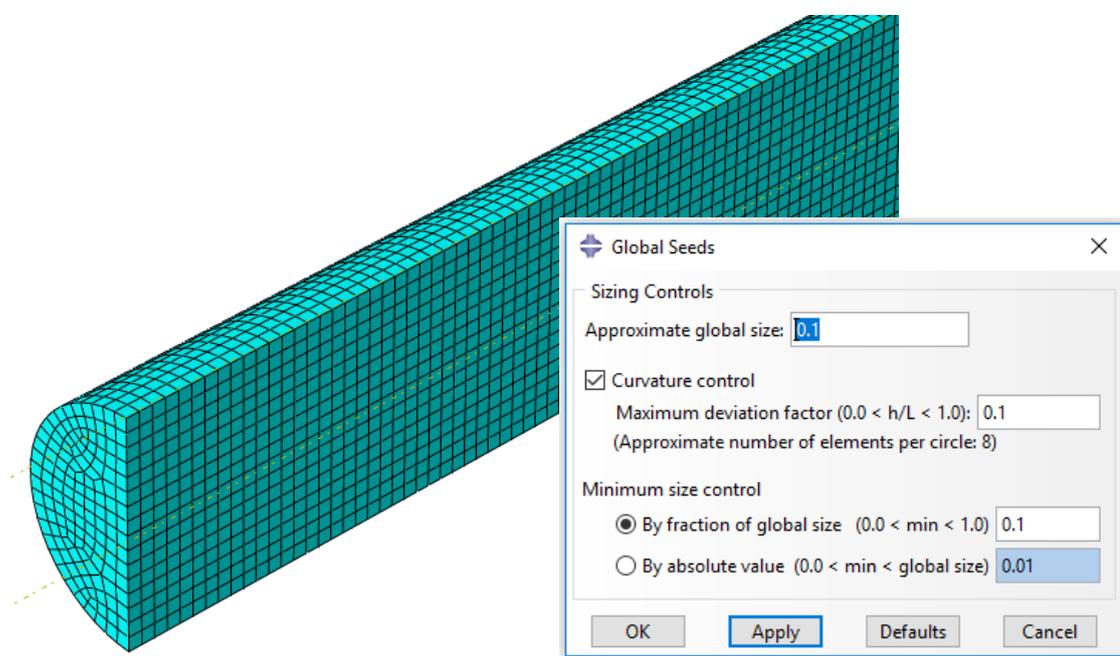


Figura 1.10. División en elementos finitos del alambre durante el estudio numérico.

Una vez finalizado el proceso de calidad preventiva, se concluye que se han desarrollado los planos de un sistema justamente dimensionado que realiza a la perfección el trabajo para el cual ha sido concebido sin perder su funcionalidad. Entonces, se puede pasar al proceso de fabricación de las piezas dimensionadas en las etapas anteriores.

En segundo lugar, se presentan a continuación las acciones llevadas a cabo en el control de calidad. Estas acciones se sitúan posteriormente al proceso de fabricación de las piezas que constituyen el prototipo a desarrollar.

- **Control del resultado del proceso de fabricación:** con la ayuda del departamento de metrología del instituto de investigación se ha realizado el control de las dimensiones de cada pieza para que no exista variación con las indicadas en los planos.

- **Control de ensamblaje:** una vez fabricadas las piezas se comprueba que el ensamblaje del conjunto se efectúa tal y como se había previsto mediante el programa de diseño asistido por ordenador.
- **Control de vida útil:** se somete el dispositivo a un esfuerzo cíclico que simule las condiciones reales de funcionamiento para obtener una idea de la vida útil que presenta el sistema mecánico diseñado.
- **Control experimental:** finalmente, a la hora de realizar los ensayos de flexión, es necesario tener en cuenta diversas precauciones tales como la velocidad de carga, la alineación entre el sensor de esfuerzo y el centro de gravedad del alambre, la distancia entre apoyos correcta con respecto al diámetro del alambre, etc. Todo esto permite garantizar la calidad del resultado del proyecto y que no existen pérdidas de sus capacidades funcionales ni errores sistemáticos. Por otra parte, se repetirá cada ensayo un mínimo de tres veces con el fin de reducir al máximo los factores que ocasionan los posibles errores aleatorios que puedan darse. Una vez realizados los ensayos experimentales en la etapa final del proyecto, se cuantificará el grado de precisión del proyecto analizando los errores sistemáticos y aleatorios de los ensayos y contrastando los valores resultantes del estudio analítico, numérico y experimental.

Siguiendo este plan de control de manera rigurosa se puede asegurar un grado de calidad importante en el resultado del proyecto obtenido así como de los resultados de los ensayos de flexión que se realicen mediante este dispositivo por los operarios de empresas interesadas en el mecanismo.

9 SITUACION DE PARTIDA

9.1 Fundamentos teóricos del estudio

9.1.1 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción es la forma básica de obtener la información sobre el comportamiento mecánico de los materiales, más precisamente, la resistencia elástica, resistencia última y plasticidad del material cuando se somete a fuerzas uniaxiales.

El estudio del material en cuestión se realiza a partir de una máquina de ensayos que deforma una probeta normalizada de dicho material a estudiar aplicando la fuerza en el sentido del eje longitudinal de la muestra. A medida que se deforma la muestra, las lecturas de fuerza aplicada y desplazamiento se registran a partir de un ordenador conectado a los sensores instalados en la máquina de ensayos. De esta manera, el resultado inmediato que deriva de este ensayo mecánico es una curva de carga frente al alargamiento del metal.

La probeta a estudiar (Figura 1.11) se sujeta por sus extremos, especialmente modelados para ello, por medio de las mordazas de la máquina de ensayos. De manera que un extremo esté enganchado al cabezal móvil y el otro a la célula de carga. Estas fijaciones deben realizarse convenientemente para evitar las posibles tensiones de rotura en los puntos que puedan ocasionar y de esta manera restarle validez al ensayo. Para que el ensayo de tracción sea válido, ha de prolongarse hasta la rotura de la probeta y ésta debe originarse dentro de la zona que establece la longitud calibrada, en la parte central de la misma.

Seguidamente, la relación ilustrada de fuerza-desplazamiento, en función de la geometría inicial de la probeta estudiada, puede transformarse en tensión-deformación aportando una información acerca de las características mecánicas del material estudiado en el ensayo.

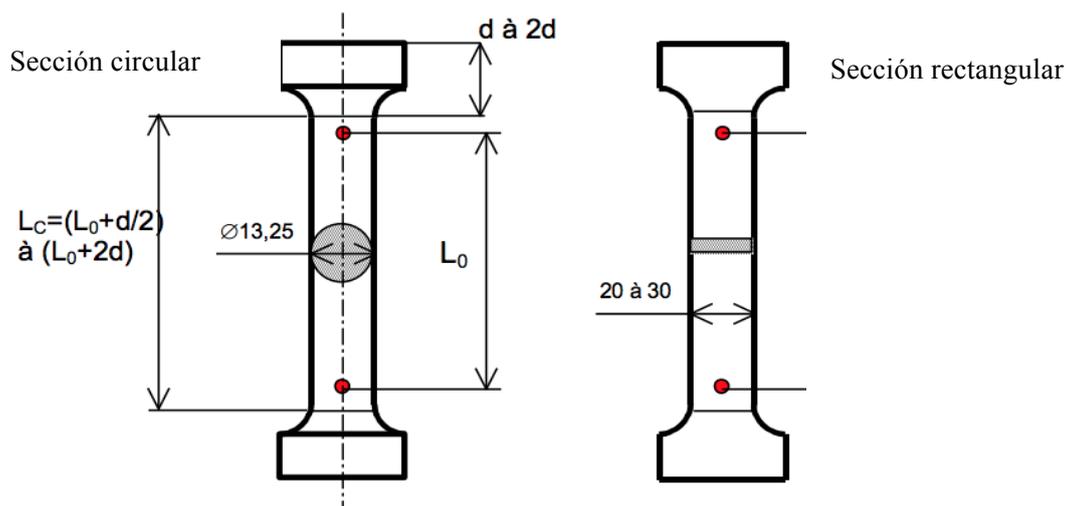


Figura 1.11. Probetas normalizadas para el ensayo de tracción (Diámetro ≥ 4 mm o espesor ≥ 3 mm)

- S_0 : sección inicial en milímetros cuadrados (mm^2).
- S_u : sección final tras la rotura en milímetros cuadrados (mm^2).
- L_0 : longitud inicial de la sección reducida en milímetros (mm).
- L_u : longitud final tras la rotura en milímetros (mm).
- L_C : longitud de la parte calibrada en milímetros (mm).

La curva característica del ensayo de tensión que representa la tensión aplicada sobre la probeta en función de su deformación longitudinal presenta la forma siguiente (Figura 1.12):

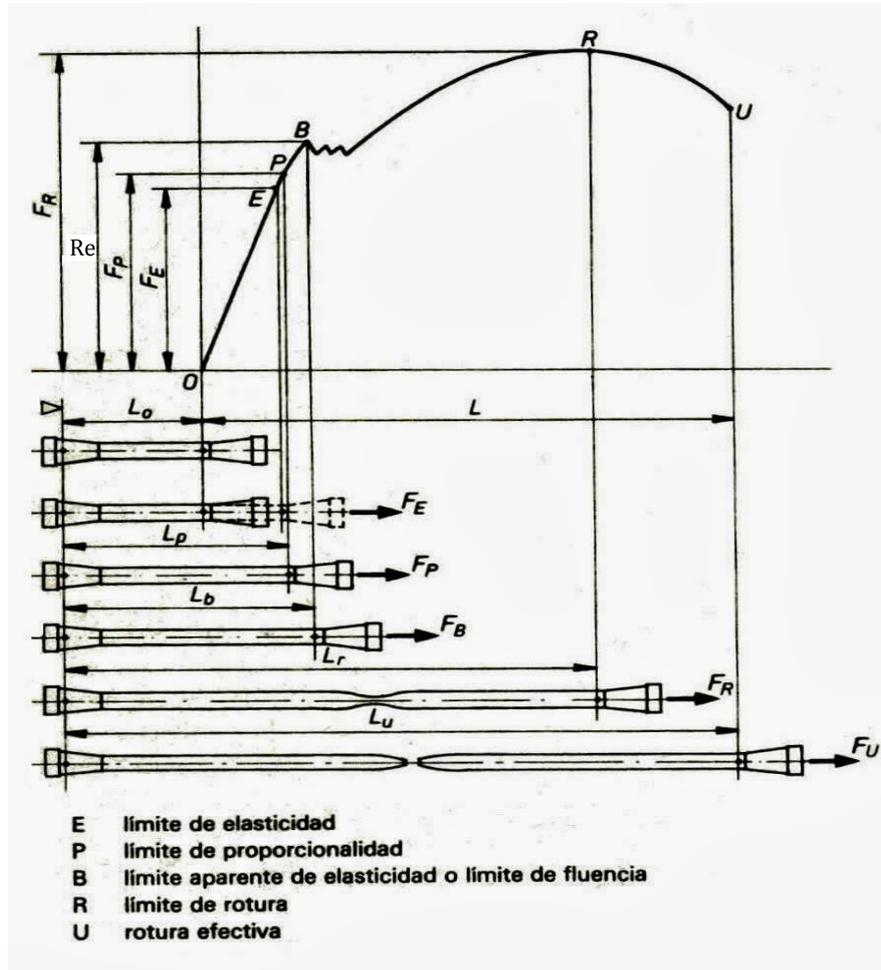


Figura 1.12. Curva característica del ensayo de tracción.

En la curva se pueden distinguir dos regiones que se corresponden con dos comportamientos diferentes del elemento estudiado. En primer lugar se visualiza la **zona elástica**, que se asocia con la región de bajas deformaciones. Antes de que la tensión sobrepase el límite de proporcionalidad (σ_p), el comportamiento de tensión-deformación es lineal cumpliéndose la Ley de Hooke. Las deformaciones sufridas por el metal en esta zona son reversibles antes de que la tensión supere el valor del límite elástico (Re), es decir, el objeto deformado puede volver a su forma original cuando se suprimen los esfuerzos exteriores aplicados sobre él si no se supera el valor del límite elástico. Dentro de esta zona se pueden distinguir a su vez otras dos:

- **Zona de proporcionalidad (OP):** Corresponde con el inicio del ensayo de tracción, la deformación es proporcional a la tensión ejercida por la máquina.
- **Zona no proporcional (PB):** El material se comporta de forma elástica pero la relación tensión-deformación no es lineal.

En segundo lugar, una vez las tensiones aplicadas son superiores al límite de elasticidad del material estudiado, éste entra en la **zona plástica**. En esta región, el metal se deforma dando lugar a la aparición de micro-fisuras. Estas deformaciones sufridas son permanentes, es decir, el material no recupera su longitud original cuando cesen las tensiones aplicadas sobre él. Por ello,

la geometría de la probeta se ve afectada disminuyendo su sección y aumentando su longitud a medida que progresa el ensayo de tensión. El porcentaje de alargamiento describe la deformación plástica permanente antes de la falla mientras que la reducción porcentual de la sección describe la cantidad de adelgazamiento que sufre la probeta durante el ensayo. En la zona plástica, existen también, al mismo tiempo, otras dos zonas:

- **Zona de deformación plástica uniforme:** Se consiguen grandes alargamientos con pequeños incrementos de tensión. Tras iniciarse la deformación plástica, la tensión necesaria para continuar con la deformación en los metales aumenta hasta alcanzar el punto R. Éste se corresponde con el límite de resistencia última a la tracción y es el valor máximo de tensión del diagrama tensión-deformación. La deformación experimentada por el metal hasta este punto es uniforme en la región estrecha de la probeta.
- **Zona de rotura o de estricción (RU):** Una vez alcanzado el valor de resistencia a la tracción, la tensión necesaria para deformar el metal disminuye. Estas deformaciones son localizadas y se empieza a formar una disminución de la sección transversal en algún punto de la probeta. Toda la deformación subsiguiente, está confinada en la estricción y la fractura ocurre en dicho punto. La tensión de fractura corresponde con el último valor de tensión registrado antes de que la probeta se rompa.

Finalmente, la región que se sitúa entre el comportamiento elástico y el plástico se denomina zona de fluencia, en ella se produce una pequeña deformación apreciable sin que varíe la tensión aplicada. Cabe destacar que el comportamiento registrado en esta curva varía en función del material estudiado.

A través de este tipo de ensayo mecánico se puede conocer directamente el comportamiento elástico y plástico de las bobinas de alambre que se emplean en la fabricación de resortes. La problemática surge cuando se ha de aplicar el ensayo sobre un trozo de alambre de cada bobina al no presentar estos la geometría propia de probeta normalizada. Por lo tanto, puesto que el interés de este estudio es desarrollar un método de caracterización mecánica aplicable a los alambres de manera directa, se debe plantear un ensayo mecánico distinto al de tracción, pero del que pueda derivarse la ley de deformación del alambre.

9.1.2 Micro-ensayo de flexión Stolken & Evans (1998)

A lo largo de la búsqueda bibliográfica acerca de la manera de caracterizar mecánicamente componentes con secciones geométricas tan pequeñas como es el caso de los alambres, se han planteado todos los ensayos mecánicos existentes (tracción, flexión, compresión, fatiga, microdureza, etc.). De entre ellos, ha cobrado gran importancia el artículo “*A microbend test method for measuring the plasticity length scale*” cuya autoría corresponde a Stolken & Evans (1998) para situar el ensayo de flexión como base de esta investigación y método a estudiar.

El ensayo descrito en la figura 1.13. ha sido diseñado con el fin de que pueda ser aplicable a una amplia gama de materiales, en particular en forma de finas laminas. Para el estudio de las características de este tipo de geometría, el ensayo concebido por Stolken & Evans ha resultado ser el más preciso.

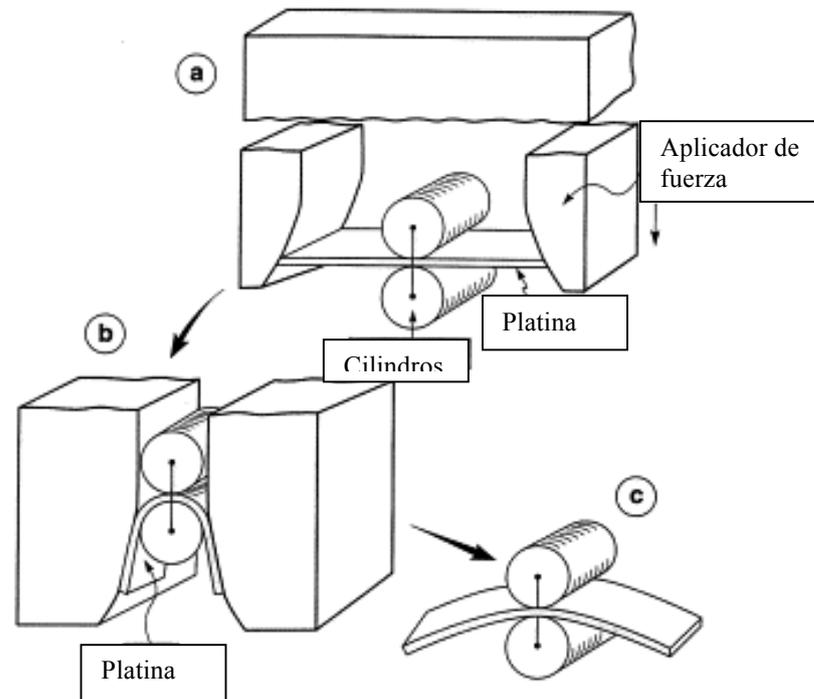


Figura 1.13. Esquema del mecanismo de micro ensayos de flexión Stolken & Evans.

Las mediciones de fuerza y momentos flectores son difíciles de realizar en este tipo de ensayos ya que son valores muy pequeños. Asimismo, también resulta complicado controlar los niveles de tensión de una forma precisa. Para evitar ambos problemas, se hace uso de un microscopio óptico para determinar el valor de la curvatura generada en la lámina. Tal y como se ilustra en la figura... la lámina es doblada alrededor de un pequeño cilindro por la acción de dos cargas aplicadas en sus extremos.

Estas cargas provocan que la lámina adquiera un estado de tensiones que dependen del radio del cilindro de apoyo. Posteriormente, las fuerzas laterales aplicadas se retiran causando una descarga elástica de la lámina y el aumento del radio de curvatura. Esta variación del radio de curvatura se debe al comportamiento elástico del material, el cual provoca que las deformaciones elásticas desaparezcan tras retirar las cargas que deforman la lámina. Mientras que la descarga sea estrictamente elástica y el módulo de Young del material sea conocido, la diferencia entre los radios de curvatura que presenta la lámina antes y después de retirar las cargas que la deforman permite determinar el momento flector existente cuando las cargas estaban presentes.

Variando el radio de los cilindros alrededor de los cuales se deforma la placa, variara el valor del momento flector y el comportamiento tensión-deformación experimentado por la misma. En cuanto a los parámetros descritos en la figura 1.14, "M" hace referencia al momento flector aplicado sobre la probeta, "b" es el ancho de la misma, "E" es el módulo de elasticidad asociado a su material y "R" el radio de curvatura provocado.

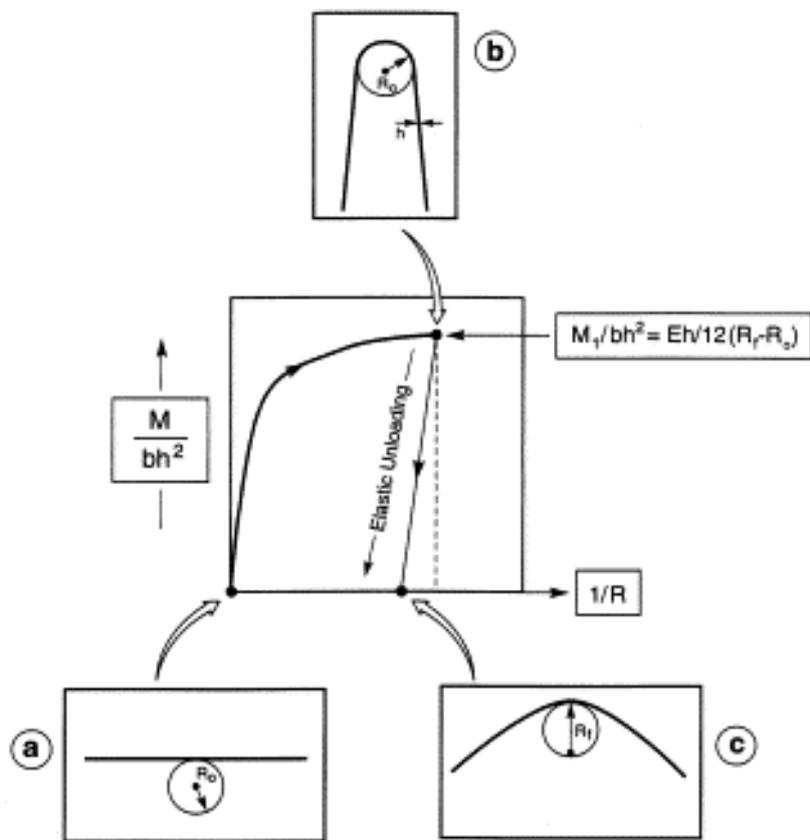


Figura 1.14. Relación del radio de curvatura R con el momento flector y la deformación superficial.

Tras haber analizado la concepción del micro-ensayo de flexión desarrollada por Stolken & Evans (1998) [11], el artículo presentado se establece como uno de los pilares fundamentales que conforman el fundamento teórico de este Proyecto. Además, se considera el ensayo de flexión como el método potencial a estudiar y a partir del cual determinar las características mecánicas de los muelles.

9.1.3 Ensayo de flexión

Los ensayos de flexión son importantes a la hora de realizar un estudio detallado sobre el comportamiento de un material bajo la acción de una fuerza. Este método se emplea para determinar las propiedades mecánicas y físicas de un elemento. El objetivo primordial del ensayo de flexión es determinar el comportamiento plástico y elástico del material estudiado a través de la relación esfuerzo-desplazamiento al estar solicitado a flexión. Cada material se comporta de forma distinta bajo los esfuerzos de flexión, por lo que es de esperar obtener diferentes normas y especificaciones técnicas para cada uno de ellos. Además, existen diferentes tipos de ensayos de flexión, lo que ha llevado a comparar los diferentes resultados que éstos proporcionan y analizarlos para elegir el más apropiado para desarrollar esta investigación científica.

Se denomina flexión al tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. El término "alargado" se aplica cuando una dimensión es dominante frente a otras. El rasgo más destacado es que un objeto sometido a un esfuerzo de flexión presenta una superficie de puntos (fibra neutra) tal que la distancia a lo largo de cualquier curva contenida en ella no varía a causa de la fuerza de deformación. Asimismo, el

esfuerzo de flexión puro se tiene cuando se aplican sobre un cuerpo pares de fuerza perpendiculares a su eje longitudinal, de manera que provoquen el giro de las secciones transversales. Expresado de otro modo, la fuerza aplicada sobre la pieza a deformar genera un esfuerzo de flexión que se denomina momento flector.

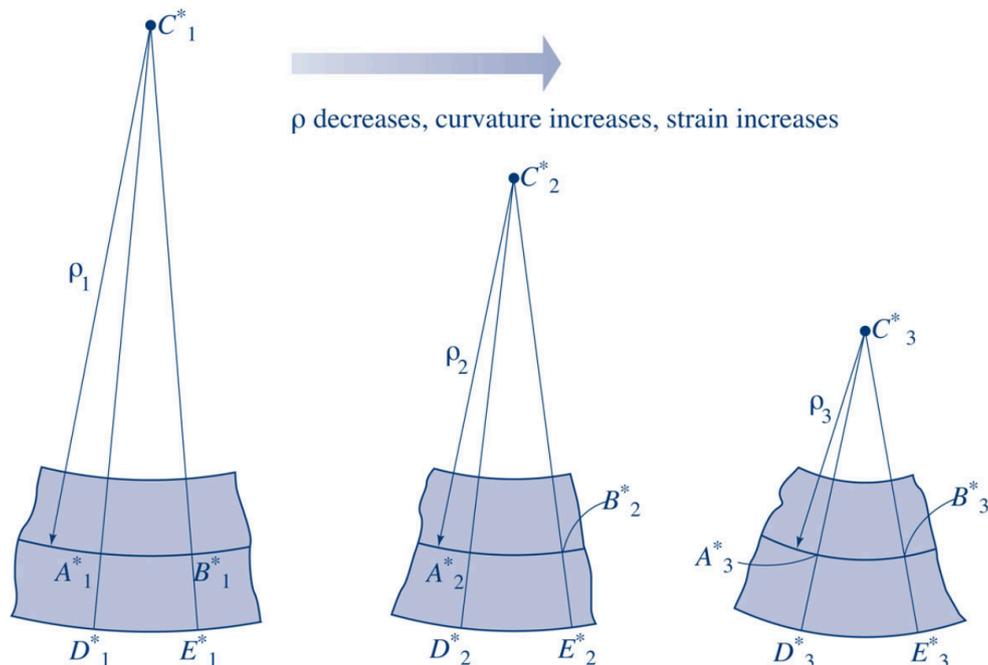


Figura 1.15. Representación de los efectos de flexión.

Una fibra situada a una distancia “y” por debajo de la fibra neutra, medirá más longitud tras la deformación provocada el momento flector puesto que está sometida a esfuerzos de tracción. Por otra parte, las fibras situadas a una distancia “y” por encima de la fibra neutra sufrirán un acortamiento de su longitud ya que están sometidas a esfuerzos de compresión. Entonces, se cumple que para un radio de curvatura dado, el alargamiento de una fibra es proporcional a su distancia respecto de la fibra neutra. De esta afirmación se deriva entonces que la deformación aumenta a medida que disminuye el radio de curvatura del metal flexionado (Figura 1.15).

- Ley de Navier:

$$\sigma(x, y, z)[MPa] = \frac{M_z(x)}{I_z} * y \quad (1.1)$$

Donde y es la distancia de una fibra a la fibra neutra, “M_z” el momento flector según la dirección Z e “I_z” es el momentos de inercia de área según el eje Z.

- Ley de Hooke (flexión), según la cual las deformaciones longitudinales de las fibras son proporcionales a su distancia a la superficie neutra:

$$\epsilon_x[\%] = \frac{\sigma_x}{E} \quad (1.2)$$

Donde “σ_x” es la tensión normal aplicada a la pieza flexionada y “E” es el módulo de elasticidad asociado al material de la pieza.

El diagrama de esfuerzos provocados por el momento flector sigue una progresión lineal (forma triangular) siempre que se cumplan las hipótesis de Navier o de secciones planas. Teniendo en cuenta la Ley de Hooke, el diagrama de deformaciones de la probeta también tendrá una forma triangular.

La hipótesis de Navier o de secciones planas plantea que para un radio de curvatura dado (r), el alargamiento de una fibra es proporcional a la distancia de una fibra a la fibra neutra:

$$\epsilon_x[\%] = \frac{y}{r} \quad (1.3)$$

Donde “ y ” es la distancia de una fibra a la línea neutra, “ r ” es el radio de curvatura de la pieza y “ ϵ ” es la deformación longitudinal producida a la pieza.

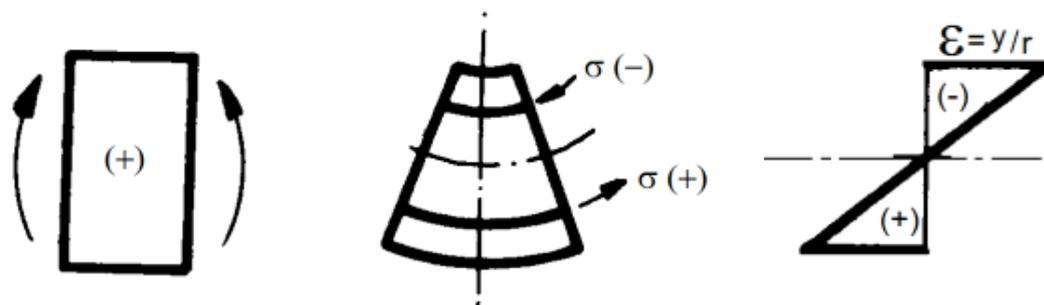


Figura 1.16. Criterio de signos de la tensión y deformación.

Por lo tanto, del fundamento teórico expuesto hasta el momento se deduce que aplicar un ensayo de tracción sobre un alambre real de manera directa resulta imposible ya que éste no presenta la geometría necesaria (probeta normalizada Figura 1.11.). Además, los ensayos de tracción y flexión aplicados directamente sobre probetas proporcionan características mecánicas del material menos precisas en comparación con las estudiadas a flexión sobre un alambre del mismo material. Por ello, como se ha comentado en el apartado “3 Antecedentes”, el ensayo de flexión se plantea como alternativa al ensayo de tracción empleado para conocer la ley de deformación de cada alambre por diversas razones:

- En primer lugar, es difícil preparar y ensayar probetas de tracción a partir de un alambre real. Otorgar al alambre la geometría de probeta normalizada supondría un trabajo costoso que requiere gran especialización por parte de los operarios. Lo que supondría un gasto extra en la formación de los mismos.
- Variar la geometría del alambre para poder someterlo a un ensayo de tracción provocaría la variación de sus características mecánicas con respecto a las que poseía inicialmente.
- La aplicación del ensayo de flexión puede realizarse sobre un trozo de la bobina de alambre de manera directa. Por ello, la aplicación de este ensayo presenta una menor complejidad con respecto al ensayo de tracción.
- Los resultados del ensayo de flexión conforman la curva de carga frente a desplazamiento, con la que es posible describir el comportamiento elástico y plástico del metal.

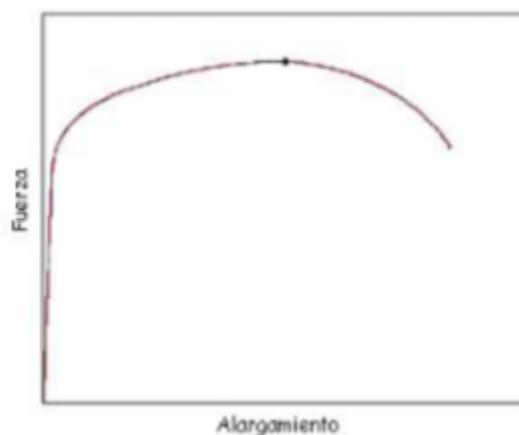


Figura 1.17. Relación Fuerza-Alargamiento..

- Finalmente, por todo lo expuesto, el tiempo de preparación necesario de del ensayo de tracción para el estudio de los alambre es superior al tiempo que requiere la aplicación del ensayo de flexión. Por ello, el último reduce notablemente el tiempo de producción de muelles de la empresa.

Mediante la implementación numérica del modelo de flexión desarrollado, teniendo en cuenta las relaciones constitutivas de cada alambre estudiado, y comparando los resultados numéricos con los experimentales, se puede llegar a plantear modelo fiable que suponga la base de estudio de la investigación.

9.2 Requisitos de estudio y diseño

Previa a la elaboración y materialización del estudio, se exponen aquellas características que debe cumplir el producto resultante de este proyecto en lo referente tanto a la necesidades del cliente, como en referencia a la normativa aplicable. Se tiene en cuenta en este apartado la información aportada previamente cuando se ha definido el alcance del proyecto, ya que en caso contrario no se conocería con precisión las necesidades a abordar.

Por ello, se establecen las bases que deberá cumplir el prototipo desarrollado para así dirigir el estudio hacia soluciones válidas. Estos requisitos vienen determinados por diversas fuentes y sus necesidades a satisfacer.

1. Necesidades del cliente.
2. Necesidades legales y de seguridad.
3. Necesidades económicas.
4. Necesidades de aplicación.
5. Necesidades técnicas y de fabricación.

Cabe destacar que de estas fuentes que condicionan las bases de este Proyecto de investigación, se marcarán una serie de requisitos indispensables a cumplir. Sin embargo, es normal contemplar otros cuyo cumplimiento es considerado como menos importante, aunque positivo para el éxito del estudio, por lo que son catalogados como sugerencias o propuestas deseables.

9.2.1 Necesidades del cliente

El cliente demanda la implementación del estudio realizado en un dispositivo duradero, económico, de sencilla y rápida aplicación que le permita conocer con precisión el comportamiento mecánico de cada bobina de alambre. La introducción de dicho dispositivo de ensayos de flexión a la cadena de fabricación de resortes de la empresa ha de suponer un aumento de sus ganancias económicas globales al reducir las pérdidas debidas a la fabricación de resortes de características no deseadas.

9.2.2 Necesidades legales y de seguridad

Tanto el desarrollo del estudio como la materialización del prototipo propuesto han de cumplir con las normativas mencionadas en el apartado *5 Normas y referencias*.

Además, la implantación del nuevo diseño a la industria de fabricación de muelles deberá tener en cuenta las condiciones de seguridad ya establecidas en dicha empresa, de tal manera que no entren en controversia con los requisitos legales. Así como las condiciones de sanidad, seguridad e higiene relativas a la prevención de riesgos laborales en los procesos de fabricación quedan reguladas por la norma básica francesa, reflejadas en el Estatuto de los Trabajadores.

9.2.3 Necesidades económicas

Para la mayor parte de proyectos industriales la parte económica constituye un factor determinante tanto para la fabricación como la venta de sus productos o servicios.

En este caso, la adquisición del diseño de ensayo de flexión desarrollado debe suponer una inversión favorable para la empresa demandante. Del mismo modo que la fabricación del producto ha de ser viable. Por lo que resulta imprescindible tener en cuenta las diferentes necesidades económicas a la hora de concebir y vender el producto final:

- Se debe minimizar al máximo los costes de diseño y producción sin perjudicar el nivel de calidad requerido.
- La fabricación del producto debe ser rentable para la empresa y dichos costes no deben superar el presupuesto estipulado por el Instituto Clément Ader.
- El precio de venta final del producto debe establecerse siguiendo una estrategia competitiva de precios.

9.2.4 Necesidades de aplicación

Las normas ASTM E290 y UNE-EN ISO 7438:2016 describen los requisitos a cumplir en los ensayos de flexión para estudiar la ductilidad de materiales metálicos:

- El ensayo de flexión requiere que la carga se aplique sobre el punto central de la muestra, a su vez ésta se apoya en los extremos.
- El espécimen se dobla hasta un ángulo predeterminado o hasta que se produzca la fractura del mismo.
- El lado convexo de la muestra se inspecciona en busca de grietas o defectos previamente al comienzo del ensayo. Debe asegurarse siempre un buen estado de superficie de la pieza a estudiar.

9.2.5 Necesidades técnicas y de fabricación

El principal objetivo a cumplir a la hora de materializar el estudio desarrollado es que el mecanismo esté justamente dimensionado y realice a la perfección el trabajo para el cual ha sido concebido. En este proyecto, la tarea funcional principal que debe cumplir el prototipo es la de aplicar ensayos de flexión de manera precisa y directa sobre alambres de diferentes diámetros. Asimismo, la estructura del mecanismo que deforma el alambre debe de soportar las cargas que puedan deformarlo o fracturarlo provocando una pérdida de su funcionalidad.

Una vez se obtenga una solución de mecanismo que cumpla con la tarea para la que se diseña, es momento de optimizar la concepción de ese primer prototipo. Simplificar las operaciones de fabricación de las piezas que constituyen el producto, será beneficioso para el resultado general del proyecto. Para ello se han marcado ciertos objetivos:

- La complejidad de las operaciones de fabricación y ensamblaje requeridas no deben suponer la necesidad de intervención de empresas exteriores.
- La concepción debe adaptarse en la medida de lo posible para la utilización de piezas estándares y reducir así el número de operaciones de fabricación.
- Se busca minimizar el consumo de recursos materiales necesarios para la fabricación del sistema evitando las concepciones sobredimensionadas.

9.3 Características generales de diseño

Al tratarse de un primer prototipo con el que verificar el estudio numérico y teórico previamente realizado, los requerimientos de diseño y las leyes físicas funcionan aquí como condiciones de borde a las que el proyectista debe atenerse para llegar a un objetivo satisfactorio, sin necesidad de que sea el resultado más óptimo. La optimización del sistema es el paso siguiente a realizar una vez se verifique la funcionalidad del prototipo. Ésta se lleva a cabo mediante un análisis crítico de las características mejorables, el planteamiento de mejores soluciones, la incorporación de medidas tecnológicas más apropiadas y la reducción del coste de fabricación, manteniendo dichos cambios siempre dentro de los límites admisibles. De esto se desprende que el proceso de diseño industrial necesita siempre una etapa previa de dimensionamiento a partir de un estudio numérico o analítico.

Una vez expuestas las necesidades que afectan al proyecto, observando las características del banco de ensayos y dinamómetro del que se dispone y en base a las necesidades planteadas en el grupo de trabajo, se fijan los siguientes requerimientos de diseño del prototipo de ensayos de flexión en desarrollo:

- El dispositivo de ensayo ha de ser aplicable en el contexto de producción industrial de resortes.
- Carga máxima de lectura del dinamómetro: 500 Newtons
- Carga máxima aplicable: 490 Newtons
- Longitud mínima de los alambres a ensayar: longitud entre apoyos extremos + 30 milímetros.
- Altura mínima entre los cilindros de apoyo de la estructura y la base de la misma: 50 milímetros.

- Debe ser posible la observación de la zona de aplicación de la carga.
- La distancia entre los apoyos fijos no debe variar a lo largo de la consecución de un ensayo.
- Diámetro máximo de los alambres que se pueden ensayar mediante el dinamómetro del que se dispone: $5mm$. Este es uno de los parámetros a maximizar en el diseño; se establecen diferentes niveles de ensayo adaptando la distancia entre los apoyos en función del diámetro del alambre sin que la carga aplicada sobrepase los $500N$ máximos de lectura del dinamómetro.
- Dimensión máxima de la superficie de la base de la estructura apoyada sobre el banco de ensayos: $240mm \times 100mm$.
- El diámetro de los cilindros de apoyo debe de ser $= L/3$. Donde L es la longitud entre el cilindro de apoyo y el cilindro del sistema de aplicación de la fuerza.
- La lectura del desplazamiento vertical del actuador de fuerza debe de realizarse cada $0,5$ milímetros.
- Los cilindros de apoyo no deben de deformar su forma debido a esfuerzos de flexión aplicados por el alambre. Para ello $2/3$ de la longitud de los cilindros de apoyo debe encontrarse introducida en la estructura.
- La velocidad de ensayo: $2mm/min \leq v_{actuador} < 4mm/min$.
- El coste global del dispositivo debe disminuirse tratando de utilizar las facilidades de fabricación disponibles en el ICA. Se considera un límite económico de $1.000€$ para el prototipo de ensayos de flexión.
- Debe tenerse en cuenta las limitaciones impuestas por el funcionamiento del dinamómetro. La capacidad de medida del sensor de fuerza que se dispone es de un máximo de $500N$ (*CENTOR Easy - Model CNR EA 500*). Por ello, el dimensionamiento del sistema se hace tomando $250N$ como fuerza de seguridad máxima aplicable sobre el alambre.

9.4 Conceptualización del sistema

Como una primera aproximación al sistema mecánico que se busca obtener de este estudio, el prototipo resultante puede representarse mediante el siguiente diagrama de bloques.

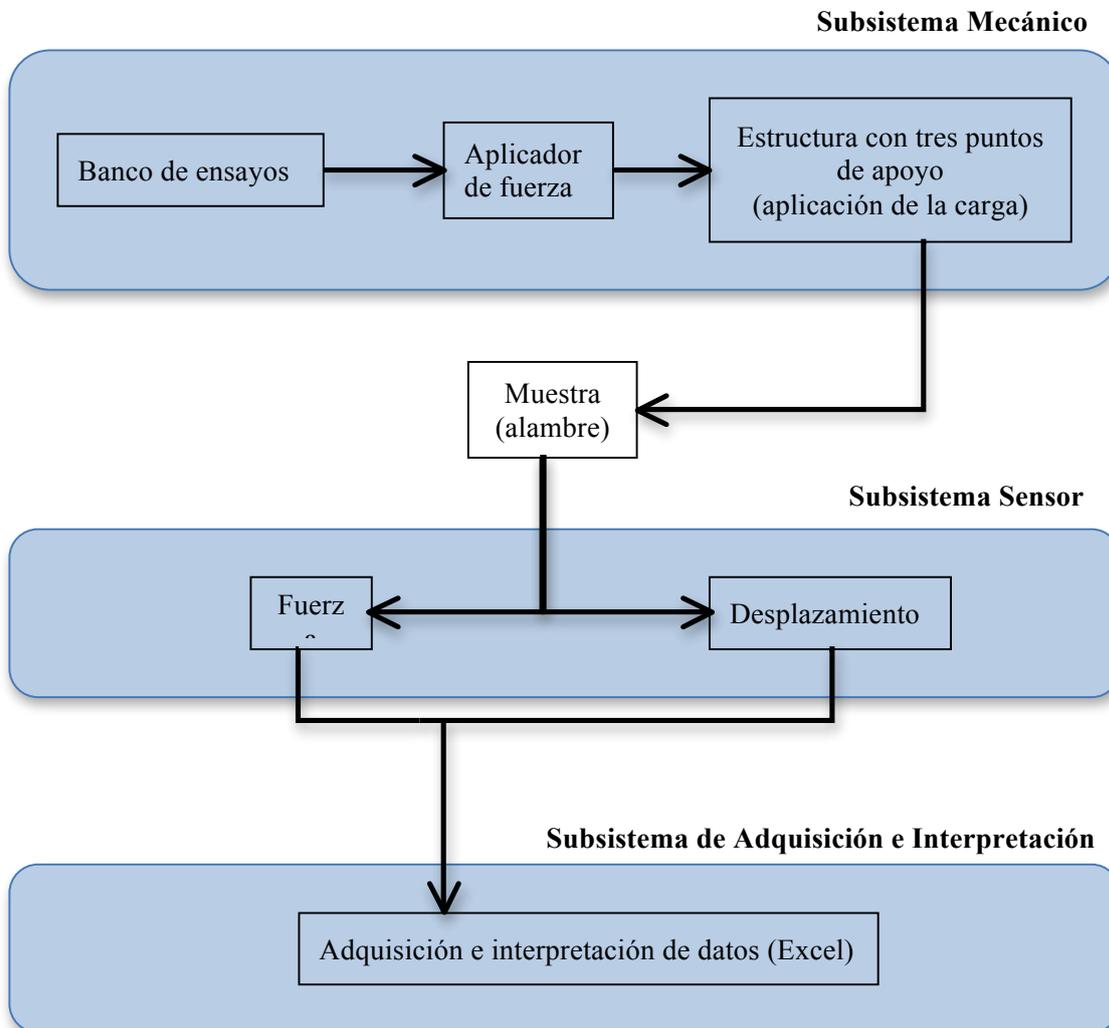


Diagrama 1.1. Diagrama de bloques del sistema de ensayos de flexión.

En los próximos apartados, se describen los procesos de dimensionamiento de los componentes del prototipo diseñado y sus planos explicativos. Puesto que se cuenta inicialmente con el banco de ensayos y los sensores ya instalados en éste, el dimensionamiento y concepción se centra en la estructura con tres puntos de apoyo que entran en contacto con el alambre estudiado.

10 ESTUDIO DE LAS ALTERNATIVAS

Este epígrafe recoge el conjunto de alternativas contempladas en la consecución del proyecto para cumplir de forma exitosa los objetivos propuestos. Aunque un objetivo pueda ser alcanzado enfocando el procedimiento de diferentes maneras, siempre hay una solución que recoge el conjunto de especificaciones expuestas anteriormente. Por lo tanto, el grado de cumplimiento de dichas especificaciones es el factor que determina la alternativa más conveniente para el desarrollo de cada etapa del proyecto. El desarrollo del conjunto de alternativas escogidas en cada etapa conlleva la constitución de una propuesta de ensayo de flexión que cumpla con el objeto de esta investigación.

La patente de un dispositivo que determine de manera precisa las características de cada bobina de alambre antes de ser empleada en la fabricación de resortes requiere un estudio científico bien desarrollado. A medida que se avanza en dicho estudio aparecen varias vías de enfoque, es decir, diferentes maneras de enfocar la investigación. Hay que tener en cuenta que no todas las alternativas de estudio conducen hacia el éxito del proyecto, por lo que es necesario considerarlas todas y sobre todo analizarlas bien para asegurar la buena evolución de la investigación. A continuación se presentan las diferentes alternativas planteadas a lo largo del desarrollo de las etapas del proyecto:

10.1 Constitución del modelo de estudio

El objetivo primordial del ensayo de flexión es determinar el comportamiento plástico y elástico del material estudiado a través de la relación esfuerzo-desplazamiento que se deriva de este tipo de ensayo mecánico. El punto de partida consiste en determinar qué modelo de ensayo de flexión va a constituir la base de la investigación de este proyecto.

- **Solución 1: Ensayo de flexión en tres puntos.**

El ensayo de flexión sobre el alambre que se quiera estudiar puede realizarse de dos maneras. En primer lugar, si la flexión del alambre se realiza aplicando una carga sobre tres puntos del alambre el modelo de ensayo mecánico corresponde al de flexión en tres puntos. La carga es transmitida al alambre por medio de un apoyo móvil en el eje vertical "Y", los dos cilindros situados en los extremos del alambre ejercen una fuerza de reacción que conlleva la flexión de la pieza estudiada (Figura 1.18).

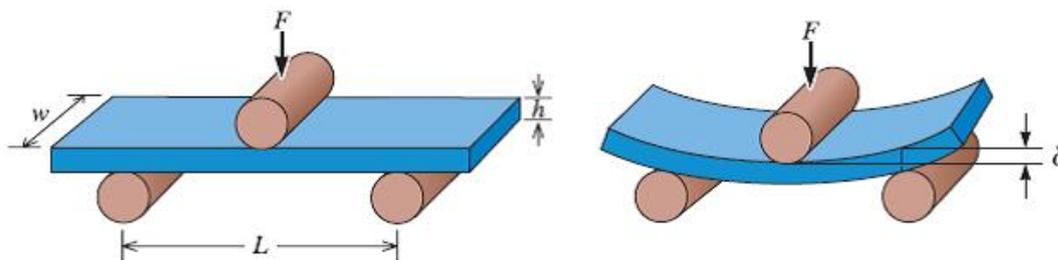


Figura 1.18. Esquema del ensayo de flexión en 3 puntos.

Donde "w", "h" y "L" son los parámetros geométricos de ancho, espesor y longitud entre apoyos respectivamente. Seguidamente, "F" representa la fuerza aplicada sobre la probeta a ensayar y "δ" el grado de curvatura originado en la misma.

- **Solución 2: Ensayo de flexión en cuatro puntos**

Este tipo de ensayo mecánico constituye la segunda vía capaz de estudiar mecánicamente un alambre sometiéndolo a esfuerzos de flexión. Siguiendo con el diseño del modelo anterior, dos cilindros actúan como apoyos fijos y la fuerza de reacción que ejercen sobre los extremos del alambre conlleva a su flexión. Sin embargo la carga de la que se derivan estas fuerzas de reacción es aplicada al alambre en este caso por medio de dos apoyos móviles en el eje vertical Y , situados a distancias iguales de los apoyos (Figura 1.19).

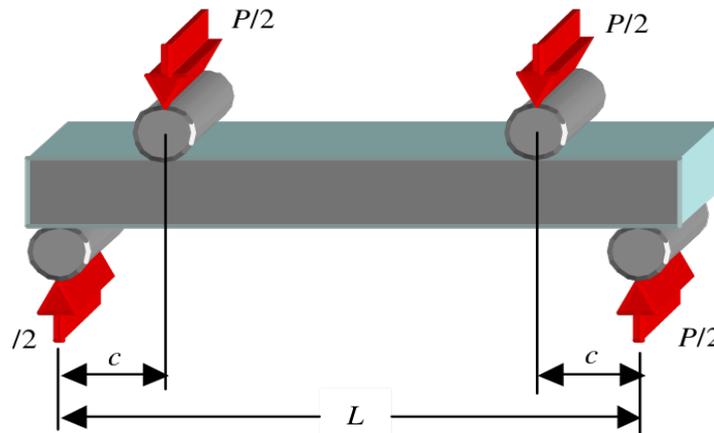


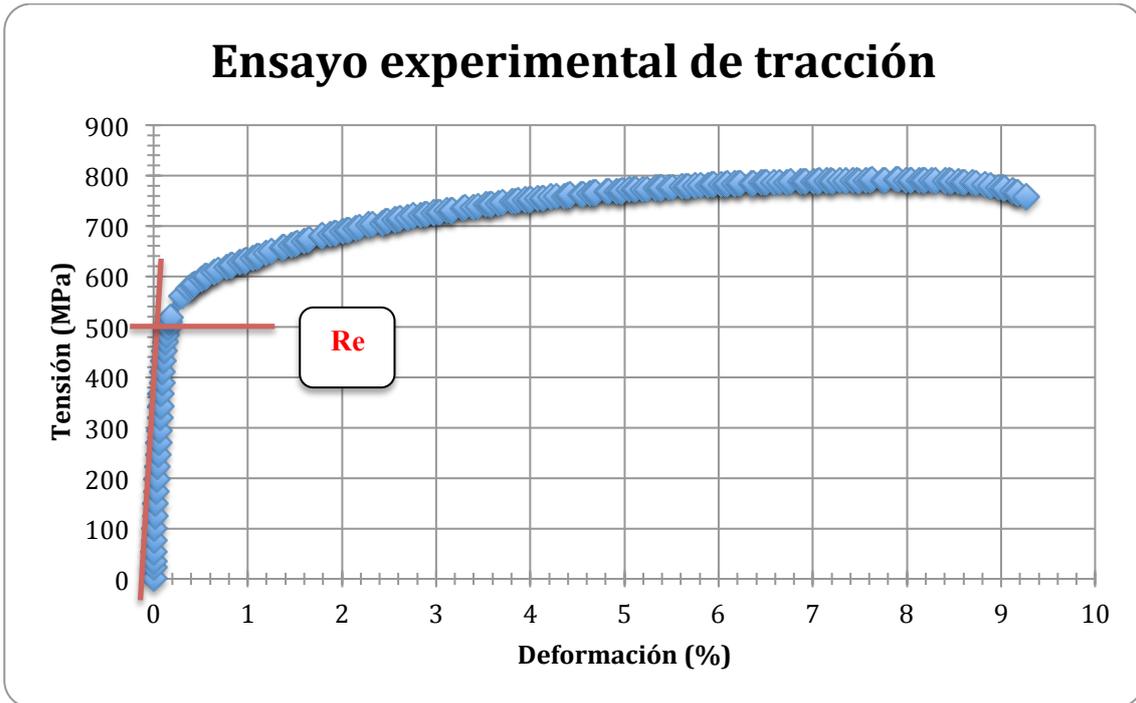
Figura 1.19. Esquema del ensayo de flexión en 3 puntos.

La elección entre las dos alternativas de modelo de ensayo mecánico que se exponen, se ejecuta teniendo en cuenta los estudios analítico, numérico y del diseño que se derivan de ambas.

10.1.1 Análisis numérico

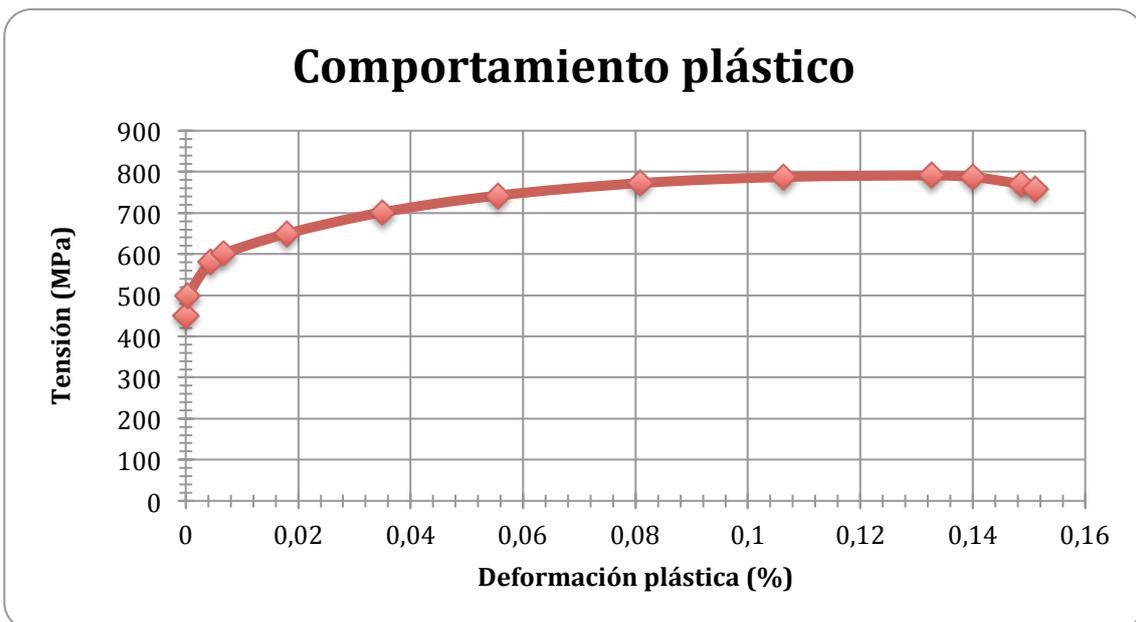
Para poder llevar a cabo el análisis numérico por elementos finitos del ensayo de flexión, es necesario otorgar a priori unas características de deformación propias al material del alambre modelado en Abaqus.

Para ello, se dispone de los resultados de un ensayo de tracción aplicado a una probeta de acero de uso general. A partir de estos datos, se llevan a cabo una serie de cálculos con el fin de determinar su ley de deformación. En primer lugar se determina el valor de tensión a partir de la cual se sobrepasa el límite de proporcionalidad (σ_p), que en este caso coincide con el límite de elasticidad (σ_e) ya que se desprecia el fenómeno de fluencia en este estudio. Posteriormente se consulta el valor resultante de elongación plástica de los datos del ensayo de tracción con el fin de trazar únicamente el comportamiento plástico del acero de referencia sometido al ensayo de tracción experimental (Gráfica 1.1).



Gráfica 1.1. Ley de deformación del acero de referencia analizado experimentalmente.

El conocimiento de dicha ley es necesario para la futura modelización del ensayo de flexión mediante el programa de análisis numérico por elementos finitos Abaqus. En la curva propia a la ley de deformación de cualquier material se diferencian el dominio de deformación elástica, asociado a un comportamiento lineal, y el dominio de deformación plástica, asociado a un comportamiento no lineal. Debido al comportamiento lineal, las características de deformación elástica no presentan una variación significativa entre la probeta normalizada y el alambre real. Por lo tanto, el estudio se centrará en conocer con la mayor precisión posible el comportamiento plástico del alambre, ya que éste sí que varía significativamente entre la probeta normalizada y el alambre real (Gráfica 1.2).



Gráfica 1.2. Comportamiento plástico experimental del acero de referencia.

10.1.1.1 Realización de un plan de experiencias.

En primer lugar, es necesario indicar que los resultados referentes a los cálculos realizados mediante las expresiones matemáticas que se incluyen en este apartado se encuentran catalogados en el Anexo 1.

Una vez determinada la ley de deformación del acero de base, variando las características mecánicas de dicho acero (Re , Rm y ϵ_{max}), se concibe un plan de experiencias de tipo 2^3 . Entonces, a partir del acero de referencia, se dispone de ocho aceros diferentes que constituyen la base de estudio del primer objetivo del proyecto. En consecuencia, cada uno de estos ocho aceros tendrá un comportamiento plástico propio. Al aumentar el número de casos diferentes de estudio, se gana capacidad de comparación y reflexión de los resultados. La variación de las características mecánicas del acero de referencia se realiza en función de la tabla 1.1.

	Re (MPa)	Rm (MPa)	Deformación máxima %
1	100	100	x1,5
-1	-100	-100	x0,5

Tabla 1.1. Variación de las características mecánicas del acero de referencia.

Por consiguiente, se llega al plan de experiencias catalogado en la tabla 1.2.

	Re (MPa)	Rm (MPa)	Deformación máxima %
Acero 0	-	-	-
Acero 1	1	1	1
Acero 2	1	1	-1
Acero 3	1	-1	1
Acero 4	1	-1	-1
Acero 5	-1	1	1
Acero 6	-1	1	-1
Acero 7	-1	-1	1
Acero 8	-1	-1	-1

Tabla 1.2. Plan de experiencias 2^3 .

La constitución de dicho plan de experiencias requiere de diversas expresiones que representen la variación de las características mecánicas de los aceros definidas anteriormente. Tomando como referencia las características del acero de base (“Acero 0”) estudiado experimentalmente a partir de un ensayo de tracción, es posible determinar el comportamiento elástico-plástico del resto de aceros por medio de las expresiones siguientes:

- Límite elástico (MPa):

$$Re' = Re_0 \pm 100 \tag{1.4}$$

- Resistencia mecánica última (MPa):

$$Rm' = Rm_0 \pm 100 \tag{1.5}$$

- Deformación máxima (%):

$$\epsilon'_{max} = \epsilon_{max} * cte \tag{1.6}$$

- Tensiones intermedias (MPa):

$$\sigma' = Re' + \frac{(Rm' - Re') * (\sigma_0 - Re_0)}{(Rm_0 - Re_0)} \quad (1.7)$$

Una vez determinadas estas cuatro expresiones y comprobada la veracidad cada una de ellas es posible generar una ley de deformación para cada acero. Una vez se obtengan los resultados del análisis numérico referentes a la relación carga-desplazamiento se ha de verificar que la variación de dicha relación entre los ocho aceros estudiados se produce de manera similar a la variación de las características mecánicas impuesta en el plan de experiencias. En el caso de que esto se cumpla, es posible concluir que existe una relación entre el comportamiento tensión-deformación y carga-desplazamiento. Por lo tanto a partir de una se hace posible el conocimiento de la otra, verificando así el propósito y las bases de este estudio.

10.1.1.2 Modelo aproximativo del ensayo de flexión

En este apartado, a partir del programa Abaqus, los ensayos de flexión se modelan en 2D considerando los alambres como placas finas metálicas. De esta manera, se llega a una primera aproximación verificando que es posible conocer el comportamiento plástico y elástico conociendo la curva fuerza-desplazamiento. El estudio 2D es suficiente para representar de forma simple las propiedades mecánicas de los aceros. Asimismo, para dicha configuración se estudian dos ensayos de flexión distintos, se distingue el ensayo de flexión a 3 puntos y a 4 puntos.

Antes de empezar con la exposición de cada análisis, cabe indicar que las dificultades encontradas en este apartado residen en la metodología a seguir para configurar los análisis numéricos sin ningún error de programación. Para ello es aconsejable emplear el manual que ofrece el programa Abaqus de forma gratuita en su página web.

10.1.1.2.1 Ensayo de flexión en 3 puntos

Para la representación numérica realizada del ensayo de flexión en 3 puntos, como su nombre indica, solamente existen 3 puntos de contacto sobre la pieza a analizar. La configuración de este ensayo en el programa Abaqus se ha realizado de la siguiente manera: dos de los apoyos están situados en las extremidades de la placa representados a partir de dos pequeños cilindros móviles en contacto con la superficie superior de la placa (piezas 1 y 2 de la figura 1.20), y un tercer apoyo (pieza 3 de la figura 1.20) está representado por un cilindro inmóvil de mayor diámetro en el centro de la placa. Los dos cilindros móviles llevan a cabo un movimiento de descenso completamente vertical con el objetivo de someter a la placa a esfuerzos de flexión (Figura 1.20).

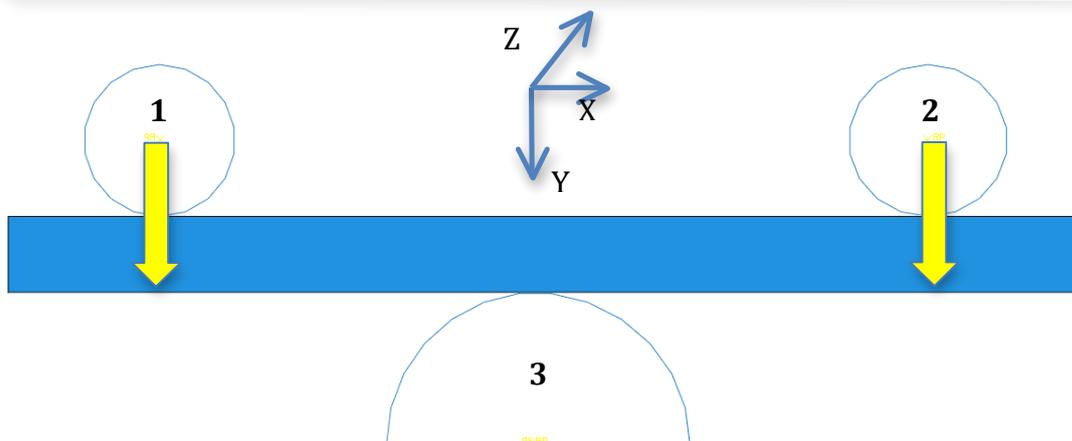


Figura 1.20. Representación numérica 2D del ensayo de flexión en 3 puntos sobre una placa plana.

Detalles de la modelización en Abaqus	
Espesor de la placa	5 mm
Longitud de la placa	100 mm
Diámetro del cilindro central	20 mm
Diámetro de los cilindros móviles	10 mm
Distancia entre cilindros móviles	80 mm

Tabla 1.3. Medidas de la configuración Abaqus 2D del ensayo de flexión en 3 puntos.

El espacio que descenden los dos cilindros situados en los extremos de la placa es el valor máximo necesario para alcanzar el valor máximo de deformación de la misma (rotura). Con el fin de realizar una configuración sencilla para reducir al máximo el tiempo de cálculo de los resultados de la simulación, se hace uso de las simetrías en el centro geométrico de la placa (en este caso respecto del plano YZ).

10.1.1.2 Ensayo de flexión en 4 puntos

Para la representación numérica realizada del ensayo de flexión en 4 puntos, se sigue el mismo principio que para la flexión en 3 puntos. En cambio, en este caso serán 2 los cilindros que actúen como apoyos fijos (piezas 3 y 4 de la Figura 1.21). De nuevo, los dos cilindros móviles (piezas 1 y 2 de la Figura 1.21) situados en los extremos de la placa en contacto con su superficie superior ejercen una carga que conlleva la flexión de la misma. Teniendo en cuenta las mismas medidas y criterios de simetría tomados en la configuración del ensayo de flexión en 3 puntos en Abaqus, se obtiene en este caso el modelo reflejado en la figura 1.21.

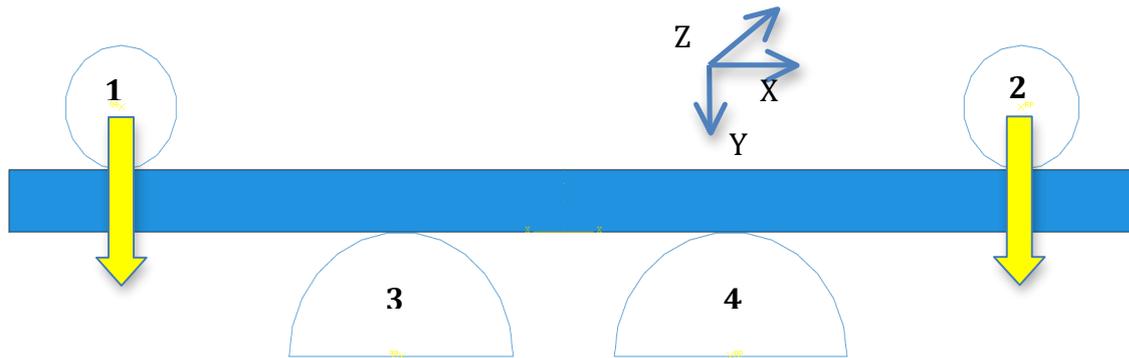


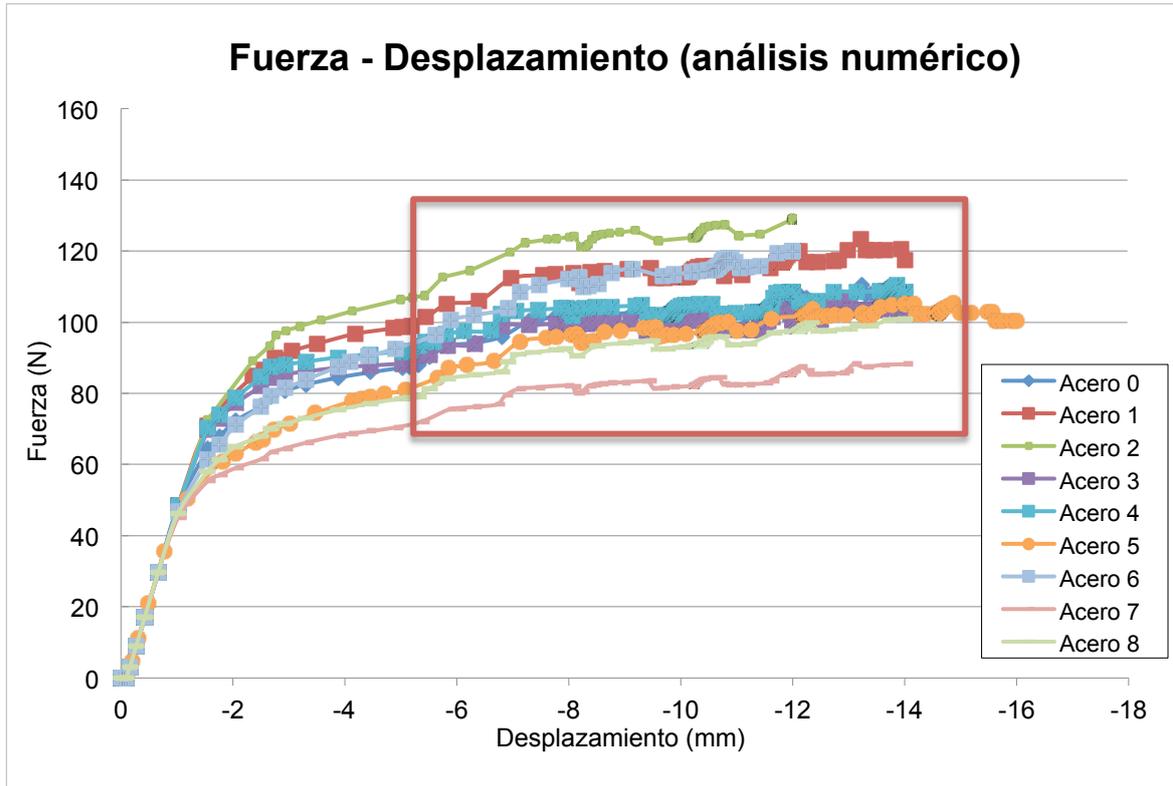
Figura 1.21. Representación numérica 2D del ensayo de flexión en 4 puntos sobre una placa lisa.

Finalmente, una vez recopilados los resultados de ambas configuraciones, se comparan y se establecen conclusiones en relación al tiempo de cálculo, precisión y facilidad de realización de cada modelo. Cabe indicar que se estudiarán los 8 aceros de los cuales se ha definido su ley de deformación propia en el plan de experiencias.

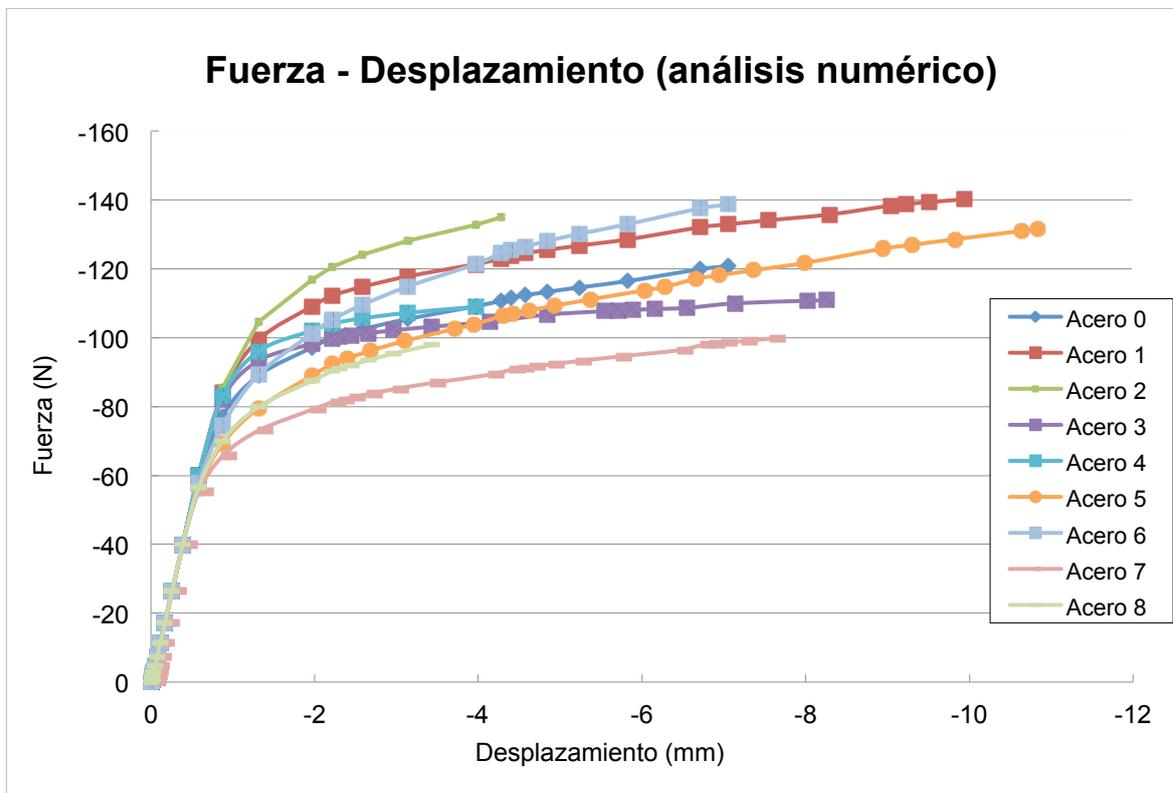
Comparando la relación fuerza-desplazamiento obtenida a partir de ambos modelos, se puede constatar que para valores pequeños de desplazamiento se obtienen resultados de fuerza similares entre modelos. Sin embargo, a medida que aumentamos el desplazamiento vertical de los cilindros situados en los extremos, la relación fuerza-desplazamiento comienza a ser más irregular para el análisis numérico del ensayo de flexión en 4 puntos. Por otra parte, en cuanto al tiempo de cálculo y facilidad de configuración, dichas características son similares para ambas configuraciones. Por lo tanto, a raíz de los resultados, se escogería el modelo de flexión en 3 puntos ya que presenta una relación de fuerza-desplazamiento mejor definida para cada acero.

10.1.2 Análisis de los resultados del estudio numérico

Una vez completadas las simulaciones, se analizan los resultados ofrecidos por las simulaciones 2D de ambas alternativas de estudio aplicadas a los ocho aceros modelados en forma de placas finas metálicas con el fin de contrastar la conveniencia de ambos ensayos mecánicos de flexión. Las características de los ocho aceros se recogen en el primer plan de experiencias derivado del ensayo de tracción experimental a partir del cual parte este proyecto.



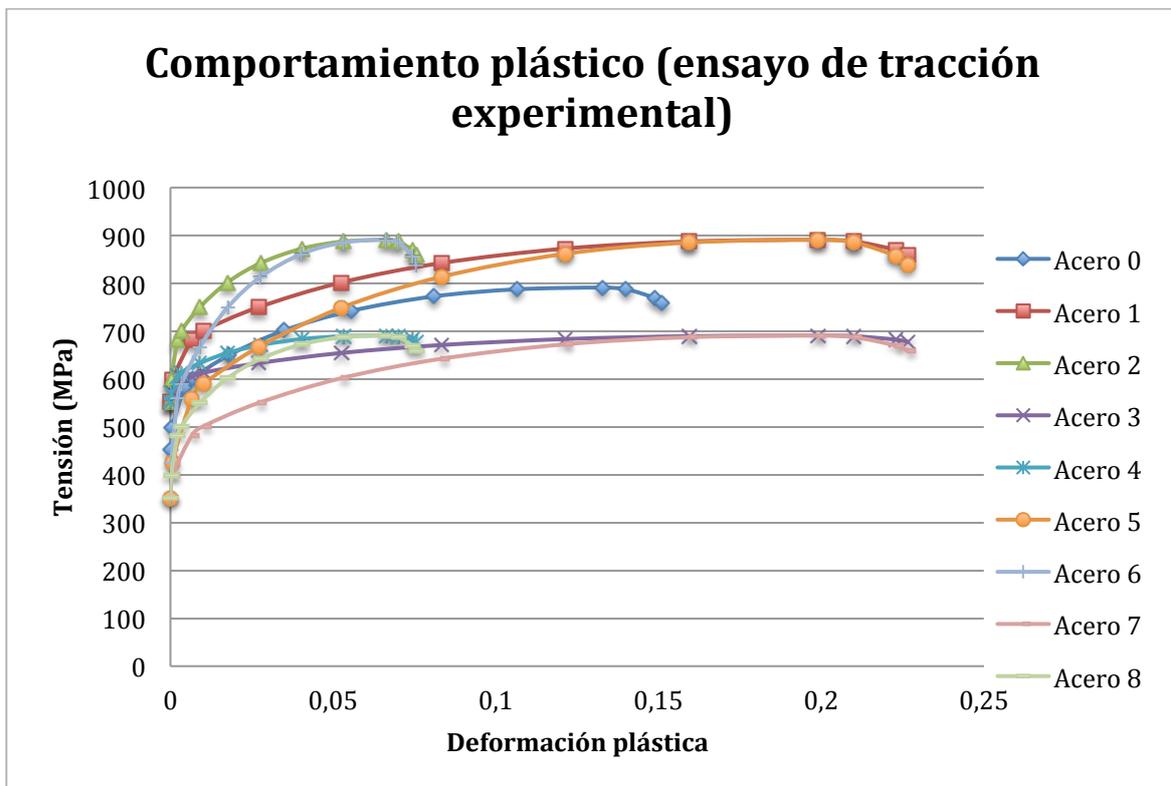
Gráfica 1.3. Análisis numérico del ensayo de flexión 2D en 4 puntos.



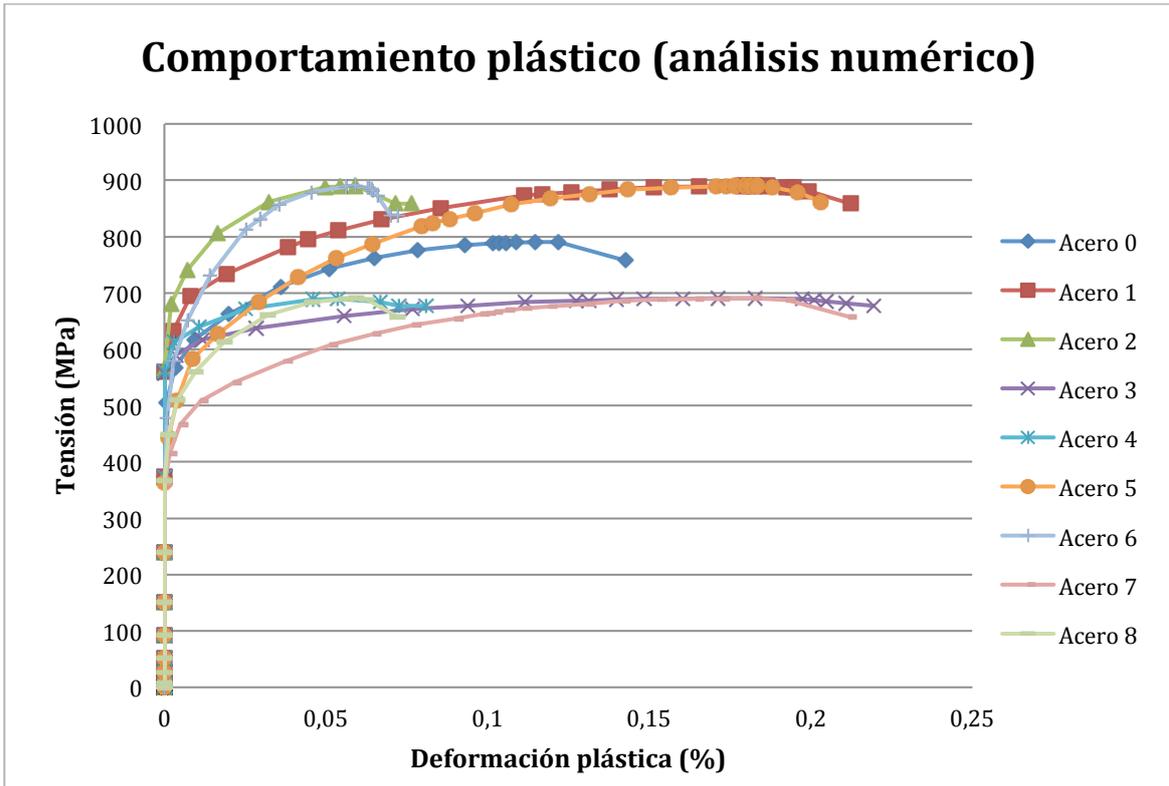
Gráfica 1.4. Análisis numérico del ensayo de flexión 2D en 3 puntos.

En un primer momento es posible contemplar que el análisis numérico del modelo de ensayo de flexión en cuatro puntos presenta una menor calidad, asociada a una variación y ruido excesivo en la representación gráfica de los resultados de cada ensayo de este tipo. Estos fenómenos se reflejan en el comportamiento plástico de cada platina analizada y se intensifican a medida que aumenta el desplazamiento vertical del aplicador de fuerza.

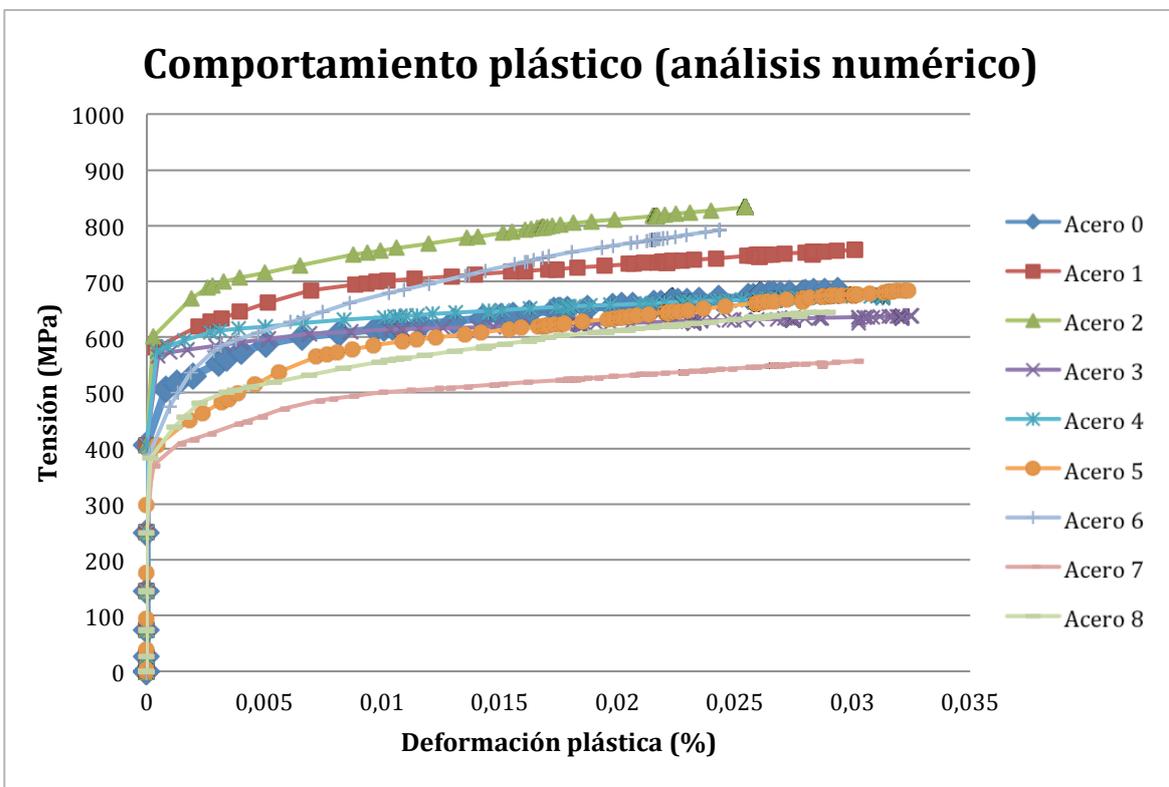
Se emplean las mismas premisas para modelar ambos ensayos mecánicos en Abaqus sobre la misma pieza. Sin embargo el análisis numérico de la solución 2 (ensayo de flexión en 4 puntos) no permite aplicar un valor de desplazamiento vertical del apoyo móvil lo suficientemente grande como para asegurar la clausura del ensayo debido a un problema de convergencia en los resultados de la simulación. La consecuencia directa es la imposibilidad de conocer el comportamiento elástico y plástico completo del alambre por lo tanto la necesidad de una configuración CAE de este modelo (Computer-Aided Engineering) más sofisticada y compleja (modelo explícito y dinámico en lugar de implícito y estático). En cambio, el análisis numérico del ensayo de flexión en 3 puntos presenta una buena precisión en los resultados que ofrece en la primera aproximación de estudio. Lo que hace suponer a priori que el estudio numérico de dicho modelo presentará menor complicación a lo largo del desarrollo del proyecto. Este fenómeno se refleja en las gráficas siguientes (1.5; 1.6 y 1.7.); se muestra cómo mediante el ensayo de flexión en 3 puntos, a diferencia de emplear el ensayo de flexión en 4 puntos, es posible conocer de manera completa el comportamiento elástico-plástico del acero estudiado.



Gráfica 1.5. Análisis experimental del ensayo de tracción inicial.



Gráfica 1.6. Análisis numérico del ensayo de flexión 2D en 3 puntos.



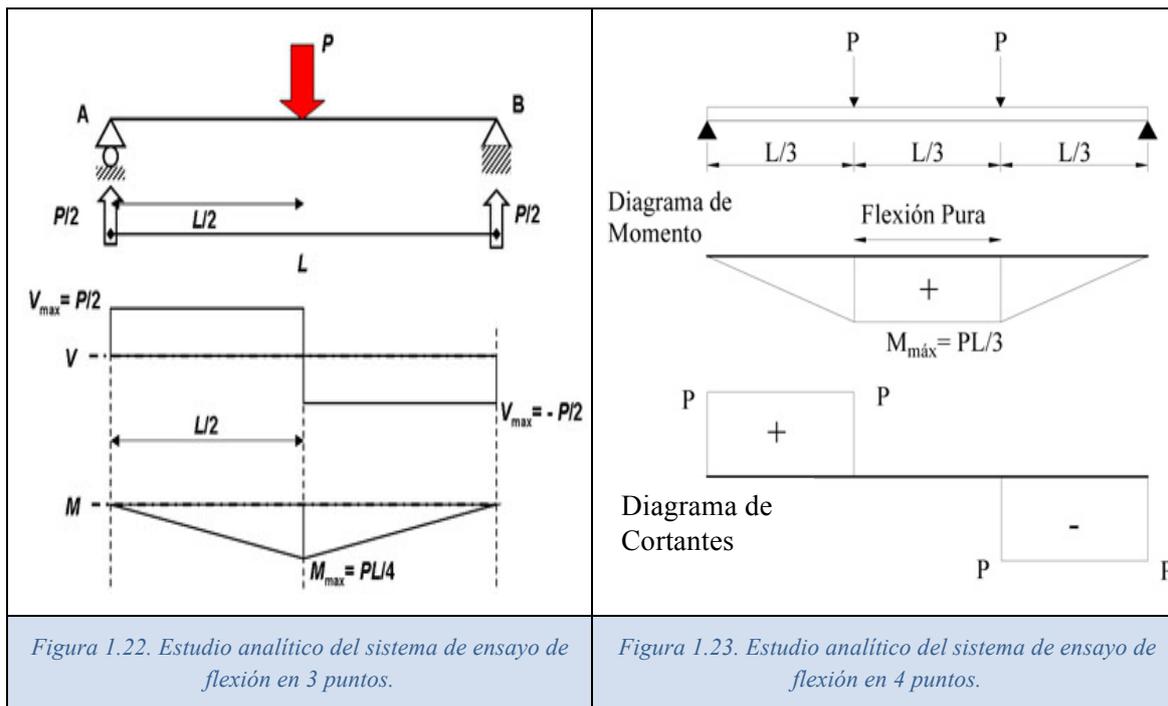
Gráfica 1.7. Análisis numérico del ensayo de flexión 2D en 4 puntos.

Además, el tiempo de análisis numérico de la alternativa de ensayo de flexión en 4 puntos es superior en comparación al análisis numérico del ensayo de flexión en 3 puntos (5'33'' frente a

1'18'' respectivamente). Si se tiene en cuenta el posterior estudio numérico 3D a realizar, el tiempo de cálculo se incrementa considerablemente para ambos modelos, haciendo más conveniente la solución 1 como base de estudio de la investigación.

10.1.3 Estudio analítico

En cuanto al estudio analítico, después del estudio conceptual de los modelos de ensayo de flexión en 3 y en 4 puntos (Figura 1.22 y Figura 1.23) se determinan las ecuaciones de equilibrio.



Del ensayo de flexión en 3 puntos (Figura 1.22), realizando cortes en la sección a lo largo del eje X se determina que:

- Cortante en el intervalo $0 \leq x < L/2$:

$$V \text{ [Newtons]} = \frac{P}{2} \tag{1.8}$$

- Momento flector en el intervalo $0 \leq x < L/2$:

$$M \text{ [Newtons * mm]} = -\frac{P}{2} * x \tag{1.9}$$

Del ensayo de flexión en 4 puntos (Figura 1.23), realizando cortes en la sección a lo largo del eje X se determina que:

- Cortante en el intervalo $0 \leq x < L/3$:

$$V \text{ [Newtons]} = P \tag{1.10}$$

- Cortante en el intervalo $L/3 \leq x < 2L/3$:

$$V \text{ [Newtons]} = P - P = 0 \tag{1.11}$$

- Momento flector en el intervalo $0 \leq x < L/2$:

$$M [\text{Newtons} * \text{mm}] = -(P * x) \quad (1.12)$$

- Momento flector en el intervalo $L/3 \leq x < 2L/3$:

$$M [\text{Newtons} * \text{mm}] = -P * \left(\frac{L}{3} + x\right) + (P * x) = -P * \frac{L}{3} \quad (1.13)$$

En ambas configuraciones, el momento flector es máximo en los puntos en los que el cortante es nulo. Del desarrollo de las ecuaciones de equilibrio mecánico que se derivan del comportamiento del alambre durante el ensayo mecánico, se concluye que ambos modelos ofrecen una expresión similar del cortante y el momento flector a lo largo del eje longitudinal de la pieza. Sin embargo, el tratamiento de las expresiones que describen la interpretación conceptual del sistema del ensayo de flexión en 4 puntos presenta un grado de complejidad superior al presentar un apoyo más.

En un ensayo de flexión en 4 puntos la zona central de la probeta, espacio entre los dos puntos de aplicación de fuerza, se encuentra sometida a flexión pura y, por lo tanto, la tensión es lineal según la distancia a la línea neutra, tal y como indica la ley de Navier (ecuación 1.11). Entonces, el momento flector en esta zona es constante y el valor del cortante nulo.

$$\sigma(x, y, z) = \frac{N_x(x)}{A} + \frac{zI_z - yI_{yz}(x)}{I_zI_y - I_{yz}^2}M_y(x) - \frac{yI_y - zI_{yz}(x)}{I_zI_y - I_{yz}^2}M_z(x) \quad (1.14)$$

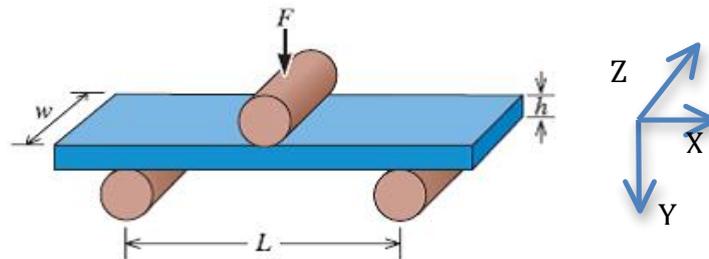


Figura 1.24. Modelo genérico de ensayo de flexión en 3 puntos sobre una placa plana.

Donde según el eje de coordenadas de la figura 1.24:

- I_y, I_z son los momentos de inercia de área según los ejes Y y Z.
- I_zI_y es el producto de inercia o momento de inercia mixto según los ejes Z e Y.
- $M_y(x), M_z(x)$ son los momentos flectores según las direcciones Y y Z.
- N es el esfuerzo axial a lo largo del eje.
- y es la distancia de una fibra a la línea neutra.

Si la dirección de los ejes de coordenadas (y, z) se toman coincidentes con las direcciones principales de inercia, entonces los productos de inercia se anulan y la ecuación 1.11 se simplifica notablemente. Además, si se considera el caso de flexión simple no desviada, es posible emplear la ecuación 1.12 para el cálculo de las tensiones internas.

$$\sigma(x, y, z)[\text{MPa}] = \frac{M_z(x)}{I_z} * y \quad (1.15)$$

Sin embargo, las diferencias entre el estudio analítico del ensayo de flexión en 3 puntos y en 4 puntos no son lo suficientemente significativas como para que uno de ambos modelos de ensayo

analizados prevalezca sobre el otro. Por ello, para la elección del modelo de ensayo de flexión en el que basar el estudio del proyecto, cobrará mayor importancia los análisis numéricos del diseño que se plantea.

10.1.4 Análisis del diseño del prototipo

En lo que conlleva al estudio del diseño conceptual, se comparan ambos modelos de ensayo expuestos en función de la complejidad que supone la concepción de cada uno de ellos. Por una parte, la altura mínima de la estructura del prototipo de ensayo de flexión en 3 puntos (*Plano 1.1*) es inferior a la mínima requerida para asegurar el éxito del ensayo de flexión en 4 puntos. Esto se debe a que para un mismo valor de desplazamiento vertical de los apoyos móviles, el valor de la lectura de fuerza del dinamómetro es menor en el ensayo de flexión a 4 puntos que a 3 puntos. Por consiguiente, la concepción del modelo de ensayo descrito en solución 2 requiere una altura de la estructura superior que permita un desplazamiento vertical superior del aplicador de fuerza en comparación con el ensayo de flexión en 3 puntos y así asegurar que el ensayo se completa correctamente.

Por otra parte, el prototipo de ensayo de flexión en 4 puntos necesita dos apoyos móviles que apliquen la carga simultáneamente sobre el alambre situado sobre los dos apoyos fijos; especificación que difiere de la alternativa de ensayo 1 cuya funcionalidad necesita un apoyo simple de dimensiones reflejadas en el *Plano 2*. Esto conlleva un aumento de las operaciones de fabricación del prototipo y la materia prima empleada. El diseño de este doble apoyo móvil requiere una longitud horizontal de la ranura situada en el centro de la estructura (*Plano 1.1*) compatible con la dimensión del apoyo doble. Además, las dimensiones del banco de ensayos sobre el que situar el prototipo establecen una limitación de la longitud máxima que éste puede presentar. Por lo que si se aumenta la dimensión de la ranura por la que desplazar verticalmente el aplicador de carga, se reduce el área disponible para instalar los apoyos fijos y por lo tanto la diversidad de posiciones óptimas de los apoyos del prototipo de ensayo y el dominio de diámetros de alambres que se pueden ensayar.

A raíz de estos dos requisitos de diseño, aspectos como la reducción de la materia prima empleada, la simplificación de las operaciones de fabricación, y la reducción del tiempo que supone la concepción del prototipo de ensayo de flexión conllevan a escoger la alternativa de modelo de ensayo 1 (flexión 3 puntos) frente al modelo de ensayo 2 (flexión 4 puntos).

10.2 Diseño del prototipo de ensayo mecánico de flexión

El diseño del prototipo de ensayo de flexión en 3 puntos aplicable a alambres de diferente diámetro es una tarea delicada cuyo resultado debe satisfacer las especificaciones de diseño establecidas en los apartados 9.2 y 9.3 de la Memoria y servir de herramienta para alcanzar el objetivo final del proyecto. Las diferentes alternativas de diseño que se han tenido más en cuenta son las siguientes:

- **Solución 1: diseño clásico de apoyos fijos.**

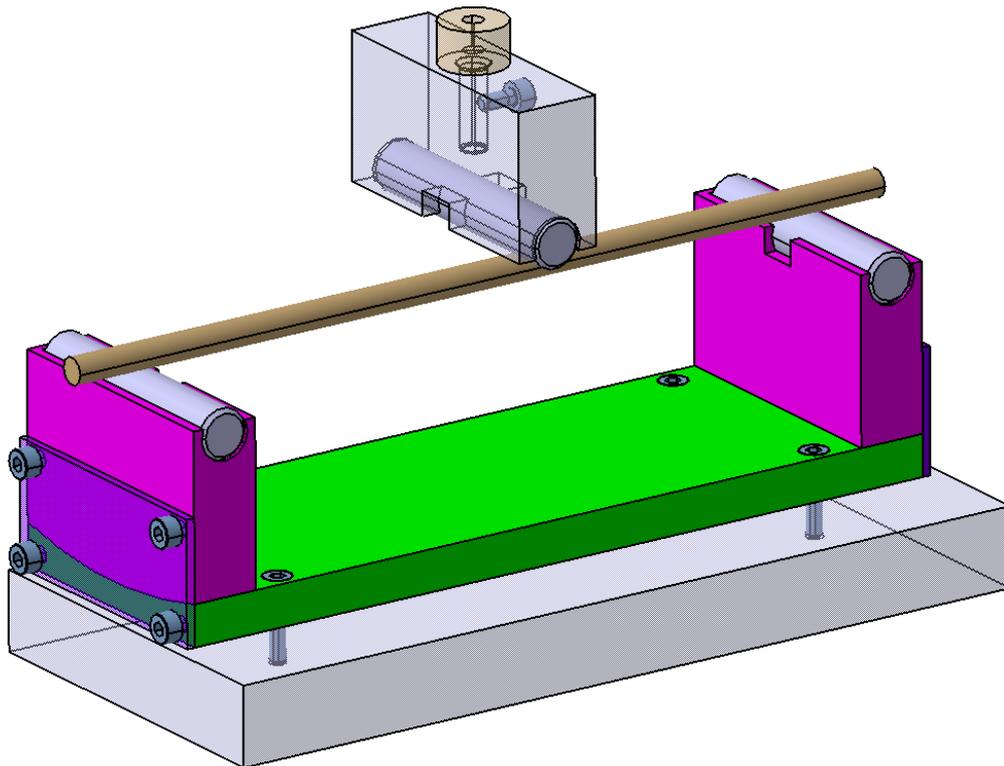


Figura 1.25. Alternativa 1 de diseño del prototipo de ensayo de flexión en 3 puntos.

Esta primera alternativa (Figura 1.25) sigue las directrices de un ensayo de flexión clásico con apoyos cilíndricos fijos. Las principales características favorables que plantea es la poca complejidad que supone su fabricación y la fiabilidad de los resultados que ofrece, ya que la distancia entre los apoyos fijos no varía a lo largo de un ensayo. Sin embargo, al no poder modificar la distancia entre los apoyos resulta que el valor de la carga necesaria a aplicar durante el ensayo sobrepasa rápidamente la resolución máxima de la medida ofrecida por el dinamómetro (500N) para diámetros de alambre mayores a 1,5 milímetros. Por lo tanto, el dominio de diámetros de alambre analizables con este prototipo no cumple con las especificaciones de diseño marcadas por ser éste demasiado pequeño.

- **Solución 2: diseño de apoyos regulables**

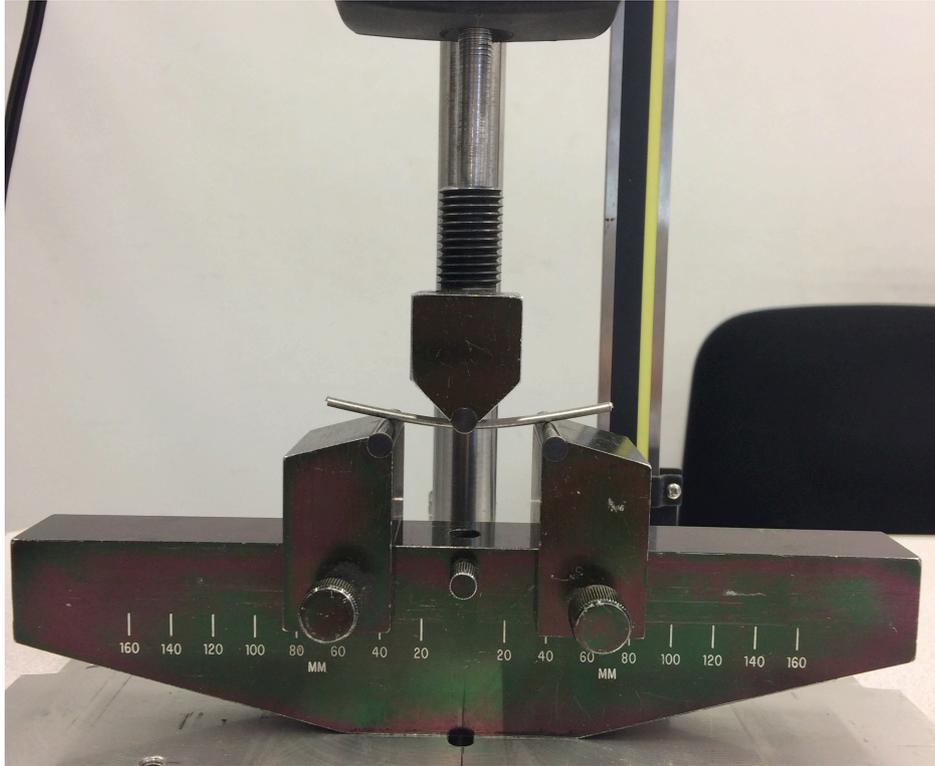


Figura 1.26. Alternativa 2 de diseño del prototipo de ensayo de flexión en 3 puntos.

La solución de prototipo de ensayo de flexión que se refleja en la figura 1.26 trata de solucionar el inconveniente por el que se rechaza la alternativa primera. La distancia entre los apoyos situados en los extremos del alambre a ensayar es regulable, aumentando así el dominio de diámetros de alambre analizable a partir de este prototipo de ensayo mecánico.

- Solución 3: diversos apoyos fijos situados a diferentes distancias.

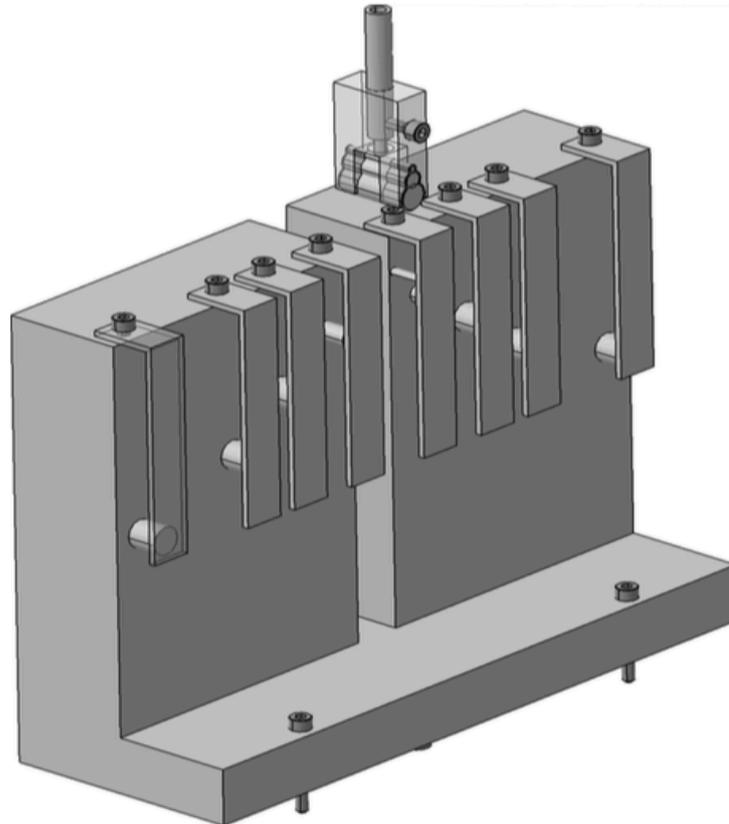


Figura 1.27. Alternativa 2 de diseño del prototipo de ensayo de flexión en 3 puntos.

Por último se muestra la tercera opción (Figura 1.27). A raíz de las dos primeras alternativas de diseño se opta por estudiar una estructura que contenga diversos apoyos fijos situados a diferentes alturas y distancias entre si. Esta disposición de los apoyos establece diferentes niveles de ensayo adaptando la distancia entre los apoyos en función del diámetro del alambre sin que la carga aplicada sobrepase los 500N máximos de lectura del dinamómetro.

La elección de la alternativa de prototipo más conveniente se lleva a cabo a partir del grado de cumplimiento de las especificaciones de diseño más relevantes. A continuación se establece un sistema de puntuaciones que permite, de una manera más objetiva, apostar por la mejor solución propuesta. La evaluación del grado de satisfacción de cada alternativa se recoge en la tabla siguiente:

- 1: No satisface la especificación.
- 2: Deficiente grado de satisfacción.
- 3: Satisface moderadamente la especificación.
- 4: Satisface considerablemente la especificación.

ESPECIFICACIÓN	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Dispositivo de ensayo aplicable en el contexto de producción industrial de resortes.	4	4	4
La carga necesaria a aplicar durante el ensayo no debe sobrepasar los 500N por la resolución máxima del dinamómetro del que se dispone.	2	3	4
La longitud óptima de los alambres a emplear en los ensayos = $(3 * \varnothing_{alambre}) + 30$ mm de seguridad.	2	4	3
Altura mínima entre los cilindros de apoyo de la estructura (apoyos fijos) y la base de la misma es de 50mm.	3	3	4
La distancia entre los apoyos fijos no debe variar a lo largo de la consecución de un ensayo.	4	3	4
El dominio de diámetros de alambre capaz de analizar debe ser lo más amplio posible.	2	3	4
Los esfuerzos de flexión transmitidos a la estructura no deben deformar los cilindros que constituyen los apoyos fijos.	4	4	4
La complejidad en la fabricación y el montaje del prototipo debe minimizarse.	3	2	4
El coste de fabricación del prototipo debe ser inferior a 1.000 €.	4	4	4
TOTAL (máx 38 puntos)	28	30	37

Tabla 1.4. Evaluación de cada alternativa en función de las especificaciones de diseño.

El principal problema de la **solución 1** es el bajo dominio de diámetros de alambre que permite analizar este prototipo de ensayo de flexión. Además, se debe tener en cuenta que a cada diámetro de alambre le corresponde una distancia entre apoyos mínima óptima. Por lo tanto se da el caso de que un alambre sea ensayado de tal manera que los valores de la distancia entre los apoyos y de la longitud del alambre cortado sean óptimos. Esto conlleva a una reducción en la fiabilidad de los ensayos y a un desperdicio de acero al no poder cortar la longitud mínima de alambre asociada a la distancia entre apoyos y al diámetro del mismo.

La **segunda opción** de prototipo de ensayo de flexión aumenta su puntuación total debido principalmente a la introducción de apoyos fijos regulables. Gracias a la posibilidad de variar la distancia entre los apoyos se aumenta considerablemente el dominio de diámetros de alambre capaz de ser analizados mediante este prototipo. Sin embargo, tras haber testeado su funcionalidad mediante una serie de ensayos experimentales, se ha evidenciado que debido a las grandes cargas que se transmiten a los apoyos, éstos sufren un pequeño desplazamiento que se hace más evidente cuanto mayor es la carga aplicada. Por lo tanto, este fenómeno repercute negativamente en la fiabilidad de los ensayos de flexión realizados por medio de este prototipo,

rechazando así esta alternativa de diseño al no poder asegurar con precisión que los apoyos permanecerán fijos independientemente de la carga aplicada.

Se puede concluir que la solución más completa y óptima es la **alternativa de diseño 3**. Este mecanismo de ensayo de flexión en tres puntos ofrece la posibilidad de analizar un dominio de diámetros más amplio en comparación a las dos alternativas de diseño propuestas. Además, los apoyos sobre los que se sustenta el alambre están instalados de tal manera que no exista la posibilidad de desplazamiento o deformación de los mismos, asegurando así la calidad y fiabilidad de los ensayos realizados. Finalmente, la escasa complejidad de fabricación del sistema junto con los bajos costes que supone, ayudan a situar esta alternativa de diseño conceptual como la que mejor satisface las especificaciones planteadas y por lo tanto la elegida para el desarrollo del proyecto.

10.3 Concepción del centrado del alambre durante el ensayo.

Una de las tareas importantes a realizar es la de asegurar que el alambre no se desplace transversalmente durante el desarrollo del ensayo de flexión. Para ello se considera instalar una placa fina de aluminio que constituye un apoyo plano entre la sección circular del cilindro y la placa. Si esta pieza no se instalase en el mecanismo existiría riesgo de que el alambre saliese despedido del prototipo durante el desarrollo del ensayo y de que la longitud de los cilindros introducidos en la estructura no fuese la correcta dando lugar a deformaciones de estos a causa de las cargas aplicadas.

- **Solución 1: placa simple en L (Plano 1.5).**

La primera solución que se plantea es la instalación de la pieza descrita en el plano 1.5. En el ensamblaje final que se muestra en el plano 0 aparecen instaladas ocho placas, una para cada cilindro de apoyo. Sin embargo sólo se fabrican dos de ellas de tal manera que se instalen sólo en la posición correspondiente a los cilindros de apoyo que se empleen en cada caso.

- **Solución 2: Placa fija en L (Plano 3).**

Esta segunda solución se plantea como alternativa a la anterior. La pieza descrita en el plano 3 cumple la misma función que la anterior, sin embargo, ésta permanece fija una vez se ha hecho el ensamblaje completo.

Finalmente, se concluye indicando que la alternativa más valorada y que mejor satisface las especificaciones de diseño requeridas es la solución 1. Se ha rechazado la segunda alternativa propuesta ya que su instalación no permite observar con facilidad el comportamiento del alambre durante el desarrollo del ensayo de flexión. Además, en comparación con la solución 2, la primera propuesta permite reducir la cantidad de aluminio necesario para la fabricación de la pieza y por lo tanto el coste global del prototipo.

10.4 Determinación de la relación Tensión - Deformación

La última etapa de este proyecto consiste en determinar el método a seguir para obtener la relación de tensión – deformación propia del acero estudiado a partir de los datos recogidos en el ensayo de flexión de dicho material. Para ello se contemplan diversas alternativas:

- **Solución 1: Galgas extensiométricas.**

Esta alternativa consiste en estudiar la deformación que sufre el alambre a lo largo del ensayo de flexión por medio de galgas extensiométricas instaladas sobre éste. Esta solución presenta una gran facilidad y rapidez en la obtención de la relación que se quiere conseguir con el objetivo del proyecto. Sin embargo su viabilidad es prácticamente nula al no ser posible instalar las galgas en un alambre de dimensiones tan pequeñas.

- **Solución 2: Correlación inversa.**

Esta segunda alternativa consiste en llevar a cabo la correlación inversa de la relación fuerza–desplazamiento obtenida a partir del ensayo de flexión experimental. Para ello se recurre en primer lugar a un estudio analítico con el que determinar las características mecánicas del alambre (R_e , R_m , E , $\epsilon_{plástica}$) a partir de los resultados de los ensayos experimentales aplicados sobre diferentes alambres. Posteriormente, puesto que no se conoce con certeza la precisión de las expresiones recogidas en el estudio analítico se procede al “virtual testing”. Este procedimiento consiste en analizar numéricamente los ensayos de flexión aplicados sobre los alambres introduciendo las características mecánicas de la pieza a estudiar que se obtienen a partir del estudio analítico. De esta manera se puede valorar la precisión y validez de los cálculos realizados para caracterizar mecánicamente los alambres contrastando las posibles diferencias entre la relación fuerza–desplazamiento obtenida experimental y numéricamente (“virtual testing”). Esta alternativa es la escogida para determinar las propiedades elástico-plásticas del acero estudiado a partir del ensayo de flexión con el prototipo diseñado.

10.5 Resolución de la evaluación de las alternativas planteadas

A modo de resumen se incluye a continuación el diagrama que recoge todas las posibilidades que se han considerado en cada etapa del proyecto realizado. En color rojo se incluyen las alternativas rechazadas y en color verde aquellas que se han escogido finalmente para constituir una propuesta de ensayo de flexión que cumpla con el objeto de esta investigación.

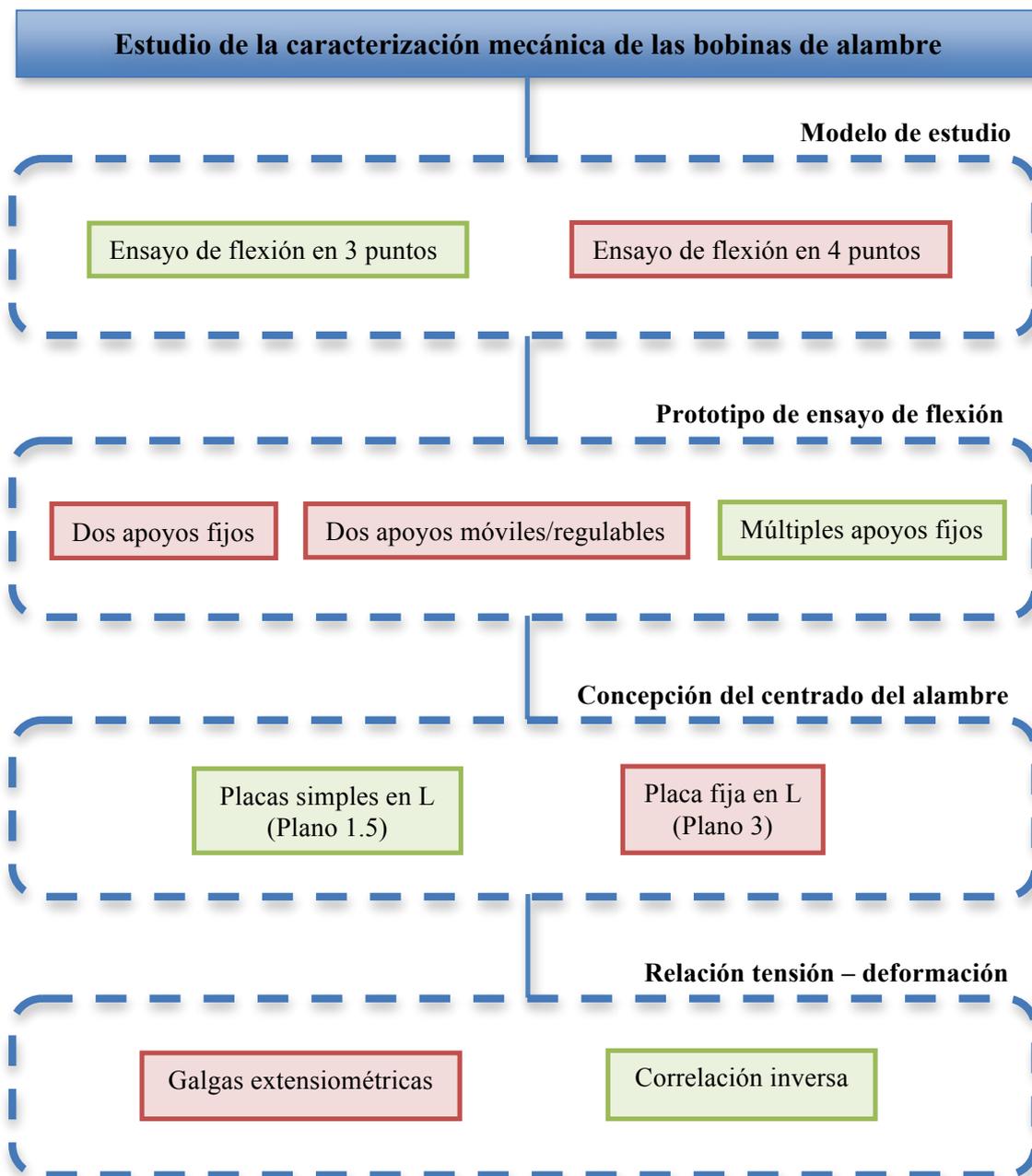


Diagrama 1.1. Propuesta del ensayo de flexión en función de las alternativas contempladas.

11 DESARROLLO DE LA ALTERNATIVA PROPUESTA

El ensayo de flexión que se presenta en este epígrafe combina un detallado análisis experimental junto a una implementación teórica y numérica del modelo mecánico presentado. Se ha de tener en cuenta que los resultados del ensayo de flexión son similares a las curvas tensión–deformación propias de un ensayo de tracción. Sin embargo, en los ensayos de flexión la tensión se expresa normalmente en función de deflexiones en lugar de en función de deformaciones.

A pesar de esto, en el análisis numérico 2D presentado anteriormente se ha demostrado que la curva fuerza–desplazamiento presenta una forma similar a los resultados propios del ensayo de tracción. Por lo tanto, para continuar con este estudio y simplificar la interpretación de los próximos resultados obtenidos en los ensayos de flexión experimentales y numéricos, la carga se expresa en función del desplazamiento vertical del elemento que aplica la flexión sobre el alambre.

De la evaluación de las posibles alternativas de estudio planteadas se ha demostrado que el ensayo de flexión en tres puntos representa la opción más segura a emplear para la buena consecución del objetivo inicial planteado. Por ello, una de las aportaciones antes de empezar con el análisis de las características de los alambres es la verificación de las principales hipótesis de partida que se plantean en el modelo de ensayo de flexión:

- La hipótesis fundamental de partida es la de Euler-Bernouilli que establece que las secciones planas antes de la deformación permanecen planas después de la deformación. La contrastación experimental del modelo teórico con los resultados obtenidos en el laboratorio y en las simulaciones 3D permite comprobar la bondad de esta primera hipótesis.
- Otra aproximación empleada en el modelo estudiado es el desarrollo en el ámbito de pequeñas deformaciones, que establece que el momento flector provocado en cada sección por la carga aplicada en el centro del alambre es proporcional a la distancia entre dicho punto de aplicación y la sección analizada. El cumplimiento de esta hipótesis inicial se evalúa comparando el resultado con el supuesto contrario: que la deformada en el centro del alambre es suficientemente grande como para que los momentos dependan del giro experimentado en cada sección. Al tratarse el alambre de un elemento de dimensiones muy pequeñas, prevalece el supuesto del estudio según pequeñas deformaciones.
- Otra hipótesis que se impone necesariamente es el de la simetría del comportamiento a tracción y compresión durante el ensayo de flexión. En los resultados derivados del análisis numérico del ensayo de flexión se observa la evaluación de esta hipótesis en el momento anterior a la desaparición de la carga aplicada. Cuando ésta desaparece la deformación elástica experimentada por el alambre se disipa y queda visible el estado de tensiones internas mostrando las deformaciones residuales permanentes provocadas por la deformación plástica.
- Finalmente, la última que se plantea en el análisis numérico del ensayo de flexión sobre el alambre es el uso de la simetría a la hora de configurar el ensayo. Gracias a las herramientas que dispone el programa CAE Abaqus, es posible modelar una parte del sistema de ensayo y aplicarle diversas condiciones de simetría sin afectar el resultado

final de tal manera que éste sea el mismo que si del análisis del modelo entero se tratase. Esto se hace para reducir el tiempo empleado por el programa para realizar el análisis numérico y ofrecer los resultados del ensayo de flexión.

Con todo esto se puede establecer de forma más completa la verificación de las formulaciones empleadas para el modelado de los ensayos de flexión sobre diferentes tipos de alambre, comprobando así la efectividad numérica y analítica del análisis de elementos finitos estructurales.

11.1 Implementación numérica 3D del ensayo de flexión en 3 puntos.

Una vez estudiadas las configuraciones del ensayo de flexión sobre una placa fina metálica, se simula en Abaqus el ensayo de flexión en 3 puntos sobre una pieza con las dimensiones de un alambre real. En este caso el análisis por elementos finitos se configura de manera que el modelo simulado se aproxime lo máximo posible a las condiciones reales experimentales, teniendo en cuenta las hipótesis que se acaban de presentar. De nuevo, el estudio se realiza para cada uno de los aceros indicados en el plan de experiencias con el fin de verificar la bondad de la aproximación tomada en el análisis numérico 2D en cuanto a la geometría de acero estudiada (placa plana).

En este caso se tienen en cuenta los mismos criterios tomados en la configuración 2D del ensayo de flexión en 3 puntos en Abaqus expuestos en el apartado 10.1.1.2.1. cambiando la sección rectangular (placa plana) del objeto a estudiar por la sección cilíndrica propia que caracteriza al alambre:

Detalles de la modelización en Abaqus	
Diámetro del alambre	5 mm
Longitud del alambre	100 mm
Diámetro del cilindro central de apoyo	20 mm
Diámetro de los cilindros inferiores de apoyo	10 mm
Distancia entre cilindros inferiores de apoyo	80 mm

Tabla 1.5. Medidas de la configuración Abaqus 3D del ensayo de flexión en 3 puntos.

El procedimiento de cálculo de la deformada máxima en la sección central del alambre requiere un proceso de iteración en el que se determine aquella deformación máxima unitaria y por lo tanto, todas las deformaciones unitarias de esa sección cuyas tensiones asociadas cumplan con la condición de equilibrio:

$$M_z(x)[N * mm] = \iint_A y * \sigma_x(y) dA \tag{1.16}$$

Como se desea calcular la deformación máxima para diferentes valores de fuerza, este proceso debe repetirse para cada valor de la fuerza exterior impuesta. Este procedimiento se representa mediante el diagrama 1.2.

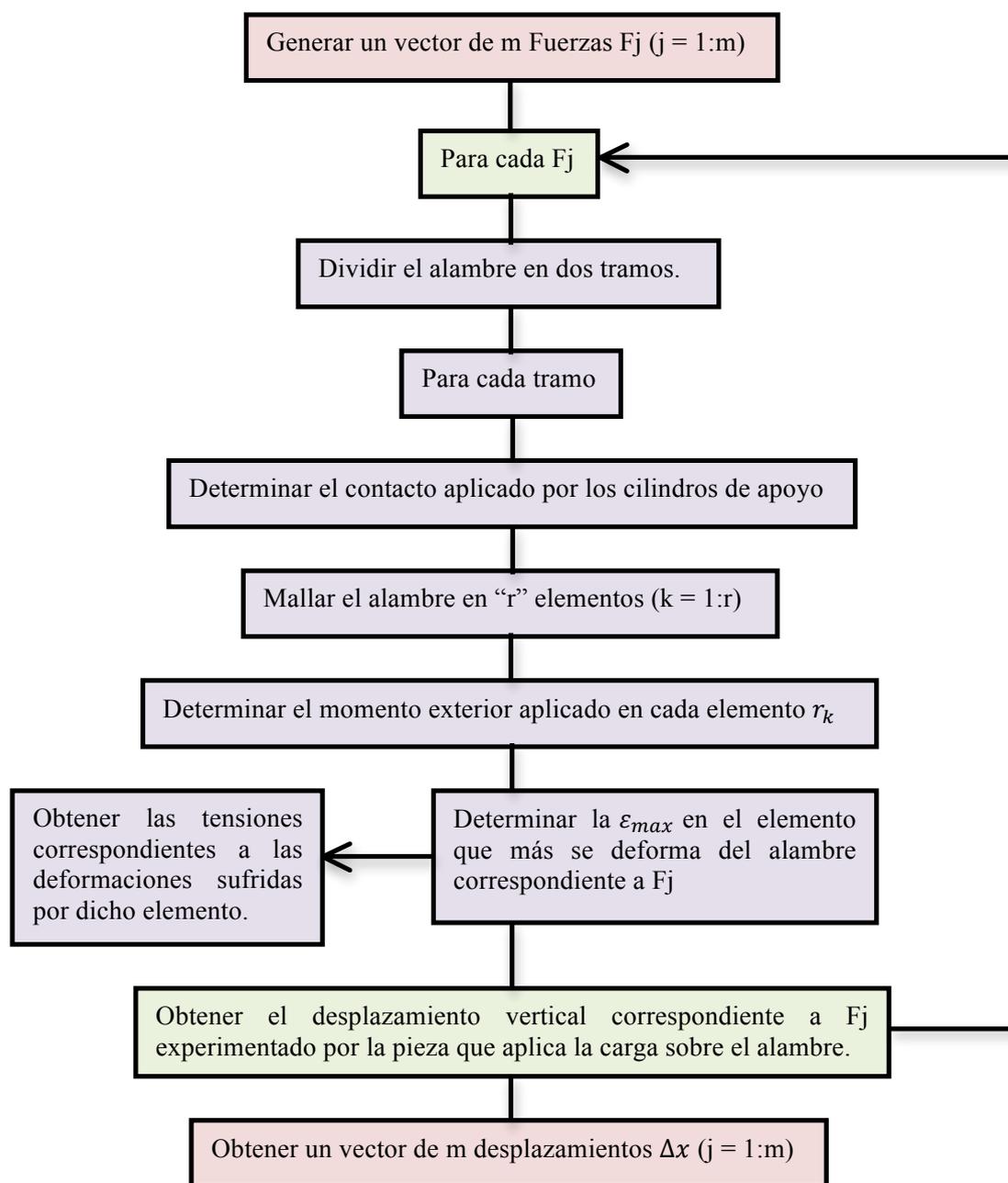


Diagrama 1.2. Esquema del proceso iterativo correspondiente al estudio numérico del ensayo de flexión sobre un alambre.

Tras haber configurado convenientemente los parámetros y las características elásticas y plásticas de cada acero según el plan de experiencias expuesto en el apartado 10.1.1.1. se obtiene el modelo siguiente:

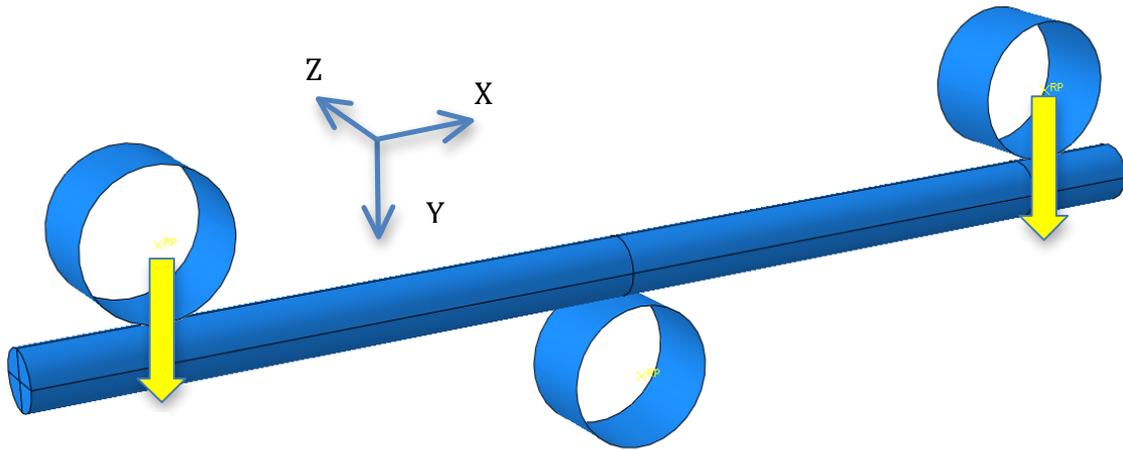


Figura 1.28. Representación numérica 3D del ensayo de flexión en 3 puntos sobre un alambre.

Es importante realizar el análisis numérico haciendo uso de las dos simetrías aplicables en este caso, ya que de esta manera se reducirá considerablemente el tiempo de cálculo de la simulación Abaqus sin influir en el resultado inicial de tal manera que éste sea el mismo que si del análisis del modelo entero se tratase. Las simetrías empleadas en este caso se ilustran en la figura 1.29, simetría vertical en el plano XY y simetría horizontal en el plano YZ.

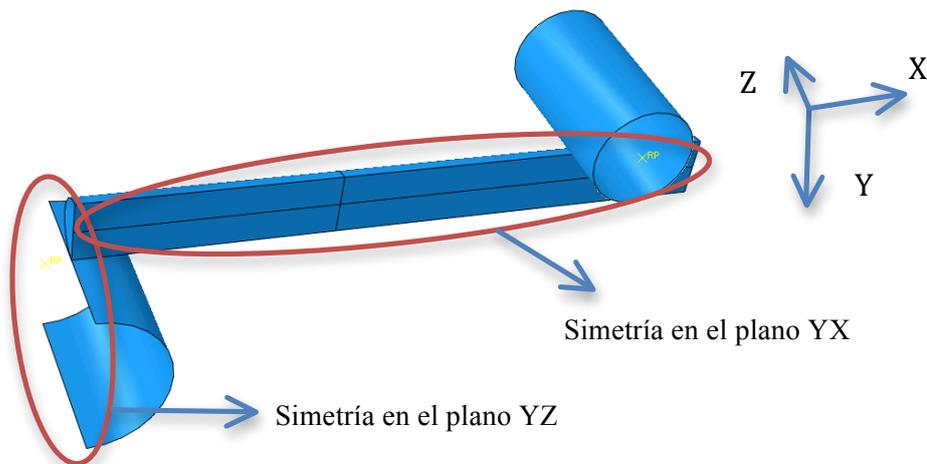
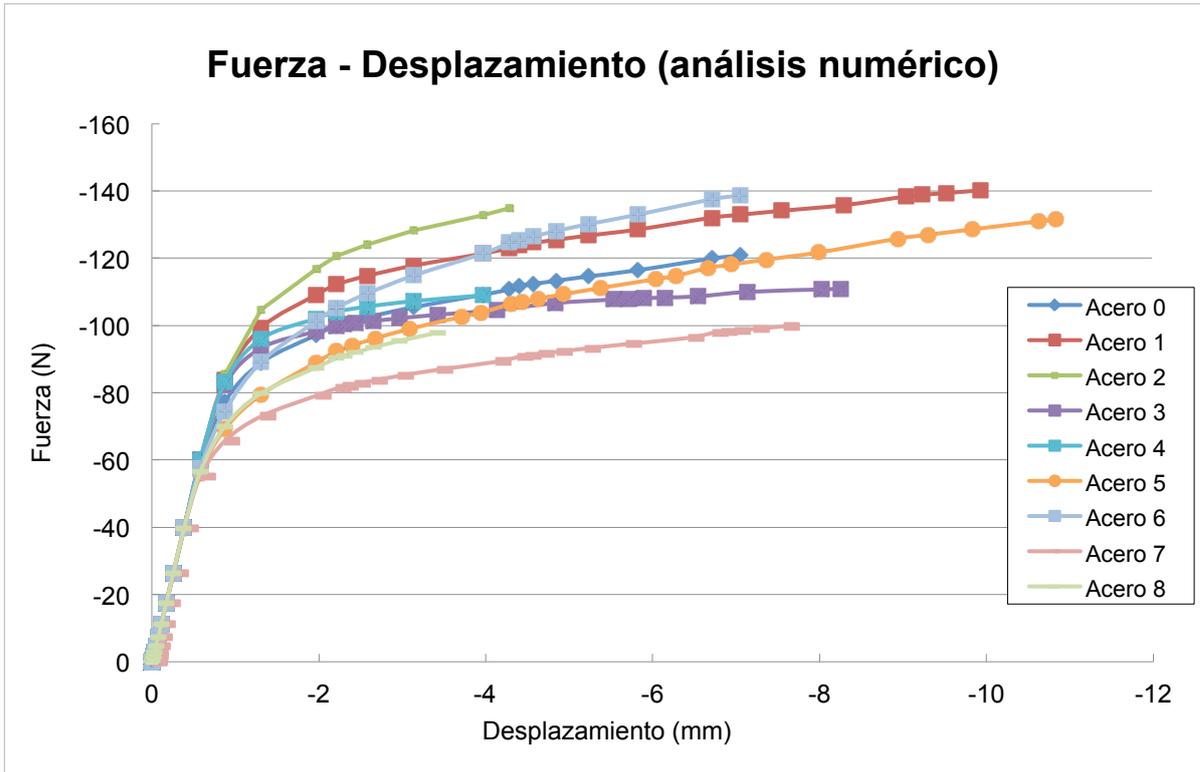
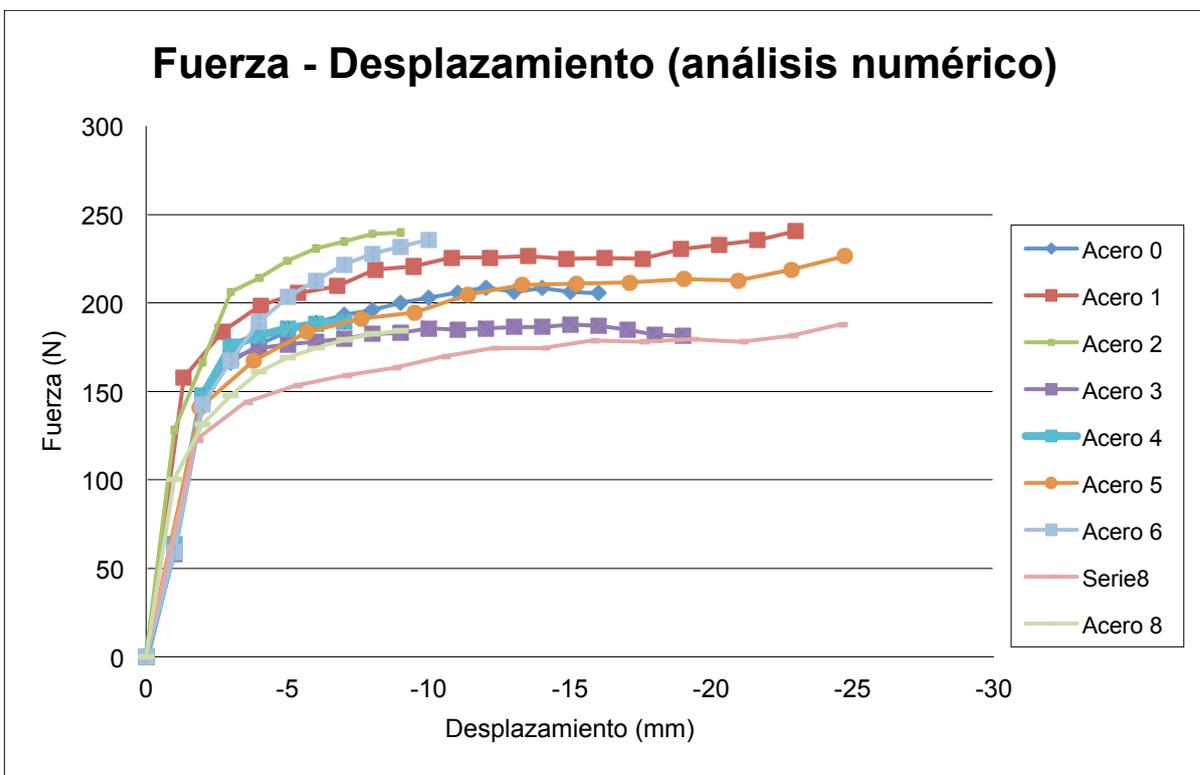


Figura 1.29. Representación numérica 3D del ensayo de flexión en 3 puntos teniendo en cuenta el uso de simetrías.

Una vez completadas las simulaciones, de la misma manera que se ha realizado para el análisis de los aceros estudiados en 2D, se recuperan las relaciones de fuerza-desplazamiento para cada uno de ellos.



Gráfica 1.4. Análisis numérico del ensayo de flexión 2D en 3 puntos.



Gráfica 1.7. Análisis numérico del ensayo de flexión 3D en 3 puntos sobre los aceros del plan de experiencias.

Es observable que existe una similitud considerable entre la evolución de los resultados derivados del análisis numérico 2D del ensayo de flexión en tres puntos sobre una placa plana (Gráfica 1.4) y los que se muestran en la gráfica 1.7. Sin embargo, como era de esperar dada la diferencia de geometría entre los elementos ensayados y las diferencias en la configuración Abaqus de cada modelo, el orden de magnitud de los valores de carga aplicada y el desplazamiento vertical o flecha máxima son diferentes en cada modelo. Aquello que permite otorgar validez a la utilización de este modelo para el estudio de las características mecánicas del alambre es el hecho de que, del mismo modo que para el análisis numérico 2D realizado, la curva obtenida para cada acero estudiado es similar a la curva de tensión-deformación propia de un ensayo de tracción. Por lo tanto, llegados a este punto se puede concluir que el modelo de ensayo mecánico de flexión estudiado sirve de base para determinar un método que relacione ambas curvas y de esta manera el conocimiento de una conllevaría el conocimiento de la otra.

Además, a partir de los valores de desplazamiento vertical máximo del aplicador de carga se determina en un primer momento la altura mínima a la que deben estar los apoyos fijos respecto de la base de la estructura de ensayo.

11.2 Dimensionamiento del prototipo.

El prototipo de ensayo de flexión a desarrollar debe de ser aplicable para cualquier alambre de cualquier diámetro. Por ello se instalan varios niveles o posiciones de ensayo de los cuales varía la distancia entre los apoyos y el diámetro de los mismos. La tarea ahora consiste en dimensionar y posicionar correctamente los cilindros que, introducidos en la estructura de base, constituyen dichos apoyos.

Con el fin de satisfacer las características de diseño que debe tener el prototipo dedicado a realizar los ensayos de flexión sobre alambres reales en el contexto industrial, es necesario en un primer momento realizar un estudio analítico. En éste se estudia la distancia horizontal que debe existir entre cada apoyo y de esta manera la posición óptima que deben presentar los apoyos en función del diámetro del alambre que se va a estudiar. Las expresiones empleadas en el estudio analítico se derivan del diseño conceptual del ensayo de flexión en 3 puntos (Figura 1.22.). Los datos de entrada para determinar las ecuaciones de equilibrio que protagonizan el estudio analítico son:

P: fuerza vertical aplicada en el centro del alambre.

L: longitud que existe entre los dos apoyos inferiores del sistema de ensayos de flexión.

D: diámetro del alambre estudiado.

- Cálculo del momento flector provocado por la aplicación de la fuerza en el centro del alambre:

$$M_f = \frac{P}{2} * \frac{L}{2} \quad (1.17)$$

- La tensión máxima en la fibra inferior de la sección del alambre debe ser menor al límite elástico:

$$\sigma_{lim.elast.} = \frac{M_f}{I_{GZ}} * \frac{D}{2} \leq Re \quad (1.18)$$

- Momento de inercia de área del alambre (sección circular):

$$I_{GZ} = \frac{\pi * D^4}{64} \tag{1.19}$$

Finalmente, relacionando estas tres ecuaciones se consigue la expresión de la distancia teórica mínima que debe existir entre los apoyos en función del diámetro del alambre. Es necesario indicar que el valor de la carga P impuesto es fijo, siendo éste la mitad de la fuerza máxima que puede medir el dinamómetro empleado. De esta manera se obtienen unos valores de distancia mínima entre los apoyos tales que los valores de fuerza que se obtengan en los ensayos sean acordes con el rango de medición del dinamómetro empleado (500N max).

- Longitud teórica mínima requerida entre los dos apoyos inferiores:

$$L_{entre\ apoyos} \geq \frac{Re * \pi * D^3}{8 * P} \tag{1.20}$$

Es necesario indicar que este estudio analítico debe venir seguido de un estudio numérico que confirme la bondad del dimensionamiento realizado e incremente la calidad y precisión del mismo. Se asegura así un posterior análisis experimental fiable en el que se emplea el dispositivo diseñado y carente de errores de dimensionamiento y funcionalidad.

Se establecen diferentes posiciones de ensayo en relación a la distancia que existe entre los apoyos fijos en contacto con la sección longitudinal inferior del alambre a la hora de instalarlos en el mecanismo de ensayo diseñado. Al mismo tiempo, a partir de los cálculos analíticos que se acaban de presentar se determina la posición de ensayo asociada a cada alambre en función de su diámetro y su límite elástico (Tabla 1.6). Posteriormente se calcula la distancia teórica mínima que debe existir entre los apoyos sobre los que se ensaye a flexión en 3 puntos el alambre con el fin de que la fuerza aplicada sea inferior a 500 Newtons (Tabla 1.7 y Tabla 1.8).

Posición	Distancia horizontal entre apoyos (mm)	Longitud mínima del alambre (mm)
1	20	50
2	40	70
3	80	110
4	120	150
5	200	230

Tabla 1.6. Especificaciones de cada posición de ensayo.

D (mm)	Acero DH			
	Re (MPa)	Rm (MPa)	L teórica mínima entre apoyos (mm)	Posición óptima de los apoyos
0,25	1906,40633	2723,437615	0,046790251	1
0,5	1733,703165	2476,718807	0,34041182	1
0,75	1632,67829	2332,397557	1,08194276	1
1	1561	2230	2,452013066	1
1,25	1505,401999	2150,574284	4,618515489	1
1,5	1459,975125	2085,678749	7,739967025	1
1,75	1421,56725	2030,810356	11,96744479	1
2	1388,296835	1983,281193	17,44585255	1
2,25	1358,950249	1941,357499	24,31481609	2
2,5	1332,698834	1903,855477	32,70935051	2
2,75	1308,95154	1869,930771	42,76037714	3
3	1287,271959	1838,959942	54,59513577	3
3,25	1267,328678	1810,469541	68,33752135	3
3,5	1248,864084	1784,091549	84,10836411	4
3,75	1231,673958	1759,534226	102,0256662	4
4	1215,59367	1736,562385	122,2048045	4
4,25	1200,48856	1714,983657	144,7587062	5
4,5	1186,247084	1694,638691	169,7980022	5
4,75	1172,775803	1675,394005	197,4311626	5
5	1159,995669	1657,136669	227,7646169	5

Tabla 1.7. Asignación de la posición de ensayo para cada diámetro de alambre según el acero de referencia DH.

Acero Inox 302				
D (mm)	Re (MPa)	Rm (MPa)	L teórica mínima entre apoyos (mm)	Posición óptima de los apoyos
0,25	1591,588093	2273,697275	0,039063449	1
0,5	1467,444046	2096,348638	0,288131965	1
0,75	1394,824435	1992,606335	0,924321838	1
1	1343,3	1919	2,110050706	1
1,25	1303,334544	1861,906491	3,9985803	1
1,5	1270,680388	1815,257697	6,736432791	1
1,75	1243,071693	1775,816704	10,46478235	1
2	1219,155954	1741,651362	15,32036555	1
2,25	1198,060776	1711,515395	21,43612502	2
2,5	1179,190497	1684,557853	28,94168909	2
2,75	1162,120254	1660,171791	37,96374335	2
3	1146,536342	1637,90906	48,62632701	3
3,25	1132,200533	1617,429333	61,05107492	3
3,5	1118,927647	1598,468067	75,35741889	4
3,75	1106,570886	1580,815551	91,66275786	4
4	1095,011907	1564,302725	110,0826036	4
4,25	1084,153916	1548,791309	130,7307071	5
4,5	1073,91673	1534,166757	153,7191685	5
4,75	1064,233183	1520,333118	179,1585348	5
5	1055,046451	1507,209216	207,1578862	5

Tabla 1.8. Asignación de la posición de ensayo para cada diámetro según el acero de referencia Inox 302.

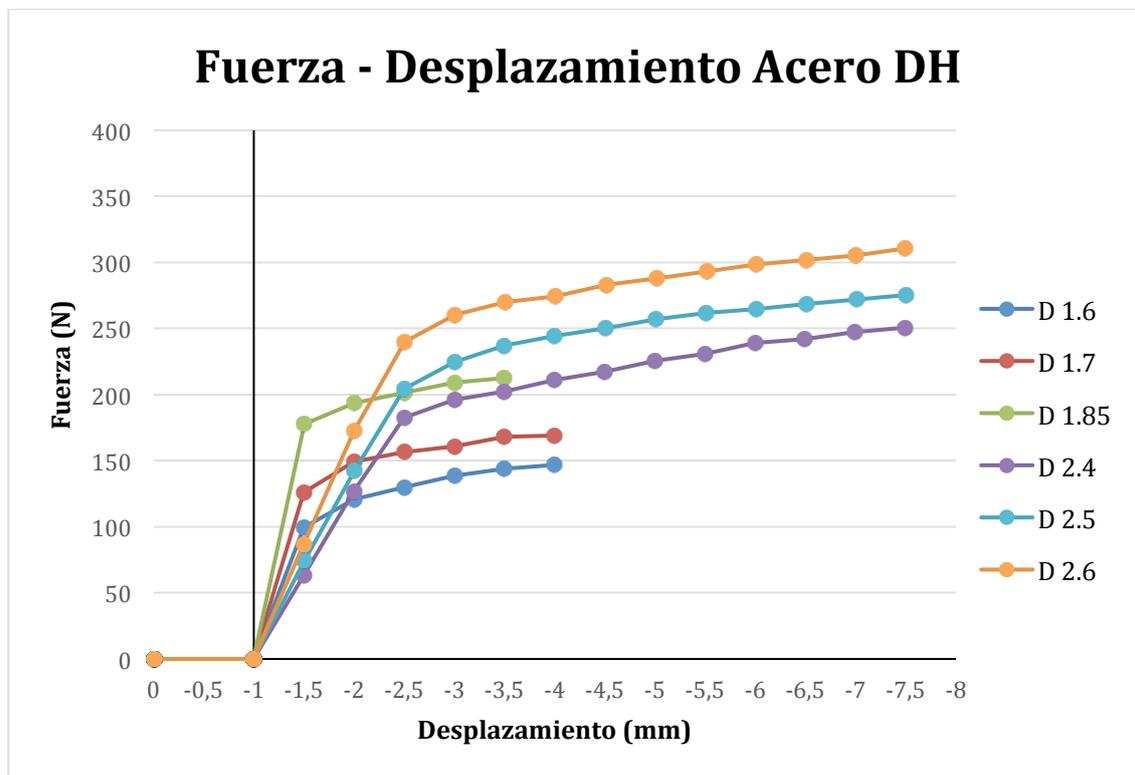
Las tablas 1.7 y 1.8 se confeccionan tomando como referencia las características mecánicas de los aceros DH e Inox 302 respectivamente definidas a partir de la norma DIN estándar (Tabla 1.9).

Material	DH steel	Stainless steel 1.4310
Manufacturer's limits (mm)	$0.3 \leq d \leq 12$	$0.15 \leq d \leq 15$
G (N/mm ²)	81500	70000
E (N/mm ²)	206000	192000
Rm = f(d) (N/mm ²)	$2230 - 355.94 \ln(d)$	$1919 - 255.86 \ln(d)$
Maximum allowable stress τ_{zul} (% of Rm)	50	48
ρ (Kg/dm ³)	7.85	7.90

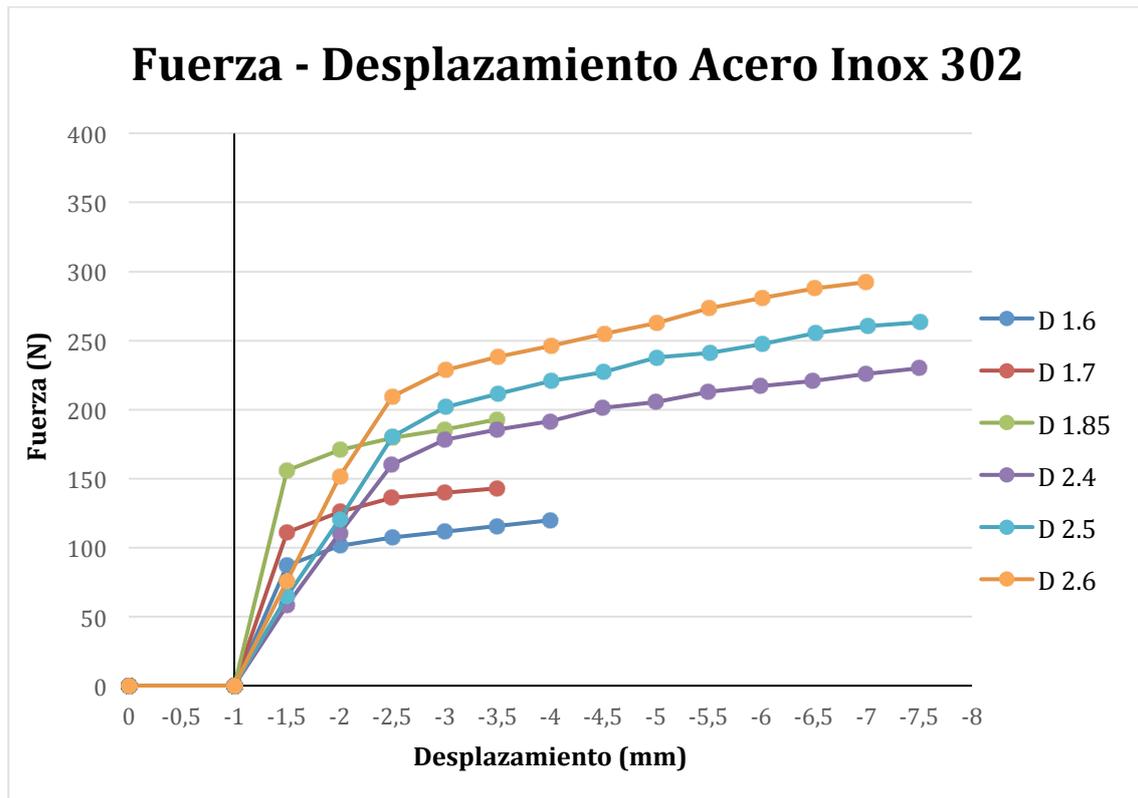
Tabla 1.9. Norma DIN estándar referente a los aceros DH e Inox 302.

Además, la fuerza máxima aplicable considerada para el cálculo de la longitud teórica mínima necesaria entre los apoyos de los extremos es de 250N, ya que el límite de medida del dinamómetro del que se dispone es de 500N. Así, aunque se ensaye un acero al que se necesite aplicar una fuerza superior en relación a los dos tipos de acero tomados como referencia en la tabla, el orden de magnitud de dicha fuerza será similar y no sobrepasará los 500N. Es decir, el rango de medición del dinamómetro debe de ser acorde con los valores de fuerza que se pretende medir.

A continuación se lleva a cabo el análisis numérico de diversos aceros introduciendo las características geométricas de los alambres provistos para el estudio experimental del ensayo de flexión. Se desconoce la naturaleza de los aceros de los alambres de los que se dispone, por ello se aproximan sus características mecánicas según la norma DIN estándar expuesta como si se tratasen de aceros DH o Inox 302 (Gráfica 1.8 y Gráfica 1.9).



Gráfica 1.8. Análisis numérico del ensayo de flexión 3D en 3 puntos de alambres de diferente diámetro de acero DH.



Gráfica 1.9 Análisis numérico del ensayo de flexión 3D en 3 puntos de alambres de diferente diámetro de acero Inox 302.

Mediante este análisis se puede afirmar que la posición de los cilindros de apoyo que constituyen los diferentes niveles de ensayo asegura que la fuerza máxima aplicada nunca supere los 500N propios del límite de lectura del dinamómetro. Además, se completa la información necesaria para determinar la altura mínima a la que deben de estar situados los cilindros de apoyo con respecto de la base de la estructura de ensayo.

Una vez llegado a este punto, se ha estudiado numéricamente el valor de la flecha máxima que experimenta la zona central de alambres de diferente diámetro. Este análisis se ha realizado sobre aceros con una resistencia elástica baja (apartado 4.1) y sobre aceros con un valor alto de resistencia elástica (aceros DH e Inox 302). Se asegura de esta manera que no exista contacto entre el punto de flexión máxima del alambre (centro) y la base del mecanismo diseñado, haciendo necesario parar el ensayo antes de tiempo y anulando así su validez. En resumen, las simulaciones Abaqus completan y afinan el estudio realizado sobre el dimensionamiento del mecanismo de ensayo de flexión en tres puntos.

11.3 Procedimiento experimental

11.3.1 Descripción general

El conjunto de ensayos mecánicos experimentales de flexión en 3 puntos sobre alambres de diferentes diámetros y materiales tiene lugar en el banco de ensayos proporcionado por el Instituto Clément Ader. Éste presenta una zona que permite la instalación de múltiples prototipos en función de lo que se quiera estudiar por lo que presenta gran versatilidad de utilización. En este caso se instala el prototipo de ensayo de flexión diseñado y definido en los planos presentados en el Capítulo 3 *Planos*. El sistema global se puede descomponer en cuatro partes principales:

- El prototipo de ensayo: es la zona diseñada en la que se apoya el alambre y tiene lugar la deformación por flexión del mismo provocada por la aplicación de una carga.
- Base plana: es la zona completamente lisa en la que se instala convenientemente el prototipo de ensayo de flexión.
- Regla digital: instrumento montado a lo largo de las columnas que permite medir el desplazamiento del cabezal de medición conectado al dinamómetro.
- Dinamómetro: es el instrumento que determina el valor de la fuerza aplicada al alambre.

11.3.2 Instalación del mecanismo y procedimiento experimental

El proceso de fabricación de las piezas que constituyen el dispositivo de ensayo diseñado ha terminado fuera del periodo de participación en el proyecto recogido en este documento. Por lo que los resultados de los ensayos recogidos en el mismo no han podido derivar del prototipo desarrollado.

Sin embargo, la necesidad de apoyar este proyecto de investigación sobre una base experimental es de vital importancia para continuar con el desarrollo de éste y comprobar las hipótesis planteadas y estudiadas seguidamente en el análisis numérico por elementos finitos. Por ello, se ha recuperado del INSA un prototipo de ensayo de flexión normalizado de características muy similares a las expuestas en la segunda alternativa de diseño del prototipo de ensayos mecánicos de flexión en tres puntos. El conjunto de todos los elementos dispuestos en la máquina de ensayos se aprecia en la Figura 4.3.2.1. A continuación se explica detalladamente cada uno de los elementos.



Figura 1.30. Vista general del ensayo mecánico experimental de flexión en 3 puntos

- **Banco de ensayos:** el banco de ensayos empleado ha sido diseñado y construido por la empresa *ANDILOG TECHNOLOGIES* y se trata del modelo *BAT 1000R Precision manual forcé test stand and displacement*. Sobre la base plana de este banco de ensayos están montadas dos columnas soportando la deslizadera vertical móvil. El dinamómetro está montado sobre la deslizadera sin juego cuyo desplazamiento total disponible es de 300 mm. Su movimiento vertical está controlado con una manivela en la parte superior y un tornillo sin fin abajo.
- **Sensor de fuerza:** El dinamómetro instalado en el banco de ensayos que se emplea ha sido fabricado por la misma empresa y se trata del modelo *Centor Easy* con una resolución máxima del valor de fuerza medido de 500 N. El Centor Easy está equipado con un sensor interno a partir del cual es posible realizar medidas en tracción y compresión. Este sensor está provisto con una rosca M5 sobre la cual se pueden montar accesorios según el tipo de ensayo que se quiere realizar y las muestras a ensayar. El Centor Easy está montado sobre la deslizadera vertical móvil del banco de ensayos por medio de cuatro puntos de fijación (2xM5 y 2x10-32). Las fichas técnicas del banco de ensayos BAT 1000R y del dinamómetro Centor Easy provistos por *ANDILOG TECHNOLOGIES* se adjuntan en los Anexos de la memoria y los planos explicativos en el Capítulo 3 Planos.

- **Probeta:** las probetas a ensayar en este procedimiento son alambres de diferentes materiales y diámetros. Si se quisiese comparar este ensayo con el ensayo de tracción los alambres a estudiar deberían presentar el mismo material que las probetas normalizadas empleadas en el ensayo de tracción y el mismo tratamiento térmico.
- **Distancia entre los apoyos inferiores:** la distancia entre los apoyos fijos condiciona la longitud del alambre a ensayar y ésta a su vez condiciona el rango de fuerzas aplicables, puesto que una distancia corta entre apoyos provoca fuerzas grandes y deformaciones pequeñas para un determinado estado de tensiones. Al aumentar la distancia entre los apoyos se obtiene una mayor precisión de lectura de las deformaciones y la necesidad de un desplazamiento vertical del sistema de aplicación de la carga ya que la influencia de ésta es menor. La superficie longitudinal de la estructura en la que se instalan los apoyos fijos está graduada con el fin de establecer convenientemente la distancia entre los apoyos en función del diámetro del alambre que se va a instalar, teniendo en cuenta los resultados del estudio analítico recogido en las tablas 1.17 y 1.18.

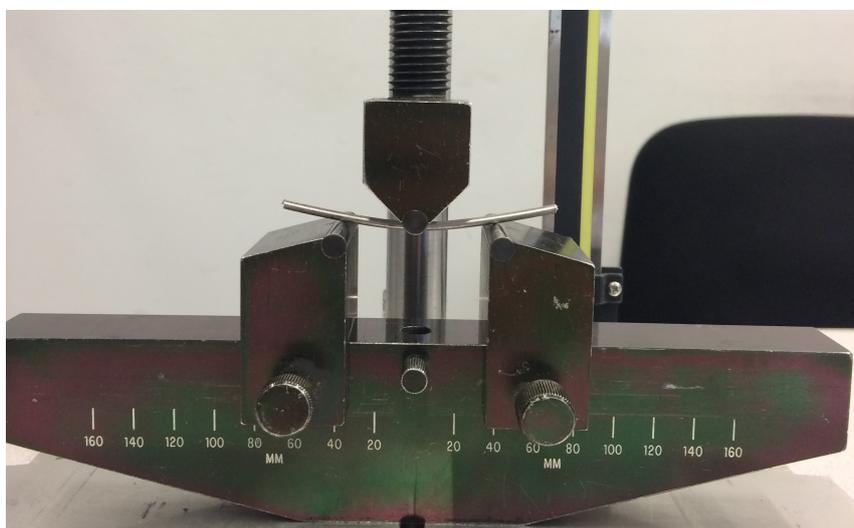


Figura 1.31. Vista de detalle de la instalación del alambre sobre los apoyos del prototipo de ensayo mecánico.

- **Longitud de la probeta:** la longitud del alambre varía en función de la distancia entre los apoyos a la hora de realizar el ensayo. En las especificaciones de diseño se presenta que la longitud mínima que debe presentar el alambre es la distancia que exista entre los apoyos más 30 milímetros. Esa pequeña distancia de seguridad se establece para que el ensayo pueda completarse satisfactoriamente sin que existan problemas debidos a una longitud de probeta insuficiente.
- **Sistema de aplicación de la carga:** la aplicación de la fuerza de compresión a la sección central de la probeta se realiza mediante un cilindro lo suficientemente rígido para evitar que sufra deformaciones apreciables. Este cilindro se enlaza al dinamómetro mediante una pieza que se enrosca a la varilla acoplada al sensor de fuerzas. Esta fuerza se modifica dando vueltas a la manivela situada en el extremo opuesto al tornillo sin fin, esto provoca un desplazamiento vertical del elemento que ejerce la fuerza. Para medir dicho desplazamiento se emplea la regla digital de precisión 0,001 milímetros instalada a lo largo de las columnas verticales que sustentan la estructura global. Se emplea una superficie cilíndrica para aplicar la carga sobre el alambre con el fin de que ésta sea lo más puntual posible (Figura 1.32).



Figura 1.32. Vista de detalle de la instalación del sistema de aplicación de la carga en el dinamómetro.

- **Velocidad de ensayo:** en las especificaciones de diseño se plantea que el sistema debe permitir una velocidad de ensayo comprendida en el rango: $2\text{mm}/\text{min} \leq v_{\text{actuador}} < 4\text{mm}/\text{min}$.

El procedimiento seguido para realizar los ensayos experimentales de flexión de los alambres a estudiar ha de ser realizado de manera muy cuidadosa y sistemática. Hay que tener especial atención pues al aplicar cargas elevadas sobre el alambre existe riesgo elevado de que las fijaciones de los apoyos fallen. Esto conlleva a un desplazamiento de los mismos variando la longitud inicial establecida entre ellos y haciendo el ensayo no válido.

- En primer lugar, tras haber cortado el alambre a la longitud deseada vigilando no introducir deformaciones excesivas, se realizan unas marcas que señalan los puntos de contacto con los apoyos y el cilindro que aplica la carga.
- Se fijan los apoyos a la distancia entre ellos establecida por el nivel de ensayo al que corresponde el diámetro del alambre a ensayar.
- Se coloca el alambre sobre los apoyos verificando la perpendicularidad entre éste y el cilindro del sistema de aplicación de fuerza.
- Se establece el origen de coordenadas un milímetro antes de que el sistema de aplicación de fuerza entre en contacto con el alambre y se estabiliza el sensor de fuerza con el fin de reducir al máximo los posibles errores instrumentales.
- Una vez realizado correctamente el calibrado de los instrumentos se procede a la aplicación de la fuerza sobre el alambre haciendo girar la manivela manualmente. Junto con un cronómetro y el valor de desplazamiento que ofrece la regla digital, se controla la velocidad de ensayo con el fin de mantenerla dentro del dominio establecido. Al mismo tiempo, cada 0,5 mm de desplazamiento se recogen los valores registrados por los sensores de fuerza y desplazamiento. En este caso hay que tener especial cuidado durante la manipulación y registro de datos para reducir los posibles errores humanos.

- Finalmente, una vez se concluye cada ensayo se procesan los datos registrados, los cuales permiten realizar la curva fuerza-desplazamiento característica del material que constituye el alambre estudiado. En la figura 1.33 se muestra el estado final de la probeta deformada.

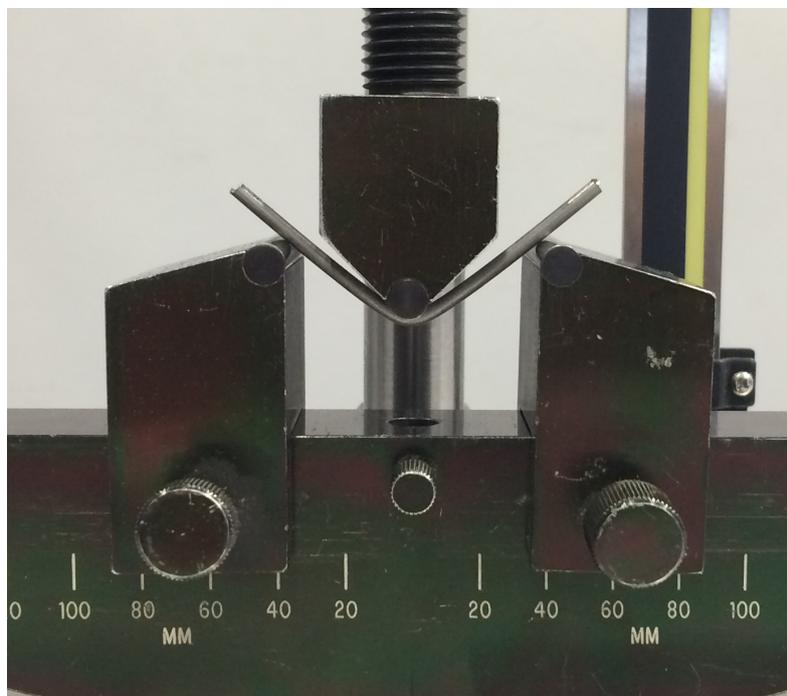


Figura 1.33. Vista de detalle del estado final de la probeta deformada al final del ensayo de flexión.

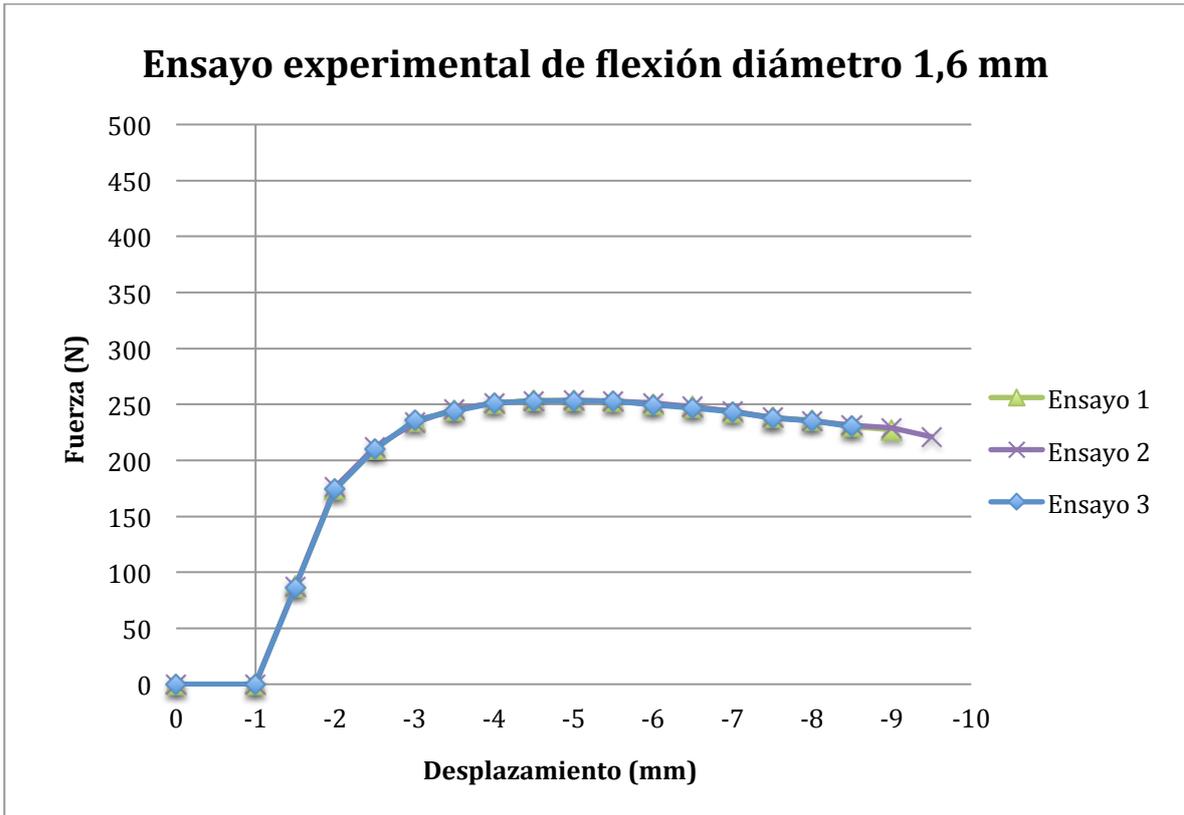
11.3.3 Resultados experimentales

Se estudian seis alambres de material y diámetros diferentes y se repite el ensayo tres veces para cada uno de los alambres. Los detalles de los alambres a estudiar y de la posición de ensayo que ocupan en función de su diámetro se presenta en la tabla 1.10.

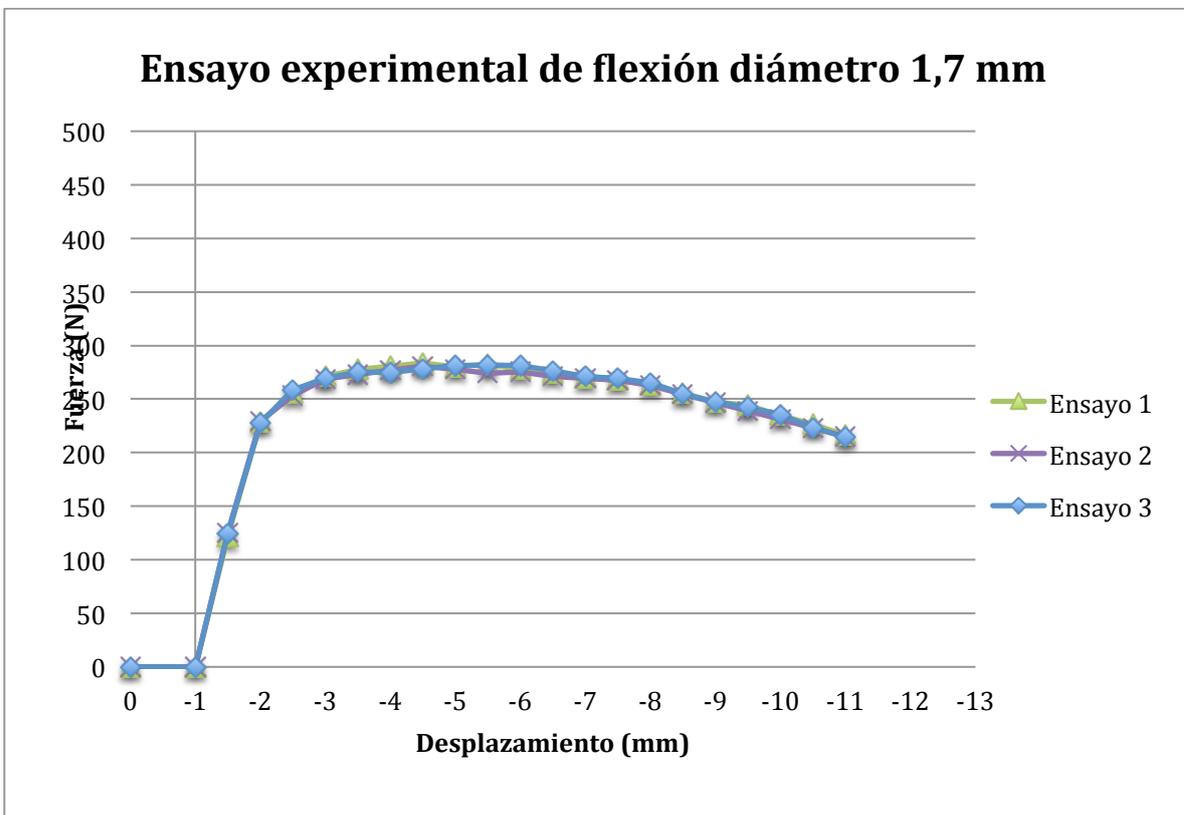
Alambre	1	2	3	4	5	6
Diámetro	1,6 mm	1,7 mm	1,85 mm	2,4 mm	2,5 mm	2,6 mm
L entre apoyos	20 mm	20 mm	20 mm	40 mm	40 mm	80 mm
Posición de los apoyos	1	1	1	2	2	3

Tabla 1.10. Diámetros de alambre a ensayar previstos.

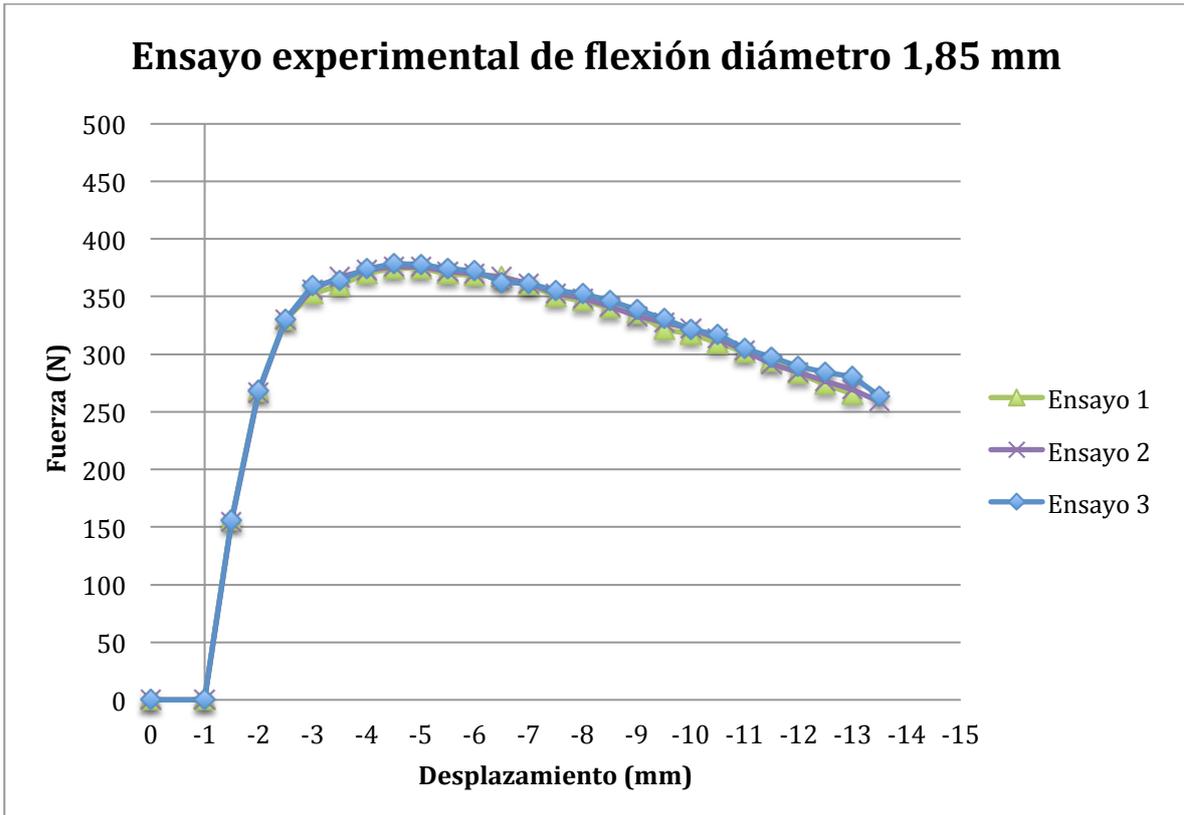
Una vez concluidos los ensayos para cada alambre provisto, se procesan los datos registrados con el programa Excel y se trazan las curvas de fuerza-desplazamiento para cada uno de ellos.



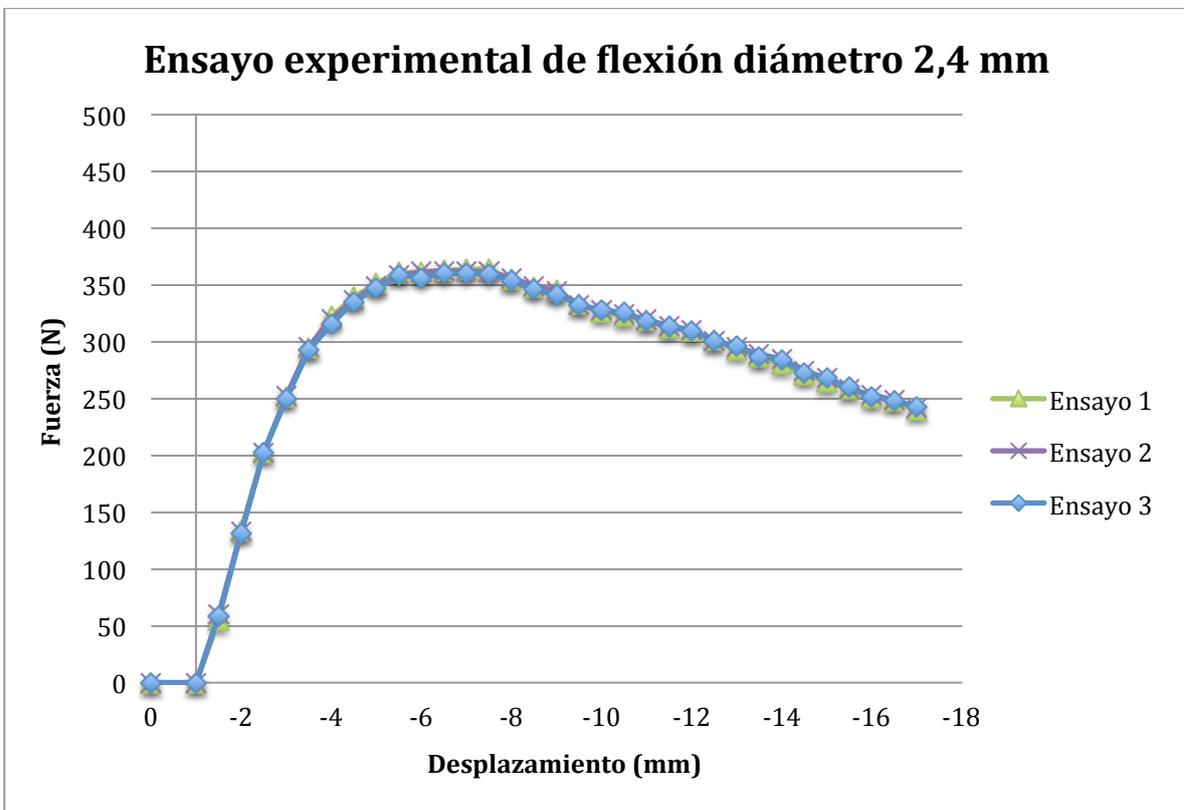
Gráfica 1.10. Curva de fuerza-desplazamiento del alambre de diámetro 1,6 mm.



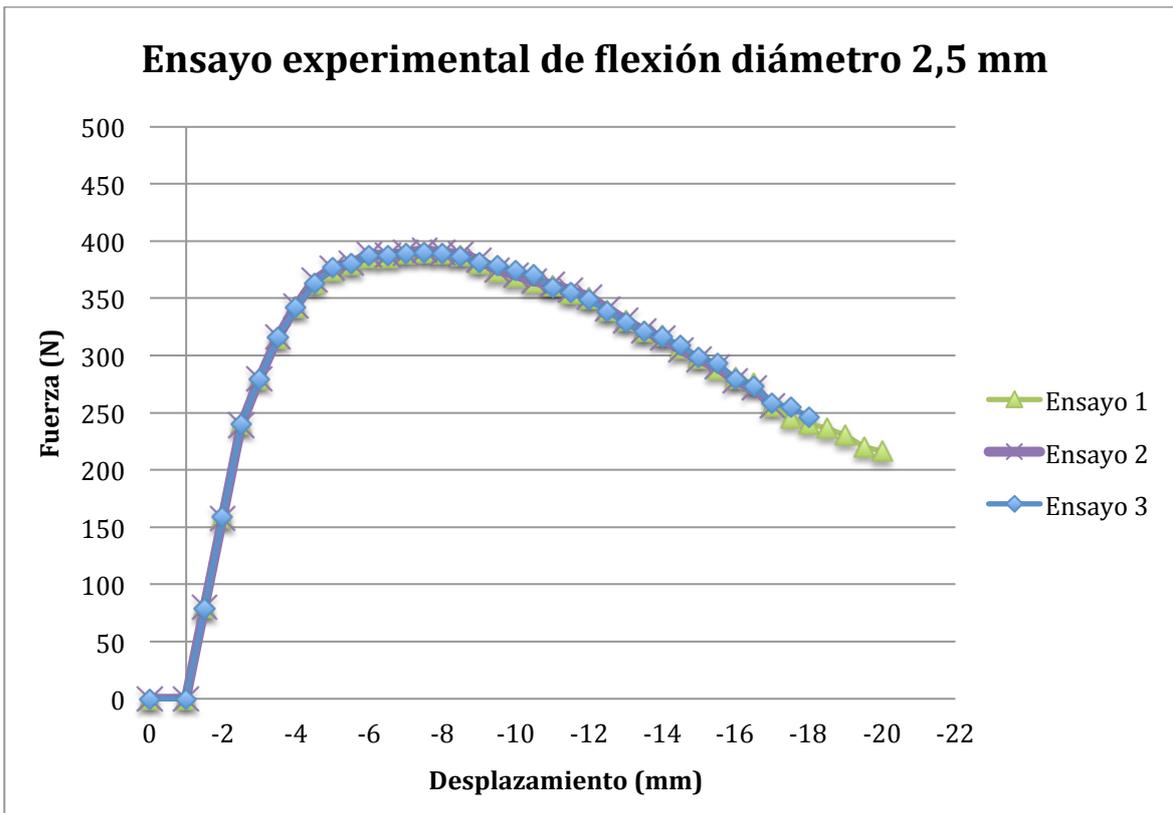
Gráfica 1.11. Curva de fuerza-desplazamiento del alambre de diámetro 1,7 mm.



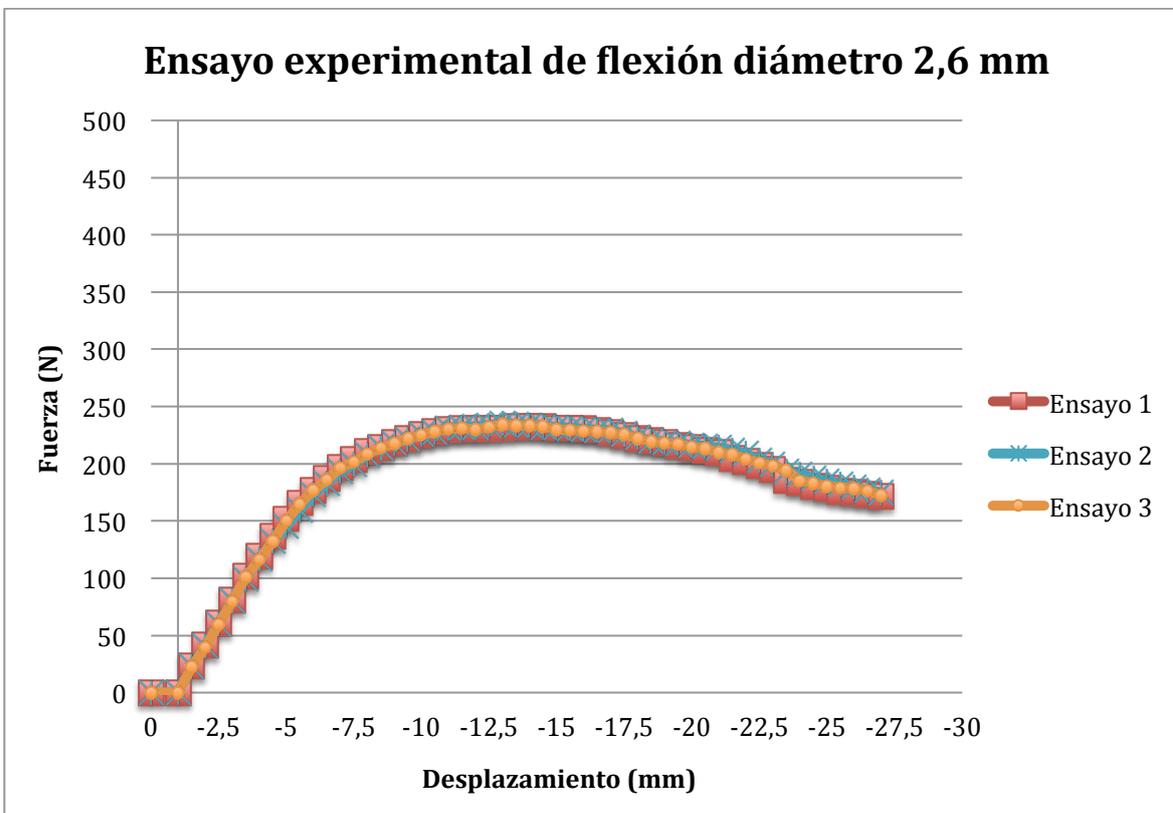
Gráfica 1.12. Curva de fuerza-desplazamiento del alambre de diámetro 1,85 mm.



Gráfica 1.13. Curva de fuerza-desplazamiento del alambre de diámetro 2,4 mm.



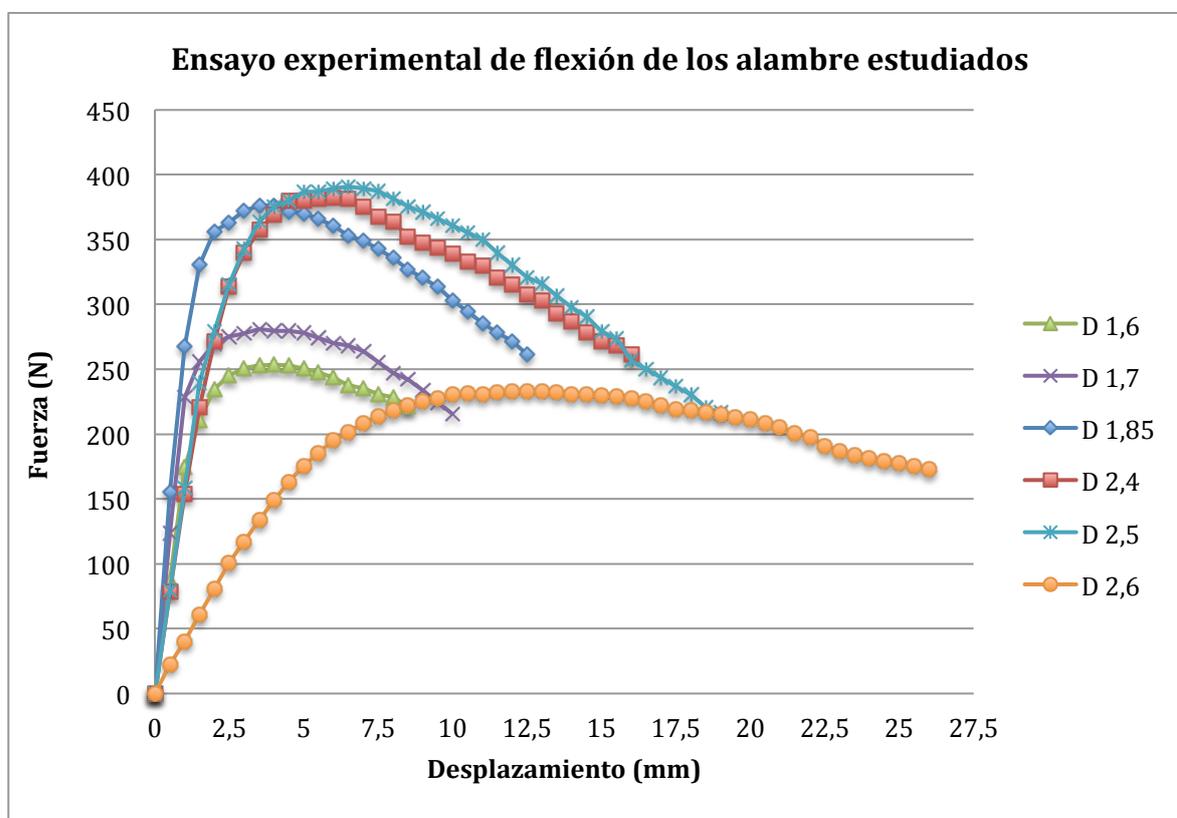
Gráfica 1.14. Curva de fuerza-desplazamiento del alambre de diámetro 2,5 mm.



Gráfica 1.15. Curva de fuerza-desplazamiento del alambre de diámetro 2,6 mm.

Finalmente se representan gráficamente los resultados del análisis experimental realizado sobre cada alambre. Para ello se determina el valor medio de cada valor de fuerza registrado por el dinamómetro durante los tres ensayos realizados sobre cada tipo de alambre. De esta manera es posible concebir una idea de cómo afecta la variación de la distancia entre los apoyos a la influencia de las fuerzas de corte aplicadas sobre el alambre y al desplazamiento vertical necesario por parte del sistema de aplicación de carga para completar satisfactoriamente el ensayo de flexión en tres puntos.

Como se ha mencionado anteriormente, la distancia entre los apoyos fijos condiciona la longitud del alambre a ensayar y ésta a su vez condiciona el rango de fuerzas aplicables, puesto que una distancia corta entre apoyos provoca fuerzas grandes y deformaciones pequeñas para un determinado estado de tensiones. Al aumentar la distancia entre los apoyos se obtiene una mayor precisión de lectura de las deformaciones y la necesidad de un desplazamiento vertical del sistema de aplicación de la carga, ya que la influencia de ésta es menor.



Gráfica 1.16. Curva de fuerza-desplazamiento experimental de los alambres ensayados.

Alguno de los aspectos que se pueden concluir de manera directa una vez representados gráficamente los resultados de los ensayos de flexión experimentales realizados (gráfica de la 1.10 a la 1.16), es que el esfuerzo aplicado en los ensayos se ha mantenido siempre inferior a 500 N, respetando así el valor máximo de medición del dinamómetro que se emplea. Además, en ningún caso existe contacto entre la sección de flexión máxima del alambre (sección central) y la superficie del banco de ensayos, haciendo necesario parar el procedimiento experimental antes de tiempo y anular así su validez.

Entonces, es posible afirmar que el dimensionamiento realizado tanto de la distancia entre los apoyos en función del diámetro del alambre a ensayar, como de la altura mínima necesaria a la que colocar los apoyos respecto de la base del mecanismo es correcto y satisfactorio. Es decir, que los estudios analítico y numérico realizados en los apartados anteriores son fiables y correctos.

Finalmente, se puede observar cómo los resultados de los tres ensayos realizados son muy similares en el estudio experimental de cada alambre. Sin embargo, el modo de fijación de los apoyos del dispositivo de ensayo empleado presenta un inconveniente importante, ya que en ciertas ocasiones se ha visto comprometida la validez del ensayo a causa de un desplazamiento protagonizado por los mismos debido a la aplicación de grandes esfuerzos sobre los apoyos. Esto otorga mayor fuerza a la elección de la alternativa de diseño escogida en el apartado 3.2 (solución 3: diversos apoyos fijos situados a diferentes distancias). A pesar de esto, dado el escaso error relativo que presentan los ensayos realizados para el estudio de cada alambre en el que se emplea un dispositivo carente de errores graves de dimensionamiento y funcionalidad, se puede catalogar este análisis experimental como satisfactorio.

11.4 Determinación de la relación tensión-deformación

Tras haber realizado los ensayos de flexión experimentales, se introduce un método aproximativo con el que sea posible transformar la curva que describe el comportamiento de fuerza-desplazamiento obtenido en cada ensayo de flexión, en la de tensión-deformación y conocer así las características mecánicas propias de los alambres estudiados.

El método consiste en llevar a cabo una correlación inversa de los resultados del estudio realizado. Es decir, hasta ahora, a partir del estudio numérico se ha determinado la curva de fuerza-desplazamiento a partir de unas características mecánicas impuestas al material del alambre. Entonces, por medio de una serie de expresiones matemáticas se determinan dichas características del material del alambre a partir de los resultados recogidos en los ensayos de flexión experimentales.

11.4.1 Estudio analítico

A partir de los resultados del estudio experimental expuestos en la gráfica 1.16, de entre las características mecánicas a estudiar, se puede conocer con precisión las características referentes a la deformación elástica dado su carácter lineal. Para llevar a cabo este estudio analítico se tiene en cuenta la siguiente nomenclatura:

L: distancia longitudinal que existe entre un apoyo y el centro geométrico del alambre.

D: diámetro del alambre que se estudia.

F: fuerza aplicada sobre la sección central del alambre.

I: Momento de inercia del alambre.

U: Flecha de deformación máxima o elástica del alambre.

- Cálculo del límite elástico (R_e), teniendo en cuenta la expresión (1.20) se obtiene:

$$R_e [MPa] = \frac{16 * F_{Re} * L}{\pi * D^3} \quad (1.21)$$

- Cálculo del Módulo de Young (E). Para determinar esta característica del material se parte de la relación siguiente, donde “y” es la distancia de una fibra a la línea neutra.

$$y(F) = f(L; D; E) \quad (1.22)$$

Con el fin de obtener la expresión que permita calcular el valor del módulo de elasticidad en cada caso, es necesaria la ecuación diferencial de la línea elástica $y'' = \frac{M_f}{E \cdot I}$ y la expresión del momento flector $M_f(x) = \frac{F}{2}x$. Por lo tanto, una vez conocida la función que define la variación del momento flector, por integración de la ecuación diferencial de la línea elástica se puede determinar la ecuación que permite obtener el corrimiento máximo o flecha. Finalmente, despejando el módulo de elasticidad de ésta se obtiene que:

$$E [MPa] = \left(\frac{F}{y}\right) * \frac{2 * L^3 * 64}{6 * \pi * D^4} \quad (1.23)$$

- Cálculo de la deformación longitudinal elástica ($\epsilon_{elástica}$):

$$\epsilon_{elástica} [\%] = \frac{Re}{E} \quad (1.24)$$

En cuanto a las expresiones que permiten determinar las características que definen el comportamiento plástico del material es necesario recalcar que los resultados que ofrecen son aproximados. Esto se debe a que una vez sobrepasado el límite de elástico, se pierde la linealidad entre la tensión y deformación propia de la deformación elástica. Así pues, es necesario comprobar posteriormente la precisión de las expresiones matemáticas expuestas por medio de diversas simulaciones que ofrezcan una posible comparación entre el estudio experimental realizado y el numérico introduciendo en el segundo las características mecánicas calculadas analíticamente.

- Variación de la longitud de un elemento tomado en la superficie del alambre en el centro de su longitud transversal.

$$\epsilon_{flexión} [\%] = \frac{6 * D_{alambre}}{L_{entre apoyos}^2} * |U| \quad (1.25)$$

La expresión 1.25 se utiliza tanto para determinar la deformación de rotura en flexión (ϵ_{rotura}) como la deformación asociada a la resistencia a la flexión (ϵ_{Rm}). Para el cálculo de estas dos características, se otorga a |U| el valor de la flecha alcanzada cuando se alcanza el límite elástico y el valor de la flecha alcanzada al final del ensayo experimental de flexión respectivamente.

- Tensión experimentada en la sección solicitada por el aplicador de carga (resistencia última Rm):

$$Rm [MPa] \geq \frac{8 * F_{aplicada} * L_{entre apoyos}}{\pi * D_{alambre}^2} \quad (1.26)$$

Estas dos ecuaciones (1.25 y 1.26) se obtienen de la documentación correspondiente a la referencia bibliográfica [12]. Estas expresiones aplicadas al estudio del comportamiento plástico del espécimen a estudiar no otorgan un resultado preciso del comportamiento de cualquier tipo de material, es por este hecho que se justifica la necesidad de aplicar un estudio numérico que corrobore la fiabilidad del análisis analítico.

11.4.2 Estudio numérico

Tras haber aplicado las expresiones del apartado anterior a los resultados obtenidos en los ensayos experimentales de flexión, se introducen los valores obtenidos de las características mecánicas en Abaqus y se realiza el estudio numérico del ensayo de flexión en tres puntos para cada alambre analizado experimentalmente. Es necesario matizar que el estudio numérico trata de plasmar con la mayor exactitud posible el ensayo de flexión experimental realizado sobre cada alambre. Es por ello que las características geométricas del modelo simulado son las mismas que las del ensayo experimental y las características del material estudiado las define el estudio analítico.

Por otro lado, también es de gran utilidad realizar un plan de experiencias sobre uno de los alambres a estudiar con el fin de determinar cuánto afecta la variación de las características mecánicas del material al resultado obtenido.

Por ello, con el fin de conocer los valores de resistencia última (R_m) junto con su deformación asociada (ϵ_{R_m}) y la deformación última (ϵ_{rotura}) con la misma precisión que se conocen las características asociadas al comportamiento elástico del material, se realiza un estudio numérico de cada alambre y un plan de experiencias sobre el alambre ensayado de 1,7 milímetros de diámetro que se basa en la metodología siguiente:

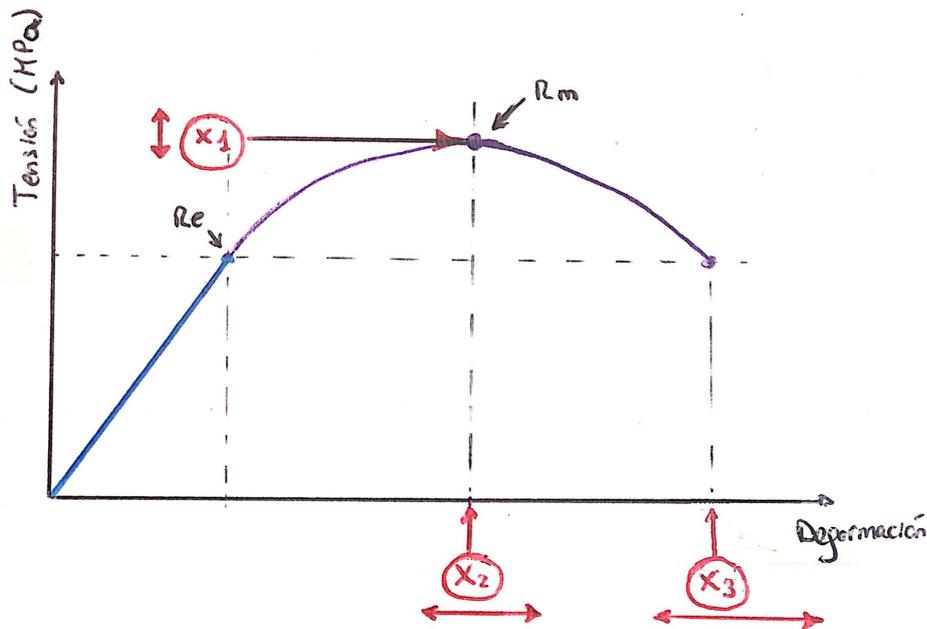


Figura 1.34. Descripción gráfica del plan de experiencias.

La variación de las características mecánicas del acero a estudiar (Tabla 1.11) se realiza en función de la tabla siguiente, donde X1, X2 y X3 se corresponden con R_m , ϵ_{R_m} y ϵ_{rotura} respectivamente, que aparecen representados en la Figura 1.34.

	Rm (MPa)	ϵ_{R_m} (%)	ϵ_{rotura} (%)
1	300	0,05	0,05
-1	-300	-0,05	-0,05

Tabla 1.11. Variación de las características mecánicas del acero.

De nuevo, se concibe un plan de experiencias de tipo 2³ (Tabla 1.12) como el que se ha llevado a cabo al inicio del estudio en el apartado 10.1.1.1 *Realización de un plan de experiencias*:

	Rm (MPa)	ε_{Rm} (%)	ε_{rotura} (%)
Acero 0	-	-	-
Acero 1	1	1	1
Acero 2	1	1	-1
Acero 3	1	-1	1
Acero 4	1	-1	-1
Acero 5	-1	1	1
Acero 6	-1	1	-1
Acero 7	-1	-1	1
Acero 8	-1	-1	-1

Tabla 1.12. Plan de experiencias 2³.

Es necesario matizar que las características mecánicas del acero de base del plan de experiencias se aproximan mediante las expresiones indicadas en el estudio analítico del apartado 11.4.1. Posteriormente, en base a las características de este acero (acero 0) y a las variaciones de éstas programadas en las tablas 1.11 y 1.12, se determinan las características propias de los ocho aceros recogidos en el plan de experiencias. Dicha variación se lleva a cabo mediante las siguientes expresiones:

$$Rm' [MPa] = Rm_{acero0} \pm 300 \quad (1.27)$$

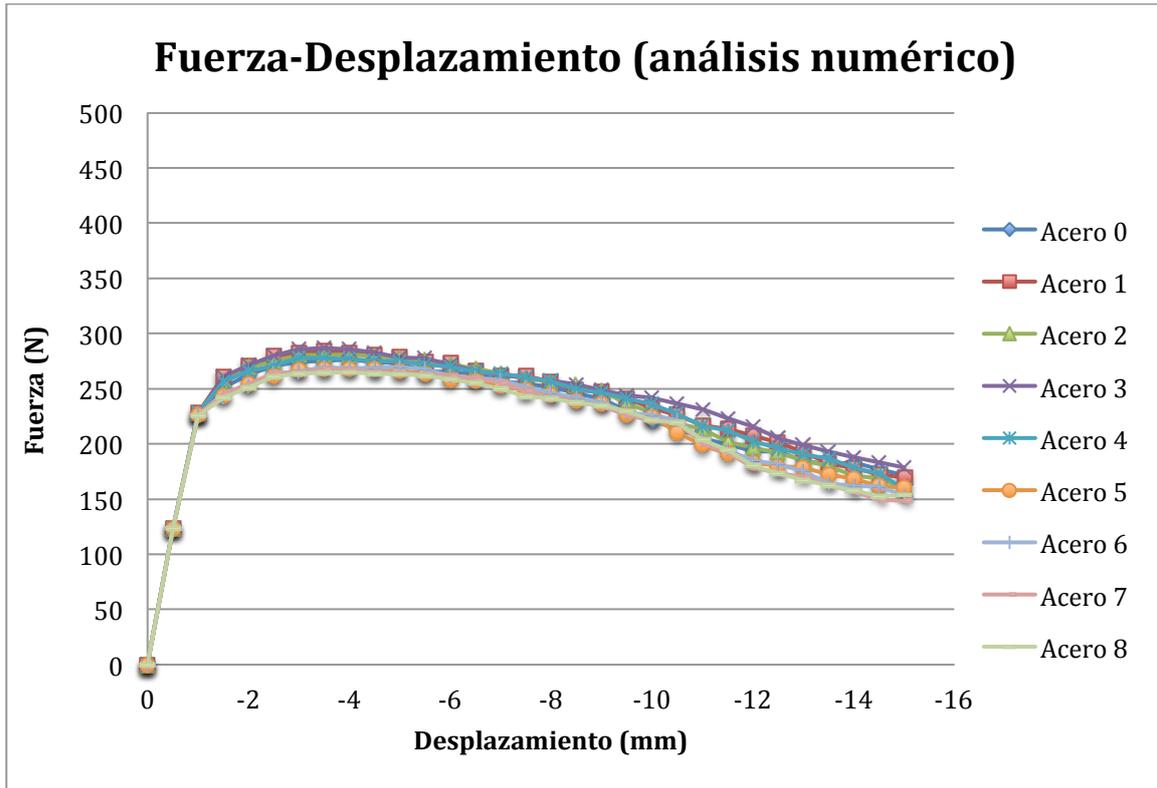
$$\varepsilon'_{Rm} [\%] = \varepsilon_{Rm.acero0} \pm 0,05 \quad (1.28)$$

$$\varepsilon'_{rotura} [\%] = \varepsilon_{rotura.acero0} \pm 0,05 \quad (1.29)$$

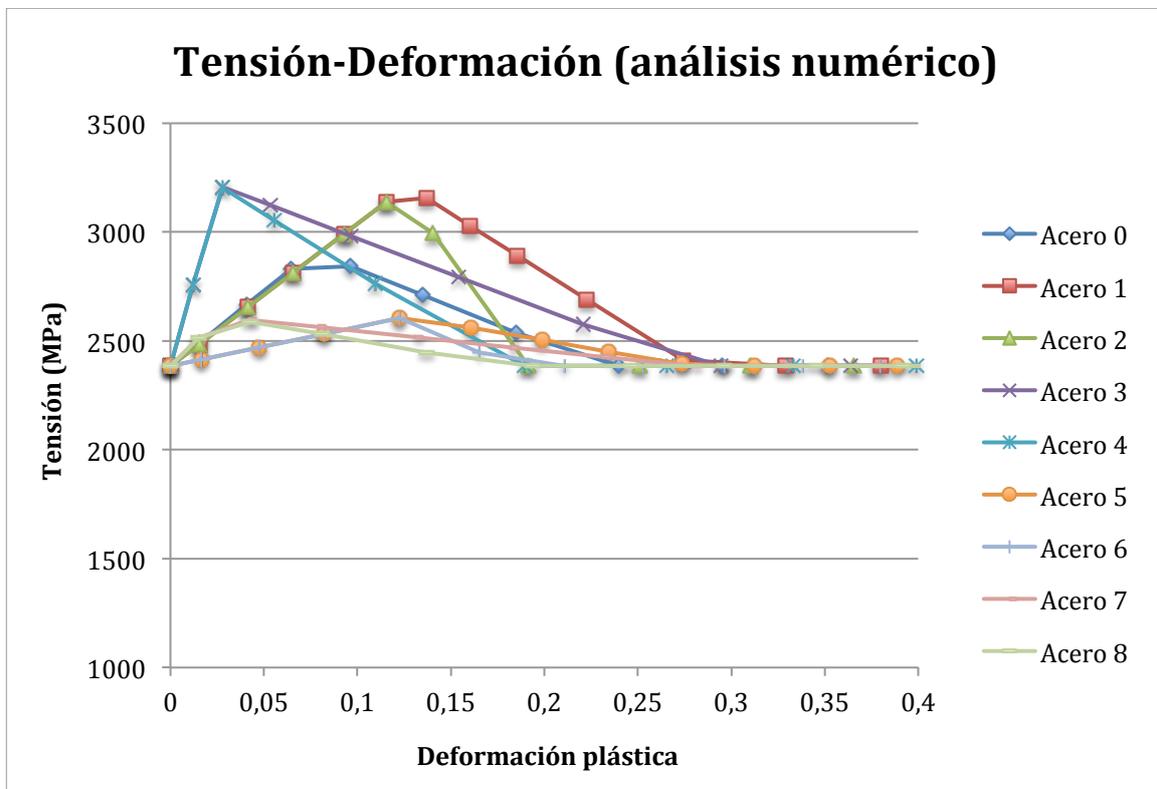
Por lo tanto, tras haber aplicado estas expresiones, se introducen los valores obtenidos en Abaqus y se realiza el estudio numérico del plan de experiencias presentado. Este estudio trata de plasmar con la mayor exactitud posible el ensayo de flexión experimental realizado sobre el alambre de diámetro 1,7 milímetros. Es por ello que las características geométricas del modelo simulado son las mismas que las del ensayo experimental y las características del material estudiado las define el plan de experiencias recogido en las tablas 1.11 y 1.12 junto con el estudio analítico presentado.

11.4.3 Análisis de los resultados del estudio numérico

Concluidas las simulaciones para cada uno de los aceros que constituyen el plan de experiencias, se procesan los datos registrados con el programa Excel y se trazan las curvas de fuerza-desplazamiento para cada uno de ellos. El resultado de las nueve simulaciones se representa en una misma gráfica (Gráfica 1.17 y Gráfica 1.18), con el fin de ilustrar la dispersión de la relación fuerza-desplazamiento entre cada acero estudiado causado por la variación de las características mecánicas con respecto al acero de base (acero 0).



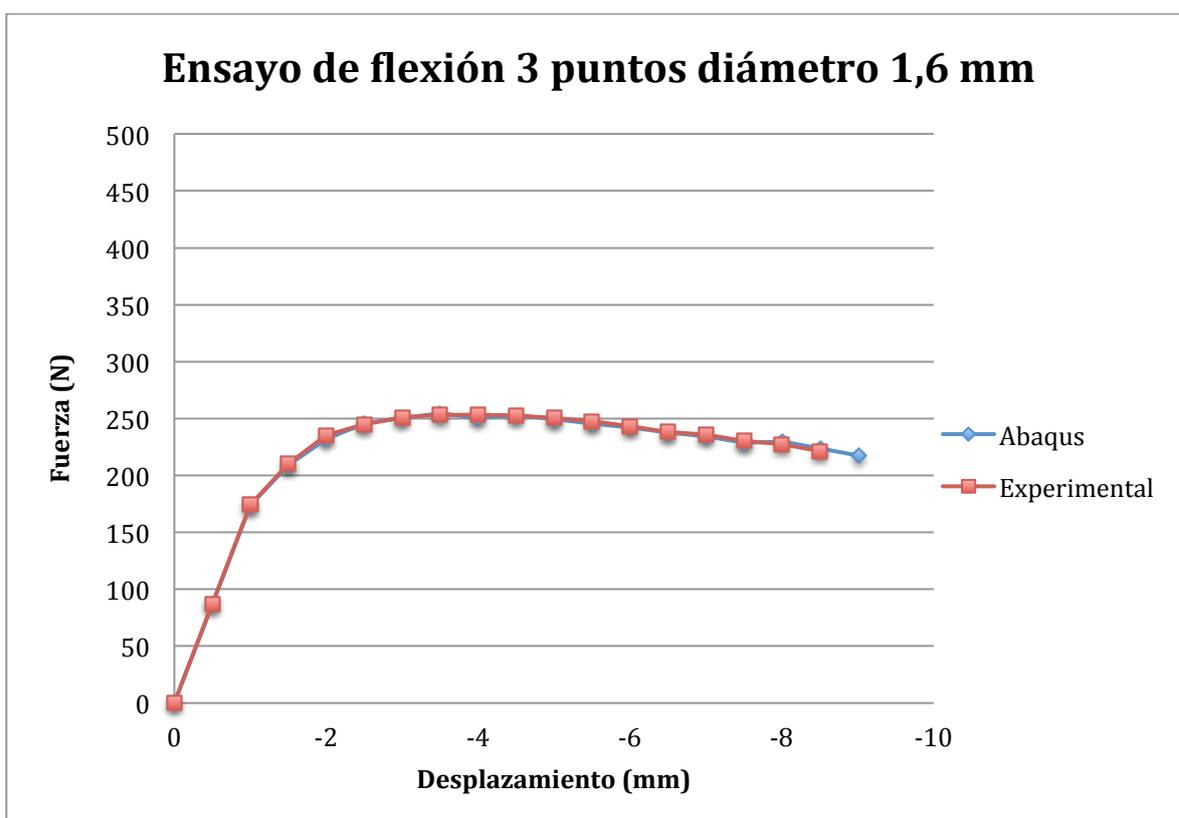
Gráfica 1.17. Análisis numérico del ensayo de flexión en 3 puntos sobre los 8 aceros del plan de experiencias.



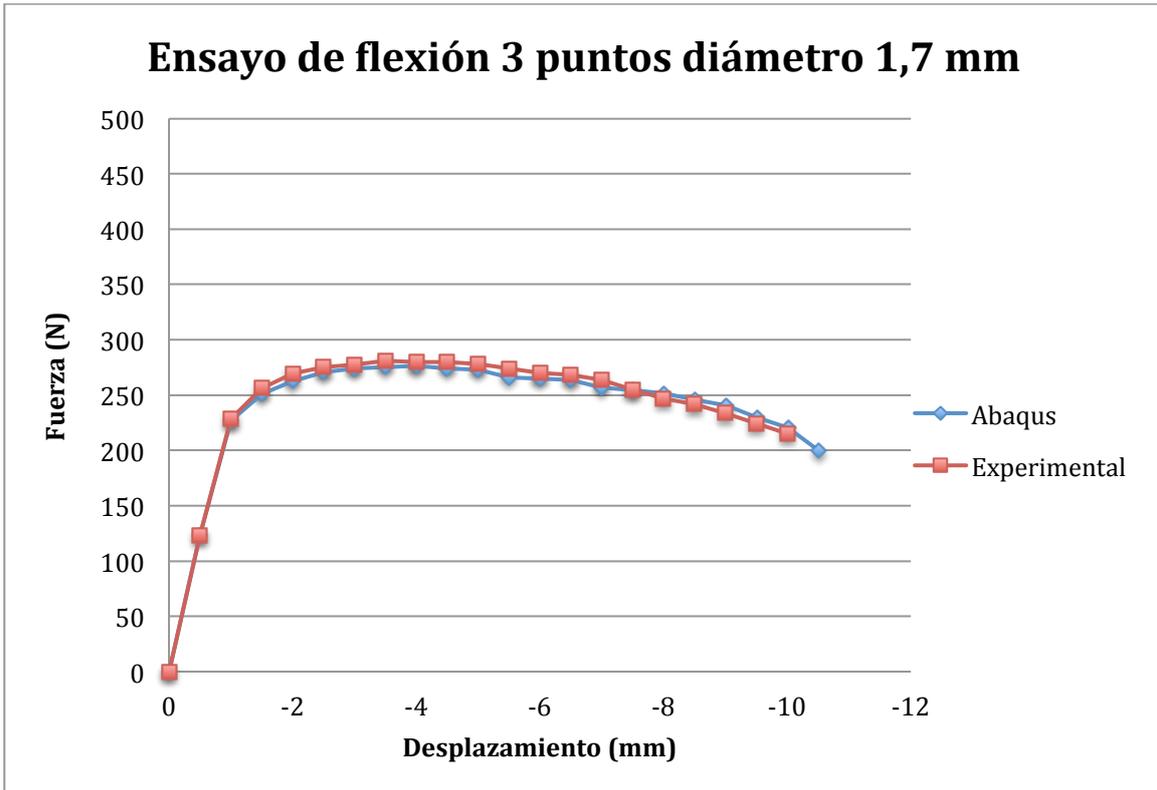
Gráfica 1.18. Comportamiento plástico del análisis numérico referente al ensayo de flexión en 3 puntos sobre los 8 aceros del plan de experiencias.

Tras el análisis del plan de experiencias, el siguiente paso es el de determinar la fiabilidad del estudio analítico presentado. Para ello se representa gráficamente a modo de comparación la curva experimental fuerza-desplazamiento de los seis alambres ensayados junto con la curva obtenida del estudio numérico de cada uno de ellos. Se comparan los resultados obtenidos en ambos métodos con el fin de determinar la fiabilidad de las expresiones matemáticas recogidas en el análisis analítico presentado.

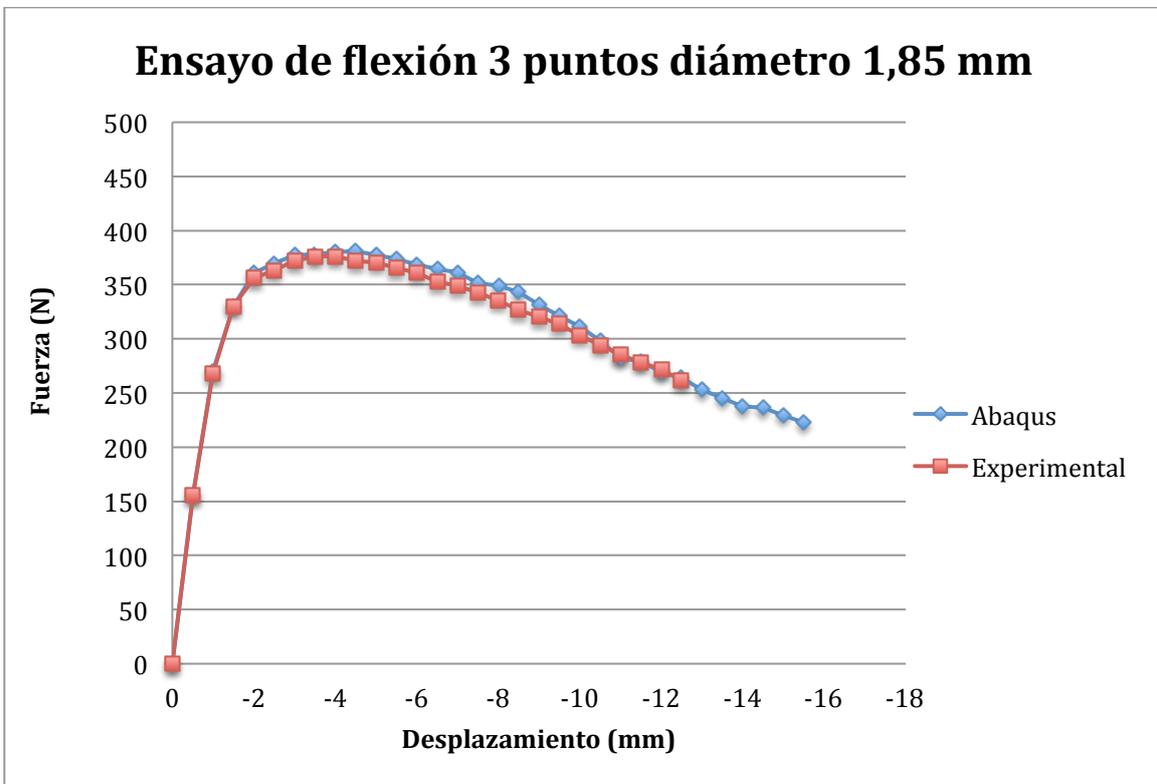
A continuación, una vez concluidas las simulaciones para cada uno de los alambres provistos para estudio, se procesan los datos registrados con el programa Excel y se trazan las curvas de fuerza-desplazamiento para cada uno de ellos.



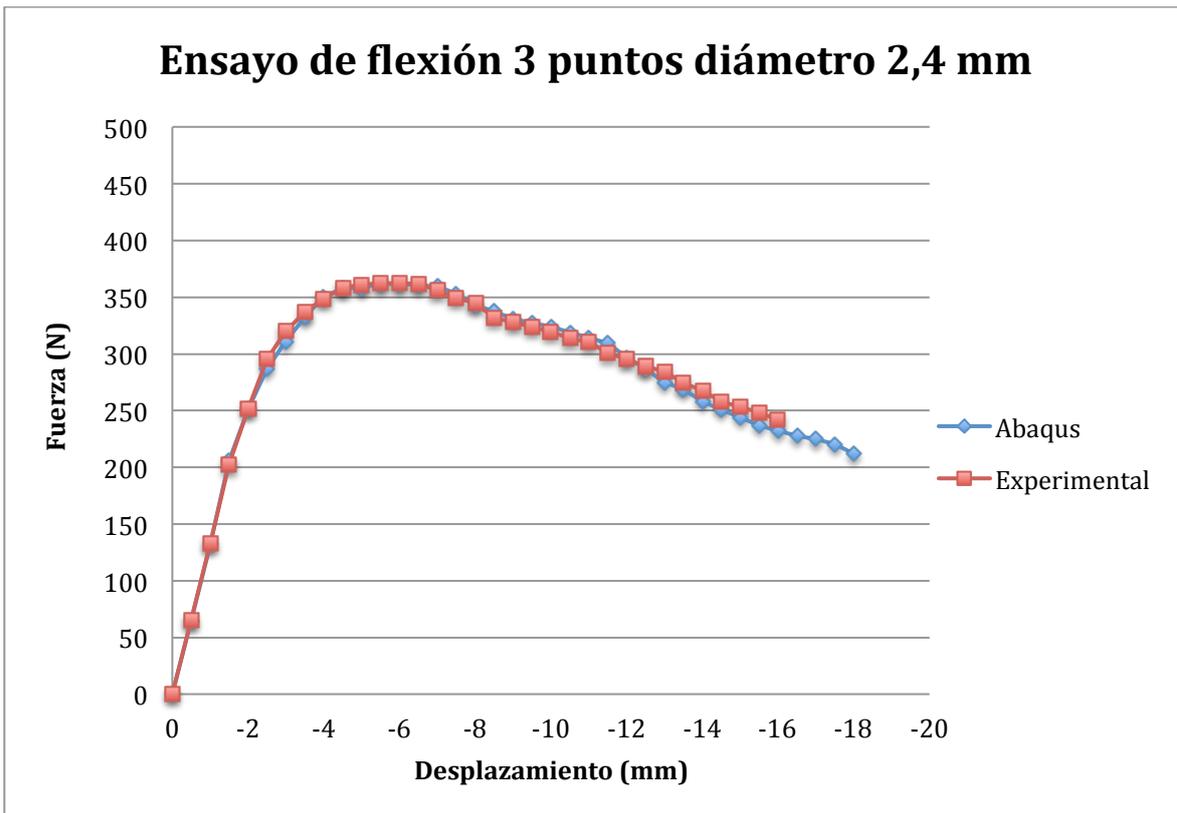
Gráfica 1.19. Comparación del estudio numérico y experimental sobre la curva de fuerza-desplazamiento del alambre de diámetro 1,6 mm.



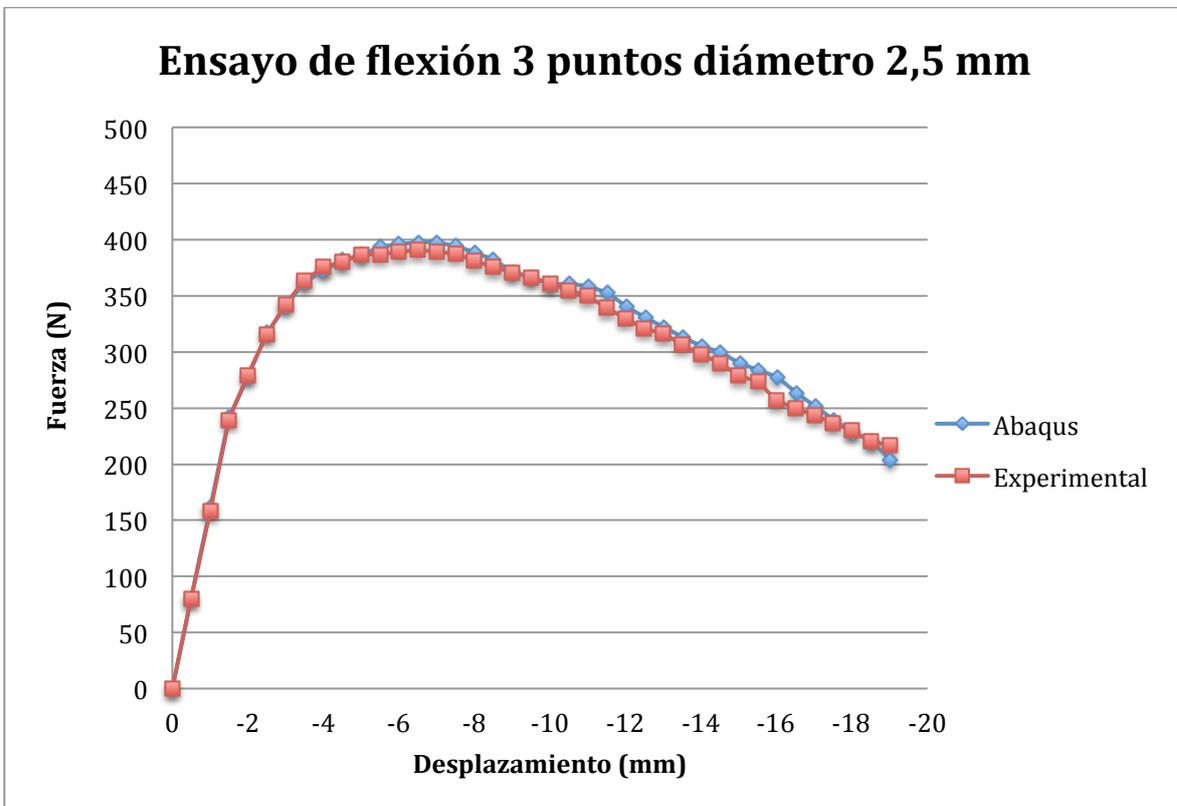
Gráfica 1.20. Comparación del estudio numérico y experimental sobre la curva de fuerza-desplazamiento del alambre de diámetro 1,7 mm.



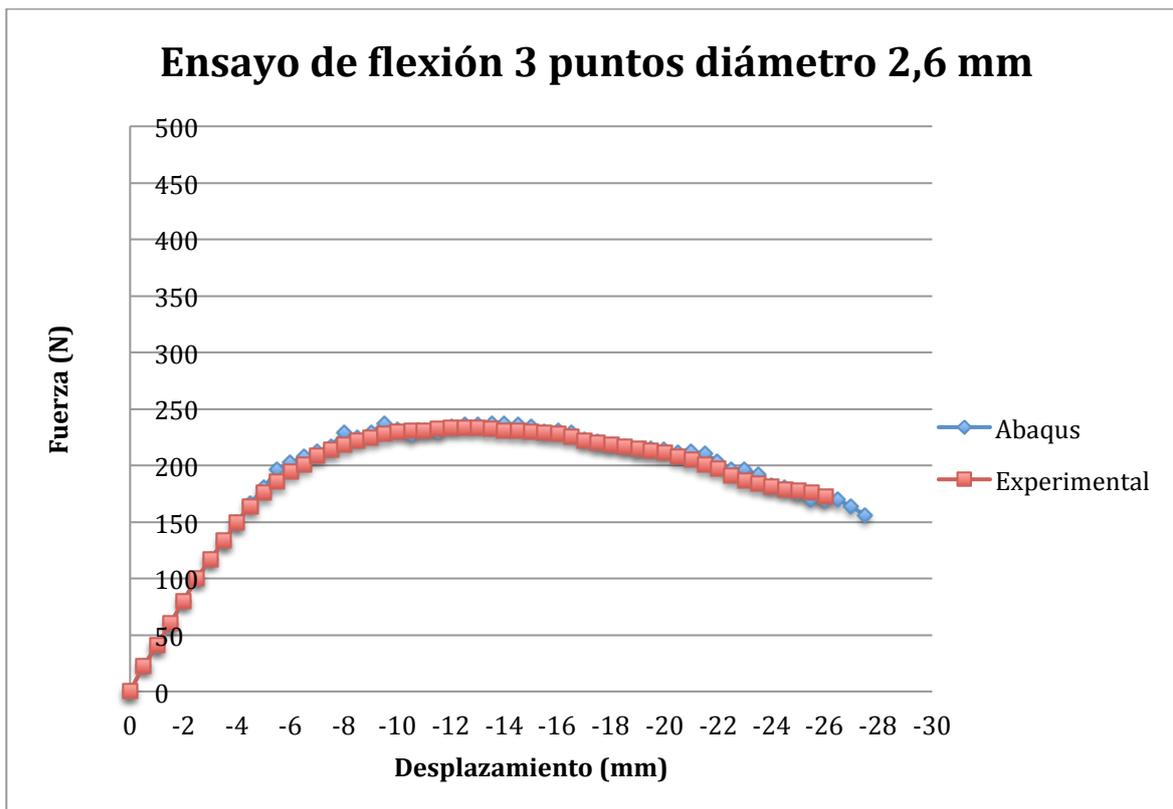
Gráfica 1.21. Comparación del estudio numérico y experimental sobre la curva de fuerza-desplazamiento del alambre de diámetro 1,85 mm.



Gráfica 1.22. Comparación del estudio numérico y experimental sobre la curva de fuerza-desplazamiento del alambre de diámetro 2,4 mm.



Gráfica 1.23. Comparación del estudio numérico y experimental sobre la curva de fuerza-desplazamiento del alambre de diámetro 2,5 mm.



Gráfica 1.24. Comparación del estudio numérico y experimental sobre la curva de fuerza-desplazamiento del alambre de diámetro 2,6 mm.

El estudio numérico permite evaluar si la curva de fuerza-desplazamiento de cada acero se aproxima lo suficiente al resultado experimental obtenido en los ensayos experimentales de flexión. Puesto que las simulaciones se configuran con las características mecánicas calculadas analíticamente a raíz de la curva de fuerza-desplazamiento de los ensayos experimentales, este procedimiento determina si es posible tomar los resultados de las expresiones analíticas como fiables o como aproximados.

Se puede observar cómo los resultados que provienen del modelo de análisis numérico propuesto se aproximan a los resultados experimentales con mejor precisión en la zona lineal (comportamiento elástico). La mayor dispersión entre los valores numéricos y experimentales de cada gráfica se presenta en el comportamiento plástico del material, ya que las expresiones matemáticas presentadas pierden precisión al ser empleadas para calcular las características plásticas. Pese a esta variación entre los resultados ofrecidos por los dos métodos de análisis (numérico y experimental), el error relativo entre estos es menor del 10% y por lo tanto el estudio analítico empleado para el cálculo de las características mecánicas de los alambres se cataloga como aceptable.

Finalmente, basándose en los resultados obtenidos se concluye diciendo que el estudio analítico planteado ofrece resultados fiables y por ello es posible aplicar el método presentado a lo largo de este capítulo para determinar el comportamiento elástico-plástico de los alambres a partir de la curva de fuerza-desplazamiento que ofrece el ensayo de flexión diseñado.

Por último, a modo de resumen, se expone brevemente el método de estudio propuesto para determinar las características mecánicas de un alambre por medio del ensayo de flexión de tres puntos diseñado:

El ensayo de flexión experimental llevado a cabo sobre el prototipo diseñado permite determinar el comportamiento elástico del material. Al conocer el módulo de elasticidad del alambre es posible conocer con qué tipo de acero estamos tratando. Posteriormente, a partir del uso de las ecuaciones expuestas anteriormente, es posible conocer el valor de la resistencia última, así como la deformación que produce el esfuerzo de flexión. Finalmente, la validez de las características mecánicas obtenidas analíticamente a partir de los resultados experimentales se ha comprobado mediante un estudio numérico.

11.5 Conclusiones.

En primer lugar, ha de establecerse que los estudios analítico, numérico y experimental han sido realizados con rigor ya que, principalmente, los resultados obtenidos en cada uno de los estudios son coherentes. Además, los resultados encontrados en los estudios comparables han sido muy similares. El análisis de los resultados del estudio realizado refleja que:

- El estudio numérico 2D es preciso puesto que los resultados procedentes de las simulaciones del ensayo de flexión en tres puntos se corresponden con los esperados al definir el plan de experiencias.
- El buen dimensionamiento del prototipo se corrobora a partir de las múltiples simulaciones y de los diferentes ensayos de flexión experimentales realizados con éxito.
- El estudio numérico 3D se califica como riguroso dada la buena correlación entre los resultados experimentales y el comportamiento mecánico del alambre obtenido en las simulaciones. La forma poco definida del comportamiento plástico que se encuentra en las gráficas propias del estudio numérico son causadas por el modo seleccionado para su programación (explícito y dinámico). Este modo presenta la posibilidad de estudiar sistemas más complejos en detrimento de la precisión en la convergencia de los resultados del análisis numérico de los mismos.
- El estudio analítico con el que se ha elaborado el segundo plan de experiencias guarda relación con los resultados de su posterior estudio numérico, lo que conlleva a la conclusión de que las simulaciones numéricas realizadas a partir de Abaqus proporciona resultados acordes con lo que se esperaba conseguir. Es decir, los valores de las características mecánicas introducidos a la hora de configurar las simulaciones de los ensayos de flexión en tres puntos coinciden con las características mecánicas derivadas de los resultados de las simulaciones.

12 BENEFICIOS DEL PROYECTO

Los beneficios que aporta la introducción del prototipo desarrollado a la industria de fabricación de muelles son varios:

- **Optimización del resorte fabricado.** Con la aplicación del dispositivo propuesto se reduce la variación significativa entre el resorte final fabricado y el requerido, aumentando así la fiabilidad del resultado del proceso de fabricación.
- **Reducción del tiempo de fabricación.** Es cierto que el ensayo de flexión sobre un trozo de alambre supone un consumo de tiempo determinado. Pero éste es mucho menor que el tiempo perdido que supone la fabricación de un resorte defectuoso y rectificación del mismo.
- **Incremento de la calidad del resorte final.** Al invertir en esta nueva herramienta se elimina considerablemente el error en la configuración de la máquina de enrollado. Esto, junto con los posteriores tratamientos aplicados al resorte fabricado, provoca un aumento considerable del rendimiento que presenta al ser instalado en el sistema para el cual ha sido fabricado.
- **Aumento de la productividad.** La disminución de la posibilidad de fabricar resortes con características mecánicas diferentes a las requeridas, conlleva la fabricación de una mayor cantidad de resortes de calidad fiable con la misma cantidad de alambre y en menor tiempo.
- **Optimización del uso de recursos.** Reducción de la cantidad de recursos materiales desperdiciados (alambre) en el proceso de fabricación que supone la fabricación de resortes defectuosos.
- **Reducción de las pérdidas económicas** causadas por la fabricación de resortes con características mecánicas no deseadas. Al reducir el número de resortes defectuosos fabricados, se aprovechan mejor los recursos materiales y por lo tanto se reducen los costes de fabricación.
- El incremento de la calidad del producto confeccionado y del proceso de fabricación supone un **aumento de la posición y prestigio de la empresa** en relación a la competencia dentro del sector de fabricación de resortes.

La aplicación del dispositivo de ensayo de flexión está diseñado para determinar, previamente al proceso de fabricación de resortes, las características mecánicas particulares de la bobina de alambre involucrada en el proceso industrial.

Esta optimización del proceso de fabricación de muelles supondría un incremento de la productividad de la empresa valenciana Muelles Castellano S.L. en un 10%. Este incremento se traduce en un aumento del capital cotizado mensualmente con una tasa de evolución del 1,2% a los tres meses transcurridos desde la implantación del dispositivo presentado en la cadena de producción de la empresa, hasta llegar al 5% de incremento de su capital mensual. Otro aspecto importante optimizado es la reducción del error de fabricación de resortes, el cual pasa de un 23% de error experimentado por la mayor parte de empresas a tan solo un 8%. Lo que conlleva una disminución de pérdidas económicas y materiales junto con el hecho de que el 92% de los resortes fabricados presentan las características requeridas satisfaciendo así las necesidades para las que han sido fabricados.

13 PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO

La participación en el desarrollo del proyecto que se recoge en este documento ha tenido lugar durante el periodo de prácticas externas de 4º año del Grado de Ingeniería Mecánica realizado en el Institut Clément Ader de Toulouse. Para mayor comprensión de la organización temporal de los hitos a conseguir para la materialización del proyecto se detalla el periodo de realización del mismo.

Horario y calendario de intervención en el proyecto:

- **Fecha de inicio:** 11 de Junio de 2018
- **Días festivos:** del 1 al 17 de Agosto.
- **Días no laborales:** del 18 al 26 de Agosto.
- **Fecha de fin:** 31 de Agosto de 2018
- **Horario diario de las prácticas:** 8 horas (8:00h a 12:00h – 14:00h a 18:00h)
- **Horario semanal:** de Lunes a Viernes (40 horas semanales)
- **Total de horas realizadas:** 320 horas.

Con el fin de poder llegar a cumplir los objetivos marcados al inicio de este proyecto de investigación propuesto, ha sido de vital importancia la programación de los mismos en función del tiempo del periodo de prácticas. El criterio en base cual se ha hecho el reparto temporal de tareas ha sido el referente al grado de dificultad y dedicación que conlleva la consecución de cada uno de los objetivos.

ACTIVIDAD REALIZADA		DURACIÓN
Etapa 1	Estudio bibliográfico de las características de los resortes y mecanismos existentes para determinarlas.	2 semanas
	Determinación de la ley de deformación experimental de un acero de referencia.	
	Realización de un plan de experiencias en base al acero de referencia.	
	Verificación de la hipótesis que plantea poder estudiar la ley de deformación del alambre a partir de un ensayo de flexión sobre el mismo. (Análisis numérico en 2D de los ensayos de flexión en 3 puntos y 4 puntos).	
Etapa 2	Análisis numérico en 3D del ensayo de flexión en 3 puntos.	3 semanas
	Dimensionamiento y concepción de un primer prototipo.	
Etapa 3	Ensayos de flexión experimentales en el laboratorio sobre diferentes aceros a partir del prototipo creado.	1 semana
Etapa 4	Búsqueda de las relaciones entre el comportamiento Carga-Deformada obtenido de los ensayos de flexión realizados y el comportamiento Tensión-Deformación propio de un ensayo de tracción.	1 semana

Etapa 5	Estudio de los resultados obtenidos.	1 semana
	Conclusiones finales del proyecto.	
Duración total de la participación en el proyecto		8 semanas

Tabla 1.13. Planificación temporal del periodo de prácticas realizadas en el Instituto Clément Ader de Toulouse.

Cabe indicar, que como en todo proyecto, la organización temporal de las 5 etapas presentadas puede variar a lo largo de la materialización del proyecto. Por ello, se presenta a continuación los cambios realizados en la planificación temporal inicial de los objetivos a lo largo de la realización de las mismas.

Actividad realizada		Duración inicial	Duración final
Etapa 1	Estudio bibliográfico de las características de los resortes y mecanismos existentes para determinarlas.	2 semana	1 semana
	Determinación de la ley de deformación experimental de un acero de referencia.		
	Realización de un plan de experiencias en base al acero de referencia.		
	Verificación de la hipótesis que plantea poder estudiar la ley de deformación del alambre a partir de un ensayo de flexión sobre el mismo. (Análisis numérico en 2D de los ensayos de flexión en 3 puntos y 4 puntos).		
Etapa 2	Análisis numérico en 3D del ensayo de flexión en 3 puntos.	3 semanas	4 semanas
	Dimensionamiento y concepción de un primer prototipo.		
Etapa 3	Ensayos de flexión experimentales en el laboratorio sobre diferentes aceros a partir del prototipo creado.	1 semana	1 semana
Etapa 4	Búsqueda de las relaciones entre el comportamiento Carga-Deformada obtenido de los ensayos de flexión realizados y el comportamiento Tensión-Deformación propio de un ensayo de tracción.	1 semana	1 semana
Etapa 5	Estudio de los resultados obtenidos.	1 semana	1 semana
	Conclusiones finales del proyecto.		
Duración total de la participación en el proyecto		8 semanas	

Tabla 1.14. Variación de la planificación temporal programada al inicio de las prácticas.

Como se puede constatar en la última tabla, se ha cumplido satisfactoriamente con los periodos de tiempo estimados para la realización de cada tarea, aunque con algunos cambios con respecto a la programación inicial en las etapas 1 y 2. Estos cambios han sido causados principalmente por el tiempo adicional que ha supuesto solucionar las dificultades que se han ido presentando a lo largo de la consecución de los objetivos en cuestión.

La etapa 2 del proyecto es la que ha requerido mayor dedicación de la esperada. Este incumplimiento del tiempo inicial estimado ha sido causado principalmente por la complejidad que suponía el modelo 3D en Abaqus del ensayo de flexión en 3 puntos. Hasta la fecha se desconocían los conocimientos necesarios sobre cómo configurar un modelo dinámico, en lugar de estático como se había hecho hasta el momento. Puesto que era la primera vez que se trabajaba con este tipo de configuración se ha requerido el uso del manual de Abaqus.

Sin embargo, gracias a los conocimientos adquiridos en la asignatura de Modelización Mecánica Avanzada impartida en el INSA de Toulouse, la etapa 1 ha requerido menos tiempo del programado. Con lo cual se ha compensado la demora de la realización de la etapa 2.

Afortunadamente, se ha llegado a la etapa 5 con el tiempo suficiente para reflexionar correctamente sobre las conclusiones del proyecto, aportando así mayor calidad y precisión al estudio.

13.1 Grado de cumplimiento de los objetivos

Una vez concluido el periodo de intervención en el proyecto, es importante llevar a cabo un proceso de evaluación del trabajo personal para determinar los aspectos a mejorar o completar del proyecto realizado. Se puede afirmar que se cumplieron con todos y cada uno de los objetivos programados al inicio de éste de manera bastante correcta. Adicionalmente, se ha evaluado la dificultad de cada uno de ellos en la tabla siguiente.

Objetivo	Grado de cumplimiento	Nivel de dificultad encontrado (1 = simple, 5 = complejo)
Determinación de la ley de deformación de un acero de referencia a partir de los resultados de un ensayo de tracción experimental.	100%	3
Realización de un plan de experiencias	100%	2
Simulación de los modelos aproximativos 2D	100%	4
Simulación de un modelo 3D del ensayo de flexión en 3 puntos	100%	5
Concepción del prototipo de ensayos de flexión en 3 puntos.	90%	5
Realización de los ensayos de flexión experimentales.	100%	3

Búsqueda de las relaciones entre el comportamiento Carga-Deformada obtenido de los ensayos de flexión realizados y el comportamiento Tensión-Deformación propio de un ensayo de tracción.	90%	5
Análisis de los resultados.	100%	3

Tabla 1.15. Grado de cumplimiento de los objetivos propuestos inicialmente

Es necesario recalcar que no todos los objetivos han sido considerados como completamente realizados. En primer lugar, la concepción del prototipo de ensayos de flexión que se ha realizado no es la definitiva para introducirla directamente en el contexto industrial de fabricación de resortes. Ya que como su nombre indica, es un prototipo, el primer diseño de un producto final que necesita de varias modificaciones con el fin de mejorar sus prestaciones (como por ejemplo aumentar el diámetro aceptable de los alambres a caracterizar). Su principal misión de realizar los ensayos experimentales de flexión sobre los alambres de los que se disponía ha sido cumplida y ha sido esencial para poder justificar el resultado del estudio (obtener valores reales de las características mecánicas de los alambres).

Por otra parte, del mismo modo que ocurre con la concepción del prototipo, no se considera que la relación utilizada para determinar la ley de Tensión-Deformación sea la más conveniente y precisa. Es decir, es posible imaginar una relación de aplicación más precisa y directa, pero su obtención requiere de una gran reflexión, la cual no ha sido posible por no disponer del tiempo de estudio necesario. No hay que olvidar la validez de la relación, por lo tanto, es posible afirmar que se ha conseguido llegar al objeto de este proyecto de investigación.

13.2 Situación actual y trabajo futuro

En vista a los resultados provisionales, se puede afirmar que el montaje experimental aporta datos fiables y que junto al estudio analítico posterior se obtienen valores aceptables acerca de las características mecánicas de los alambres. Sin embargo, quedan varios aspectos de este proyecto de los que se aconseja su desarrollo con el fin de afinar el método propuesto de caracterización mecánica de los alambres:

- En primer lugar, es necesario comprobar la bondad de los resultados finales que se obtendrían realizando de nuevo los ensayos experimentales con el dispositivo diseñado. Posteriormente, sería interesante comparar dichos resultados con los catalogados en este trabajo con el fin de verificar la correcta selección del dispositivo de ensayo de flexión más conveniente para la consecución del objetivo principal planteado.
- Vista la escasa difusión entre las curvas fuerza-desplazamiento obtenidas del plan de experiencias aplicado al alambre de diámetro 1,7 milímetros, convendría determinar un nuevo plan de experiencias sobre el mismo alambre. En éste se aplicaría una mayor variación entre las características mecánicas de cada acero con el fin de conocer mejor cómo afecta la variación de dichos parámetros.
- Un aspecto importante a tratar es el de aumentar el rango de diámetros posibles a estudiar experimentalmente a partir del modelo de ensayo de flexión propuesto.

- Desarrollar un prototipo de ensayo de flexión en cuatro puntos y rehacer el procedimiento de estudio de las características mecánicas realizando los ensayos con dicho dispositivo y comparar los resultados con los recogidos en este trabajo. Así sería posible evaluar la elección realizada sobre el modelo de ensayo a emplear para la consecución del objetivo principal propuesto al inicio del proyecto.
- Crear un algoritmo que determine de manera más directa las características mecánicas de los alambres, y por lo tanto la ley de deformación (curva tensión-deformación), a partir de los resultados derivados del ensayo de flexión en tres puntos. Convendría tratar de simplificar o automatizar el método interpretación de los resultados del ensayo de flexión experimental ya que el interés es hacer que el resultado pueda ser aplicado en la industria de fabricación de muelles.

14 ORDEN DE PRIORIDAD ENTRE LOS DOCUMENTOS

Con el fin de establecer la prioridad entre los capítulos que conforman este Proyecto, frente a posibles discrepancias, se establece a continuación el orden de prevalencia entre ellos. Esta organización ha sido pensada para que la interpretación del Proyecto pueda ser correcta, concisa, concreta y detallada. De tal manera que éste pueda ser materializado o desarrollado por un tercero sin necesidad de requerir aclaraciones por parte del autor para su total comprensión.

1. Memoria.

En este capítulo se exponen el objeto y los objetivos del Proyecto, así como toda la información necesaria para el análisis y la propuesta de la solución adoptada.

2. Anexos.

Este apartado contiene todos los criterios y los procedimientos de cálculo que se han seguido para fundamentar el estudio de investigación y el dimensionamiento de la concepción del prototipo de ensayo de flexión.

3. Planos.

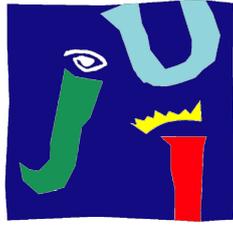
Este capítulo tiene como función mostrar de manera gráfica el prototipo que permitirá cumplir el objeto del Proyecto. Este mecanismo para efectuar ensayos de flexión sobre alambres reales es el resultado gráfico del análisis y dimensionamiento establecido en los apartados de Memoria y Anexos.

4. Pliego de condiciones.

Muestra las condiciones a las que deben estar sujetas las partes implicadas en la consecución del Proyecto de manera tanto activa o pasiva, como directa o indirecta.

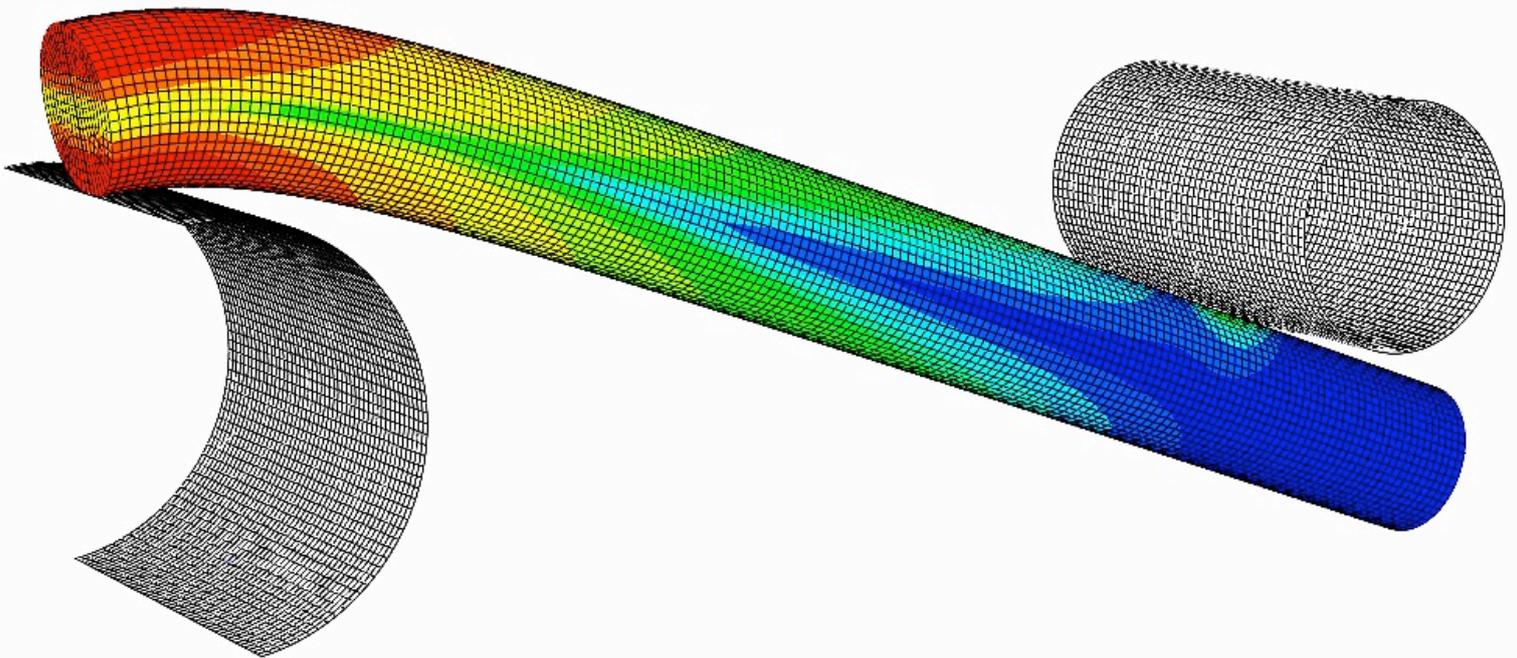
5. Mediciones y Presupuesto.

En este último capítulo se enumeran las características propias de cada partida de elemento del prototipo creado, base para la realización precisa del Presupuesto del Proyecto. Se expone además la inversión necesaria para la materialización del Proyecto, teniendo en cuenta los diferentes parámetros económicos que hacen referencia a la mano de obra, materiales, procesos de fabricación, etc. Se toma como hipótesis la aplicación de este proyecto a la empresa Muelles Castellano S.L.



**UNIVERSITAT
JAUME·I**

***ESTUDIO SOBRE LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE
LAS BOBINAS DE ALAMBRE UTILIZADAS EN LA
FABRICACIÓN DE MUELLES***



Capítulo 2: ANEXOS

Institut Clément Ader de Toulouse – Septiembre de 2018

➤ **Carlos García Arbeloa**

ÍNDICE DE LOS ANEXOS DE LA MEMORIA

ANEXO 1	CÁLCULOS DEL PLAN DE EXPERIENCIAS INICIAL	113
ANEXO 2	CÁLCULOS DEL PLAN DE EXPERIENCIAS DEL ALAMBRE DE 1,7 MILÍMETROS	116
ANEXO 3	CÁLCULO DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS ALAMBRES REALES.....	117
ANEXO 4	ESPECIFICACIONES DE LOS APARATOS PROPORCIONADOS POR ANDILOG TECHNOLOGIES.....	121

ANEXO 1 CÁLCULOS DEL PLAN DE EXPERIENCIAS INICIAL

Para llevar a cabo el análisis numérico del plan de experiencias detallado en el apartado 10.1.1.1 del Capítulo 1 Memoria, es necesario introducir los parámetros relativos al comportamiento elástico-plástico de cada material. Dichos parámetros que describen los ocho aceros a analizar se determinan a partir de las características mecánicas del acero de base mediante las expresiones matemáticas expuestas en ese mismo epígrafe. A su vez, el comportamiento elástico-plástico del acero de base se determina a partir de los datos recogidos de un ensayo de tracción realizado sobre una probeta de acero de módulo de elasticidad (E) = 215 MPa.

	Deformación plástica	Tensión (MPa)	
	0	452,050968	Re
	0,000418105	497,8875916	
	0,004389551	582,226979	
	0,006804899	601,5802201	
	0,018017925	649,8614636	
	0,03505	701,8096371	
	0,055536887	742,3495842	
	0,080798692	772,4998966	
	0,10631224	787,3713345	
	0,132664622	791,0382644	Rm
	0,140016261	787,5750528	
	0,148622395	769,64784	
Rotura final (Rr)	0,151119853	758,0358954	

Tabla 2.1. Valores de la deformación plástica del acero de base (acero 0).

Tomando como referencia las características del acero de base (“Acero 0”) estudiado experimentalmente a partir de un ensayo de tracción, es posible determinar el comportamiento elástico-plástico del resto de aceros por medio de las expresiones siguientes:

- Límite elástico (MPa):

$$Re' = Re_0 \pm 100 \quad (2.1)$$

- Resistencia mecánica última (MPa):

$$Rm' = Rm_0 \pm 100 \quad (2.2)$$

- Deformación máxima (%):

$$\varepsilon'_{max} = \varepsilon_{max} * cte \quad (2.3)$$

- Tensiones intermedias (MPa):

$$\sigma' = Re' + \frac{(Rm' - Re') * (\sigma_0 - Re_0)}{(Rm_0 - Re_0)} \quad (2.4)$$

	Acero 1		Acero 2	
	Deformación plástica	Tensión (MPa)	Deformación plástica	Tensión (MPa)
Re	0	552,050968	0	552,050968
	0,000627157	597,8875916	0,000209052	597,8875916
	0,006584327	682,226979	0,002194776	682,226979
	0,010207349	701,5802201	0,00340245	701,5802201
	0,027026888	749,8614636	0,009008963	749,8614636
	0,052575	801,8096371	0,017525	801,8096371
	0,08330533	842,3495842	0,027768443	842,3495842
	0,121198038	872,4998966	0,040399346	872,4998966
	0,15946836	887,3713345	0,05315612	887,3713345
Rm	0,198996933	891,0382644	0,066332311	891,0382644
	0,210024392	887,5750528	0,070008131	887,5750528
	0,222933593	869,64784	0,074311198	869,64784
	0,226679779	858,0358954	0,075559926	858,0358954

Tabla 2.2. Valores de la deformación plástica de los aceros 1 y 2.

	Acero 3		Acero 4	
	Deformación plástica	Tensión (MPa)	Deformación plástica	Tensión (MPa)
Re	0	552,050968	0	552,050968
	0,000627157	570,8443223	0,000209052	570,8443223
	0,006584327	605,4240944	0,002194776	605,4240944
	0,010207349	613,3590663	0,00340245	613,3590663
	0,027026888	633,1547329	0,009008963	633,1547329
	0,052575	654,4538678	0,017525	654,4538678
	0,08330533	671,0755457	0,027768443	671,0755457
	0,121198038	683,4373966	0,040399346	683,4373966
	0,15946836	689,534796	0,05315612	689,534796
Rm	0,198996933	691,0382644	0,066332311	691,0382644
	0,210024392	689,618322	0,070008131	689,618322
	0,222933593	682,2680323	0,074311198	682,2680323
	0,226679779	677,5070492	0,075559926	677,5070492

Tabla 2.3. Valores de la deformación plástica de los aceros 3 y 4.

	Acero 5		Acero 6	
	Deformación plástica	Tensión (MPa)	Deformación plástica	Tensión (MPa)
Re	0	352,050968	0	352,050968
	0,000627157	424,9308608	0,000209052	424,9308608
	0,006584327	559,0298636	0,002194776	559,0298636
	0,010207349	589,8013739	0,00340245	589,8013739
	0,027026888	666,5681944	0,009008963	666,5681944
	0,052575	749,1654063	0,017525	749,1654063
	0,08330533	813,6236226	0,027768443	813,6236226
	0,121198038	861,5623966	0,040399346	861,5623966
	0,15946836	885,2078729	0,05315612	885,2078729
Rm	0,198996933	891,0382644	0,066332311	891,0382644
	0,210024392	885,5317836	0,070008131	885,5317836
	0,222933593	857,0276477	0,074311198	857,0276477
	0,226679779	838,5647415	0,075559926	838,5647415

Tabla 2.4. Valores de la deformación plástica de los aceros 5 y 6.

	Acero 7		Acero 8	
	Deformación plástica	Tensión (MPa)	Deformación plástica	Tensión (MPa)
Re	0	352,050968	0	352,050968
	0,000627157	397,8875916	0,000209052	397,8875916
	0,006584327	482,226979	0,002194776	482,226979
	0,010207349	501,5802201	0,00340245	501,5802201
	0,027026888	549,8614636	0,009008963	549,8614636
	0,052575	601,8096371	0,017525	601,8096371
	0,08330533	642,3495842	0,027768443	642,3495842
	0,121198038	672,4998966	0,040399346	672,4998966
	0,15946836	687,3713345	0,05315612	687,3713345
Rm	0,198996933	691,0382644	0,066332311	691,0382644
	0,210024392	687,5750528	0,070008131	687,5750528
	0,222933593	669,64784	0,074311198	669,64784
	0,226679779	658,0358954	0,075559926	658,0358954

Tabla 2.5. Valores de la deformación plástica de los aceros 7 y 8.

ANEXO 2 CÁLCULOS DEL PLAN DE EXPERIENCIAS DEL ALAMBRE DE 1,7 MILÍMETROS

A continuación se exponen las tablas que constituyen la base de datos referente al plan de experiencias detallado en el apartado 11.4.2 Estudio numérico del Capítulo 1 Memoria. Estas tablas muestran la información referente a las características mecánicas propias de cada material que se pretende estudiar numéricamente. En base a las características del acero 0 y a las variaciones de éstas programadas en las tablas 1.11 y 1.12 expuestas en el apartado 11.4.2 del Capítulo Memoria, se determinan las características propias de los ocho aceros recogidos en el plan de experiencias. Dicha variación se lleva a cabo mediante las siguientes expresiones:

$$Rm' [MPa] = Rm_{acero0} \pm 300 \quad (2.5)$$

$$\varepsilon'_{Rm} [\%] = \varepsilon_{Rm.acero0} \pm 0,05 \quad (2.6)$$

$$\varepsilon'_{rotura} [\%] = \varepsilon_{rotura.acero0} \pm 0,05 \quad (2.7)$$

	Acero 0		Acero 1		Acero 2	
	Tensión (MPa)	Deformación plástica	Tensión (MPa)	Deformación plástica	Tensión (MPa)	Deformación plástica
Re	2384,247	0	2384,247	0	2384,247	0
Rm	2912,029022	0,0765	3212,029022	0,1265	3212,029022	0,1265
Rr	2384,247	0,2295	2384,247	0,2795	2384,247	0,1795

Tabla 2.6. Valores de la deformación plástica de los aceros 0, 1 y 2.

	Acero 3		Acero 4		Acero 5	
	Tensión (MPa)	Deformación plástica	Tensión (MPa)	Deformación plástica	Tensión (MPa)	Deformación plástica
Re	2384,247	0	2384,247	0	2384,247	0
Rm	3212,029022	0,0265	3212,029022	0,0265	2612,029022	0,1265
Rr	2384,247	0,2795	2384,247	0,1795	2384,247	0,2795

Tabla 2.7. Valores de la deformación plástica de los aceros 3, 4 y 5.

	Acero 6		Acero 7		Acero 8	
	Tensión (MPa)	Deformación plástica	Tensión (MPa)	Deformación plástica	Tensión (MPa)	Deformación plástica
Re	2384,247	0	2384,247	0	2384,247	0
Rm	2612,029022	0,1265	2612,029022	0,0265	2612,029022	0,0265
Rr	2384,247	0,1795	2384,247	0,2795	2384,247	0,1795

Tabla 2.8. Valores de la deformación plástica de los aceros 6, 7 y 8.

ANEXO 3 CÁLCULO DE LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS ALAMBRES REALES

En este epígrafe se presentan los resultados del estudio analítico presentado en el apartado 10.4.1 del Capítulo 1 Memoria. En él, mediante las expresiones de dicho estudio, se procesan los datos registrados en los ensayos experimentales de flexión realizados sobre cada alambre que se dispone y determinar así sus propiedades elástico-plásticas. Para llevar a cabo este estudio analítico se tiene en cuenta la siguiente nomenclatura:

L: distancia longitudinal que existe entre un apoyo y el centro geométrico del alambre.

D: diámetro del alambre que se estudia.

F: fuerza aplicada sobre la sección central del alambre.

I: Momento de inercia del alambre.

U: Flecha de deformación máxima o elástica del alambre.

- Cálculo del límite elástico (Re):

$$Re[MPa] = \frac{16 * F_{Re} * L}{\pi * D^3} \quad (2.8)$$

- Cálculo del Módulo de Young (E). Para determinar esta característica del material se parte de la relación siguiente, donde “y” es la distancia de una fibra a la línea neutra.

$$y(F) = f(L; D; E) \quad (2.9)$$

Con el fin de obtener la expresión que permita calcular el valor del módulo de elasticidad en cada caso, es necesaria la ecuación diferencial de la línea elástica $y'' = \frac{M_f}{E * I}$ y la expresión del momento flector $M_f(x) = \frac{F}{2}x$. Por lo tanto, una vez conocida la función que define la variación del momento flector, por integración de la ecuación diferencial de la línea elástica se puede determinar la ecuación que permite obtener el corrimiento máximo o flecha. Finalmente, despejando el módulo de elasticidad de ésta se obtiene que:

$$E[MPa] = \left(\frac{F}{y}\right) * \frac{2 * L^3 * 64}{6 * \pi * D^4} \quad (2.10)$$

- Cálculo de la deformación longitudinal elástica ($\varepsilon_{elástica}$):

$$\varepsilon_{elástica}(\%) = \frac{Re}{E} \quad (2.11)$$

- Variación de la longitud de un elemento tomado en la superficie del alambre en el centro de su longitud transversal.

$$\varepsilon_{flexión}[\%] = \frac{6 * D_{alambre}}{L_{entre apoyos}^2} * |U| \quad (2.12)$$

La expresión 2.12 se utiliza tanto para determinar la deformación de rotura en flexión (ε_{rotura}) como la deformación asociada a la resistencia a la flexión (ε_{Rm}). Para el cálculo de estas dos características, se otorga a |U| el valor de la flecha alcanzada

cuando se alcanza el límite elástico y el valor de la flecha alcanzada al final del ensayo experimental de flexión respectivamente.

- Tensión experimentada en la sección solicitada por el aplicador de carga (resistencia última R_m):

$$R_m[\text{MPa}] \geq \frac{8 * F_{\text{aplicada}} * L_{\text{entre apoyos}}}{\pi * D_{\text{alambre}}^2} \quad (2.13)$$

Estas dos ecuaciones (2.12 y 2.13) se obtienen de la documentación correspondiente a la referencia bibliográfica [12].

Diámetro del alambre	1,6 mm
Longitud entre los apoyos inferiores.	20 mm
Módulo de Young (E)	180624,28 MPa
Fuerza referente al límite elasticidad	185 N
Límite elástico (Re)	2300,29 MPa
Resistencia última (Rm)	3150,39 MPa
Deformación plástica (ϵ_{Rm})	0,096
Tensión de rotura (Rr)	2750,89 MPa
Deformación total (ϵ_{rotura})	0,204

Tabla 2.9. Estudio analítico del acero de diámetro 1,6 mm.

Diámetro del alambre	1,7 mm
Longitud entre los apoyos inferiores.	20 mm
Módulo de Young (E)	203488,23 MPa
Fuerza referente al límite elasticidad	240 N
Límite elástico (Re)	2487,91 MPa
Resistencia última (Rm)	2912,02 MPa
Deformación plástica (ϵ_{Rm})	0,0765
Tensión de rotura (Rr)	2384,25 MPa
Deformación total (ϵ_{rotura})	0,2295

Tabla 2.10. Estudio analítico del acero de diámetro 1,7 mm.

Diámetro del alambre	1,85 mm
Longitud entre los apoyos inferiores.	20 mm
Módulo de Young (E)	180665,45 MPa
Fuerza referente al límite elasticidad	200 N
Límite elástico (Re)	1608,73 MPa
Resistencia última (Rm)	3025,97 MPa
Deformación plástica (ϵ_{Rm})	0,111
Tensión de rotura (Rr)	2100,97 MPa
Deformación total (ϵ_{rotura})	0,346875

Tabla de elaboración propia 2.11. Estudio analítico del acero de diámetro 1,85 mm.

Diámetro del alambre	2,4 mm
Longitud entre los apoyos inferiores.	40 mm
Módulo de Young (E)	217440,8 MPa
Fuerza referente al límite elasticidad	205 N
Límite elástico (Re)	1510,5 MPa
Resistencia última (Rm)	2667,59 MPa
Deformación plástica (ϵ_{Rm})	0,054
Tensión de rotura (Rr)	1543,35 MPa
Deformación total (ϵ_{rotura})	0,171

Tabla 2.12. Estudio analítico del acero de diámetro 2,4 mm.

Diámetro del alambre	2,5 mm
Longitud entre los apoyos inferiores.	40 mm
Módulo de Young (E)	222007,8 MPa
Fuerza referente al límite elasticidad	240 N
Límite elástico (Re)	1564,55 MPa
Resistencia última (Rm)	2546,62 MPa
Deformación plástica (ϵ_{Rm})	0,0609375
Tensión de rotura (Rr)	1586,55 MPa
Deformación total (ϵ_{rotura})	0,1734375

Tabla 2.13. Estudio analítico del acero de diámetro 2,4 mm.

Diámetro del alambre	2,6 mm
Longitud entre los apoyos inferiores.	80 mm
Módulo de Young (E)	255788,5 MPa
Fuerza referente al límite elasticidad	165 N
Límite elástico (Re)	1900,87 MPa
Resistencia última (Rm)	2706,58 MPa
Deformación plástica (ϵ_{Rm})	0,03046875
Tensión de rotura (Rr)	2003,29 MPa
Deformación total (ϵ_{rotura})	0,063375

Tabla 2.14. Estudio analítico del acero de diámetro 2,6 mm.

ANEXO 4 ESPECIFICACIONES DE LOS APARATOS PROPORCIONADOS POR ANDILOG TECHNOLOGIES

Se resume en las siguientes tablas (Tabla 2.15 y Tabla 2.16) las especificaciones técnicas del banco de ensayos *BAT 1000R* y del dinamómetro *Centor Easy (modelo CNR EA 500)* empleados en el mecanismo de ensayo de flexión diseñado. Posteriormente se adjuntan sus fichas técnicas completas recuperadas del catálogo de *ANDILOG TECHNOLOGIES*, empresa a partir de la cual se obtienen estos dispositivos.

BANCO DE ENSAYOS BAT 1000R	
Capacidad	1000 N
Recorrido de la deslizadera	300 mm
Desplazamiento por vuelta de la manivela	2,54 mm
Dimensiones de la base	230 x 254 mm
Altura total	577 mm
Indicador de desplazamiento	Sí
Resolución de la regla digital	0,01 mm
Peso	7,5 kg

Tabla 2.15. Características técnicas del banco de ensayos.

DINAMÓMETRO CENTOR EASY (CNR EA 500)	
Capacidad	500 N
Precisión	0,1 % PE
Resolución	1/10 000 PE
Unidades de medida	N, Lb, Kg, g, Oz
Frecuencia de muestreo	1 000 Hertz
Auto-off	Ajustable de 5 a 15 minutos
Autonomía sin recarga	8 horas
Fuente de alimentación	110 V / 220 V

Tabla 2.16. Características técnicas del dinamómetro.



BATI000 Bâti manuel pour dynamomètre



Support pour dynamomètres jusqu'à 1 000N

Pour assurer une bonne position du dynamomètre par rapport à la pièce testée, le bâti manuel BATI000 est une solution facile à mettre en oeuvre. Il peut être utilisé en traction ou en compression pour des essais nécessitant des efforts jusqu'à 1 000 N.

Le socle est constitué d'une base plane qui reçoit l'échantillon à tester et sur laquelle sont fixées deux colonnes supportant le coulisseau mobile : le dynamomètre est monté sur le coulisseau sans jeu, dont la course est de 300 mm, le mouvement du coulisseau est exercé manuellement grâce à une manivelle située en partie haute et un système à vis sans fin, en fin de course (partie basse) le mouvement du coulisseau peut-être limité par une butée ajustable.

Une règle de mesure de déplacement est disponible en option. Elle permet d'afficher en temps réel la position du bâti avec une résolution de 0,01 mm.

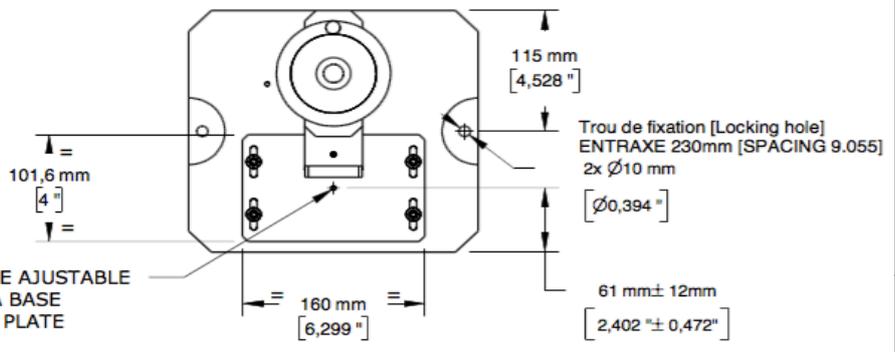
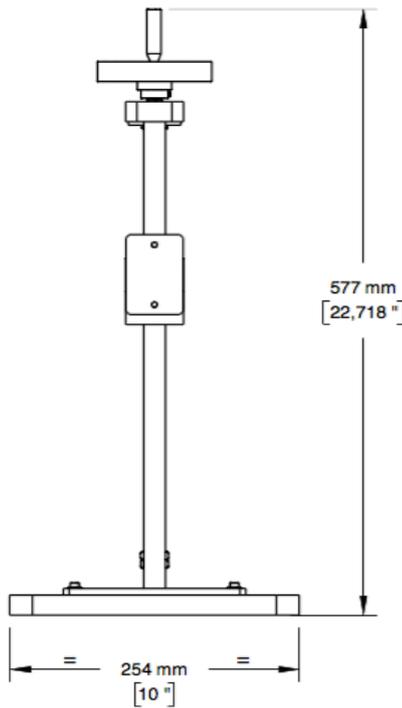
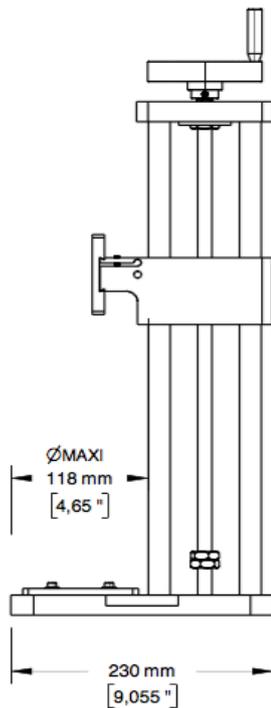
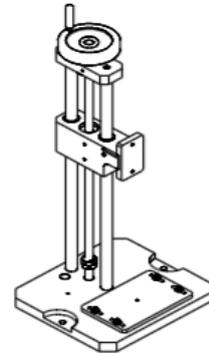
Modèles et capacités

SPÉCIFICATIONS	BATI000	BATI000R
Capacité	1 000 N	1 000 N
Course du coulisseau	300 mm	300 mm
Déplacement par tour de manivelle	2.54 mm	2.54 mm
Ajustement position table de travail	24 mm	24 mm
Dimensions base	230 x 254mm	230 x 254mm
Hauteur totale	577 mm	577 mm
Indicateur de déplacement	Non	Oui
Résolution de déplacement		0,01 mm
Poids	7,2 kg	7,5 kg



BATI MANUEL BAT1000/ MANUAL TEST STAND

CAPACITY: 1000N [200lbs]
TRAVEL WITH CENTOR: 300mm [11.81"]
SCREW PITCH: 2.54mm/Rev [1/10"/Rev]
WEIGHT: 7.5kg [16.5lbs]



Drawn name:	Assembly name:
DIMENSIONS	Assembly BAT1000
Date of creation:	11/12/2013

Rev:	Date:	Description:	Drawn by:	Item:	Ref assembly:
1	13/01/2014	ORIGINE			BAT1000



CENTOR Easy Digital force gauge



Centor Easy

Complete gauge for tests in production

The **CENTOR Easy** force gauges are designed to meet the production needs of its users. This group offers several features which are indispensable today for Quality Control, for example: ease of reading with its large backlit graphical display, RS232 output, memory of the last 100 values and ability to set thresholds with visual and sound alarms.

Its highly efficient measurement chain enables it to use a sampling rate of 1,000 Hertz with a resolution of 1/10,000 FS and a total error of less than 0.1% FS.

A statistics feature is available on the Centor

EASY models: the average and standard deviation of the current batch are calculated and displayed after each measurement. All the values of the production batch are kept in the memory and can be sent to a computer by RS232. The operator is spared any data entry, knows his results in real time and saves everything at the end of the tests.

The entirely configurable RS232 output sends the data to a PC. A digimatic output can be used with a printer for statistics. **Designed for use in an industrial environment, it is an ideal tool for tests during production.**

Specifications

FEATURES	CENTOR EASY
Accuracy	0,1 % PE
Resolution	1/10 000 PE
Display peak and current reading in the same time	✓
Units	N, Lb, Kg, g, Oz
Bargraph	✓
Sampling rate	1 000 Hertz
Tare	✓
Auto-off	Adjustable from 5 to 15 minutes
Force limit	✓
Average and standard deviation	✓
Low battery indicator	✓
Peak in tension and compression	✓
Memory for setup	✓
RS232 output	Send current reading, peak or minimum
Fast charge	✓
Reversible display	✓
Digimatic output	✓
Analogic output	+/- 1 V
TTL input and output	✓
Backlit display	✓
Sensor protected from overloads up to 200% of its capacity	✓
Operates on rechargeable batteries	✓
Operation without recharging	8 hours
Metal casing	✓
Protective elastomer overmould	✓
Certificate of calibration included	✓
Power supply	110V / 220V

Statistics

Statistics feature with automatic calculation of the average and standard deviation on the 100 values in the memory.

MES / ECH	3
OPER	01
Unite	N
STATS	MXI
Nbech	002
Moy	12.33
001	12.334
001	12.332
001	12.331
002	12.335
002	12.334
002	12.330

Option - Softwares

Caligraph software compatible: Data acquisition and analysis of curves with real time graphing thru RS232 or USB.

RSIC software compatible: Download your results to Microsoft Excel using your RS232 comport.

Models and capacities

MODELS	CAPACITIES	ACCURACY	RESOLUTIONS
CNR EA 10	10 N	0.01 N	0.001 N
CNR EA 25	25 N	0.025 N	0.0025 N
CNR EA 50	50 N	0.05 N	0.005 N
CNR EA 100	100 N	0.1 N	0.01 N
CNR EA 250	250 N	0.25 N	0.025 N
CNR EA 500	500 N	0.5 N	0.05 N
CNR EA 1000	1000 N	1 N	0.1 N

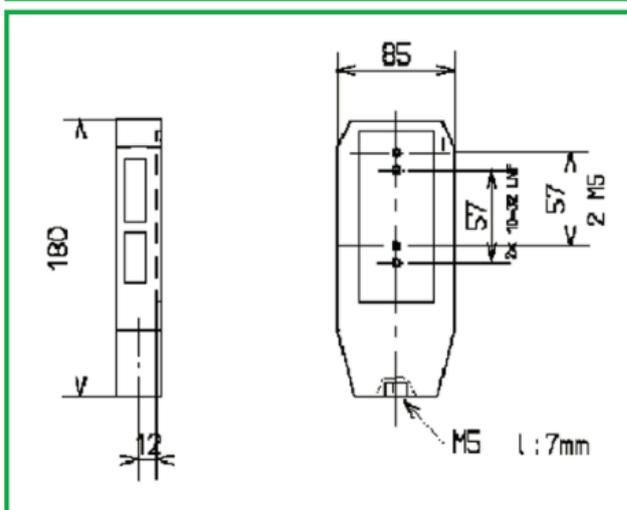
CENTOR Easy Digital force gauge



Display indicator and keypad



Dimensions



Accessories

Our force gauges are delivered in a carrying case with power supply, certificate of calibration and accessories (hook, plate diameter 19mm, rod)



Certifié ISO 9001:2000

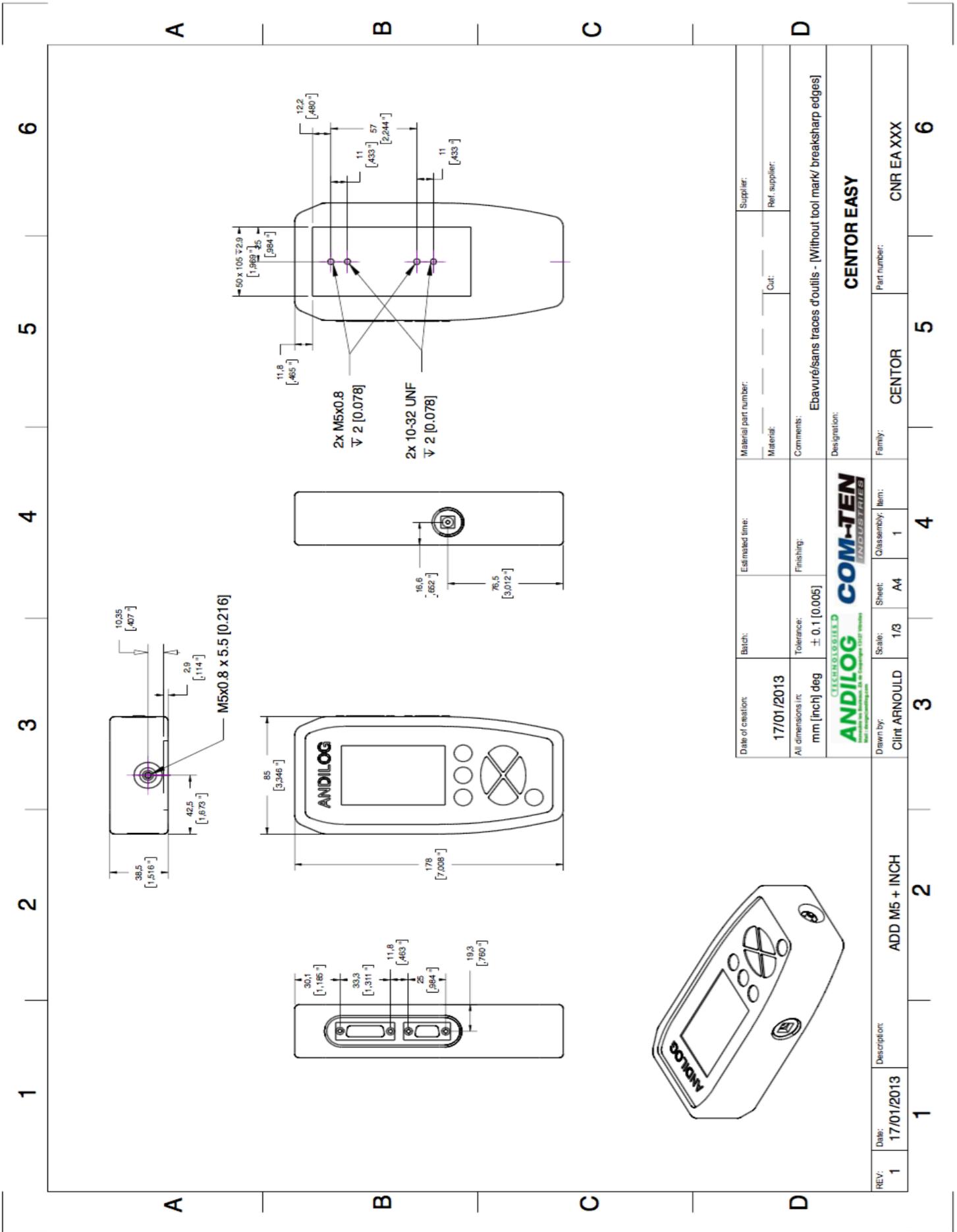
ANDILOG Technologies

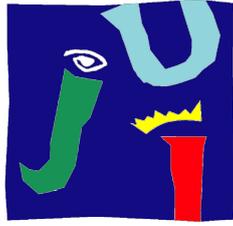
BP 62001

13845 Vitrolles Cedex 9

info@andilog.com • www.andilog.com

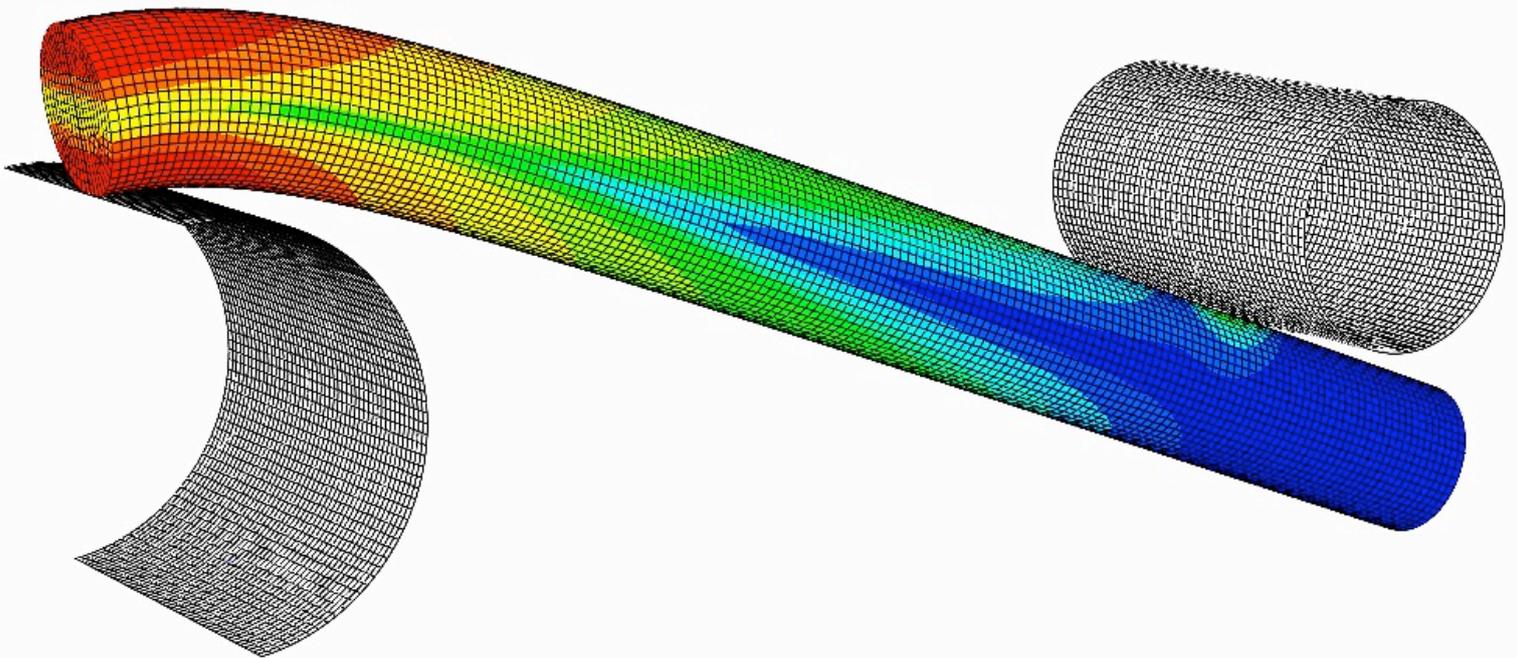
Tél. : +33 820 888 202 • Fax : +33 820 888 902





**UNIVERSITAT
JAUME·I**

***ESTUDIO SOBRE LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE
LAS BOBINAS DE ALAMBRE UTILIZADAS EN LA
FABRICACIÓN DE MUELLES***



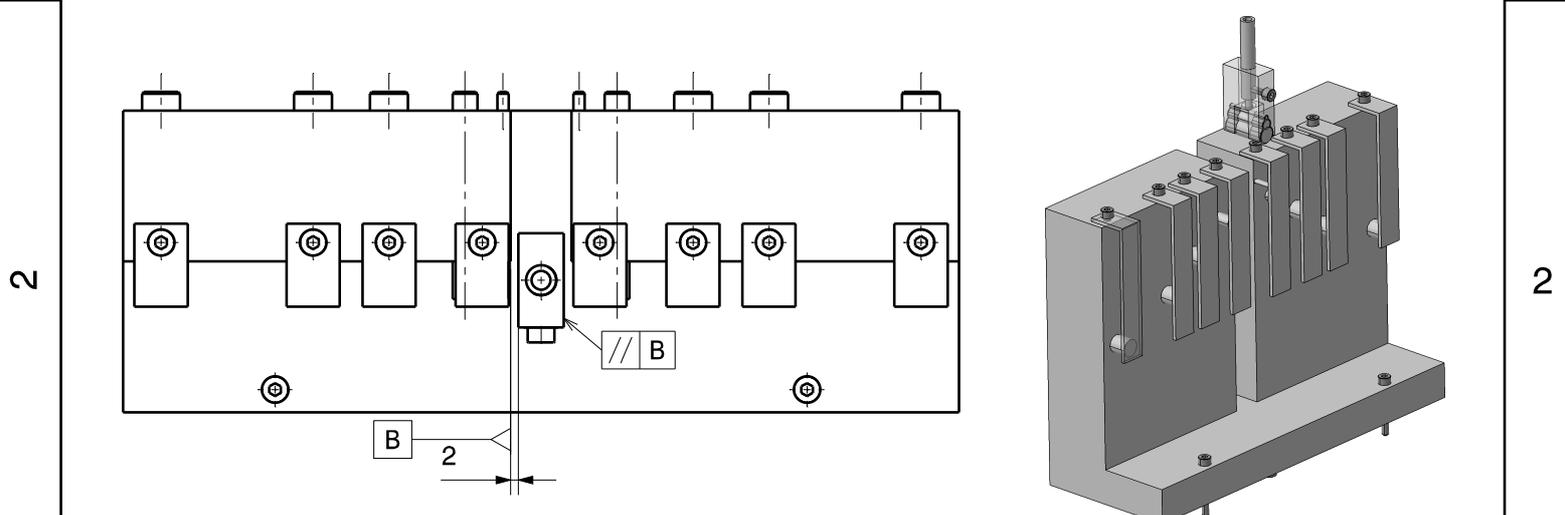
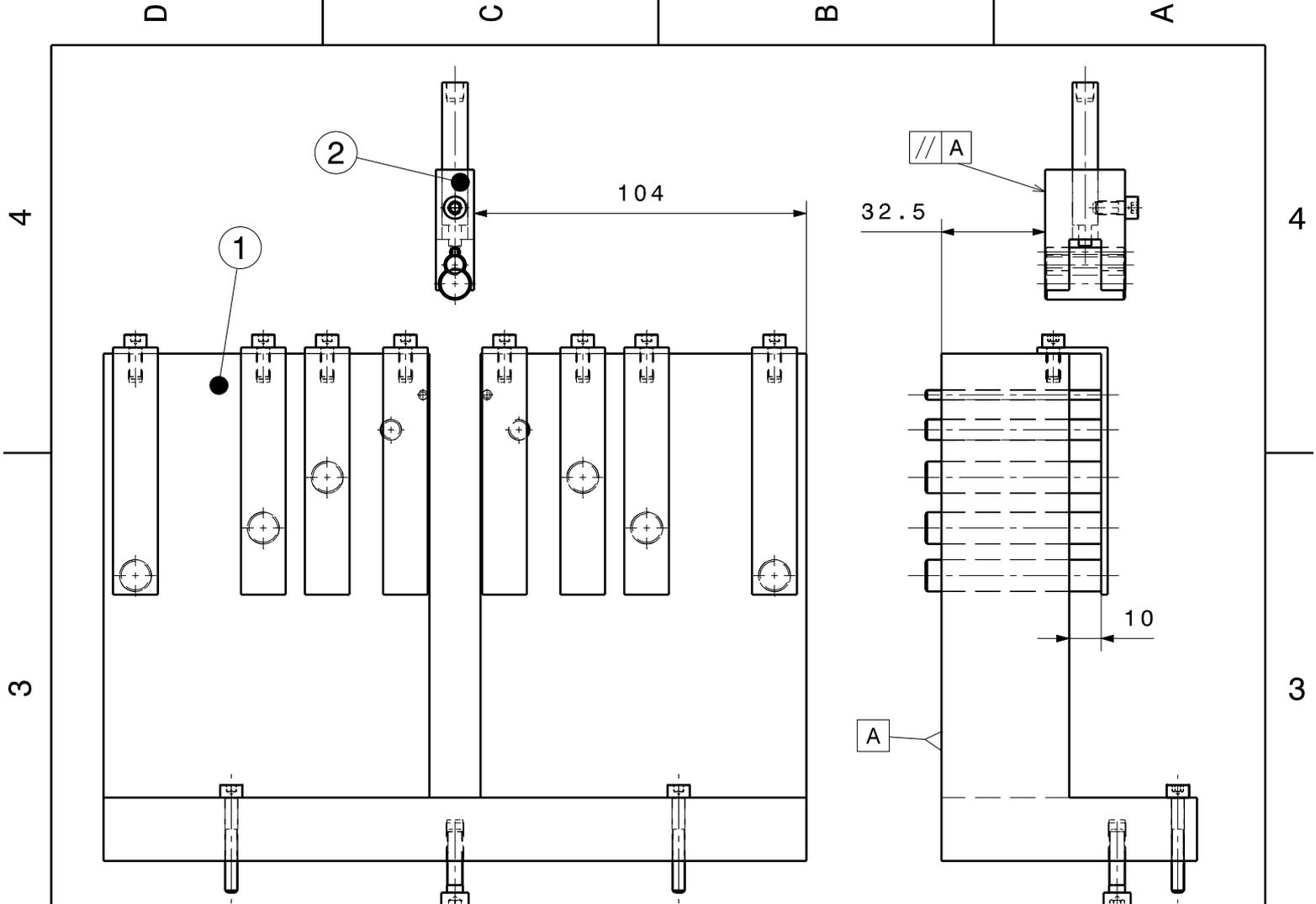
Capítulo 3: PLANOS

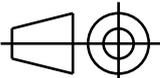
Institut Clément Ader de Toulouse – Septiembre de 2018

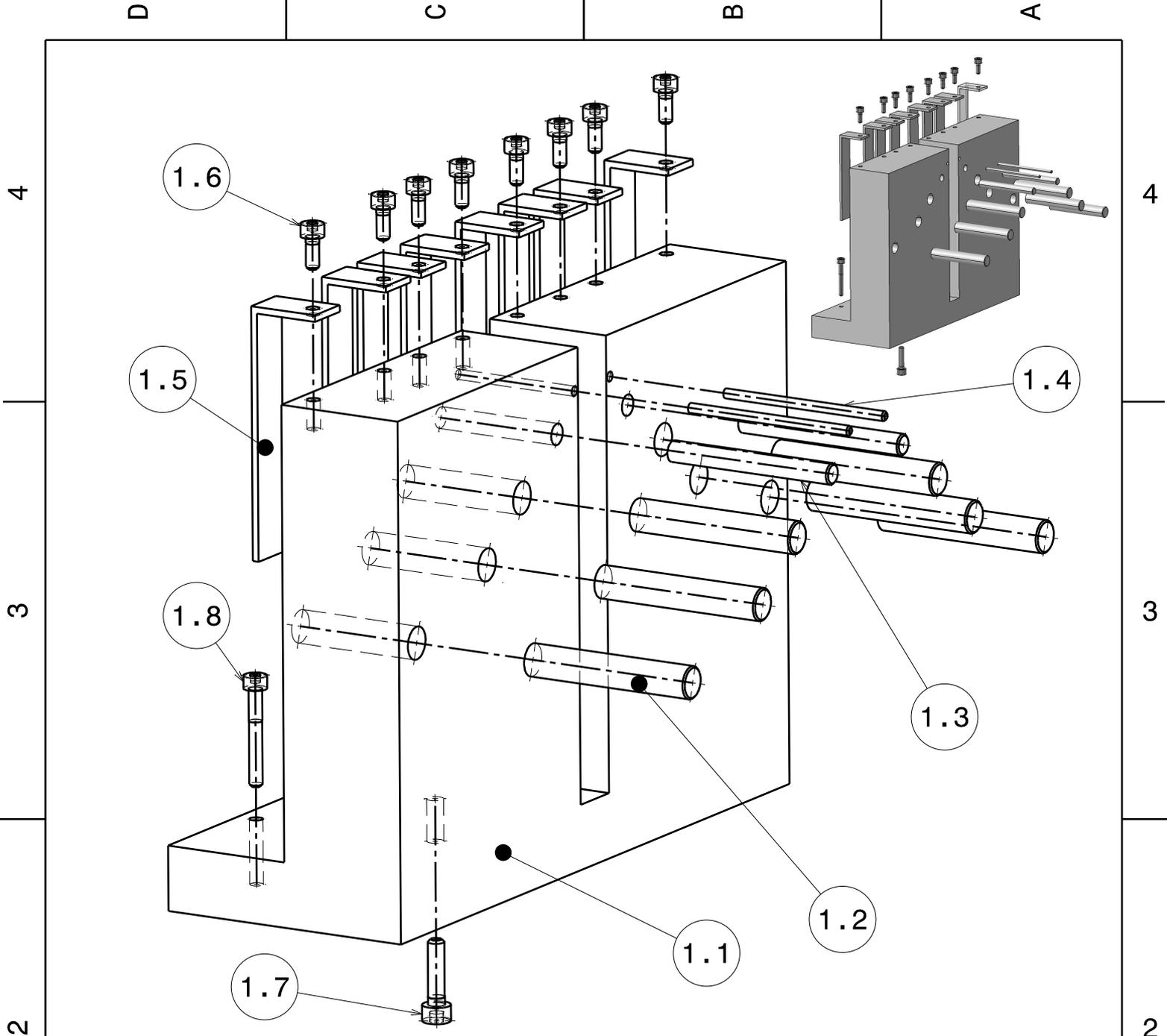
➤ **Carlos García Arbeloa**

ÍNDICE DE LOS PLANOS

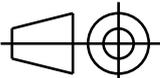
PLANO 0: CONJUNTO DEL SISTEMA	133
PLANO 1: SUBCONJUNTO 1	135
PLANO 1.1: ESTRUCTURA	137
PLANO 1.2: STUB D10x55.....	139
PLANO 1.3: STUB D6.5x55.....	141
PLANO 1.4: STUB D3x55.....	143
PLANO 1.5: PLACA EN L.....	145
PLANO 2: SUBCONJUNTO 2	147
PLANO 2.1: APLICADOR DE ESFUERZO	149
PLANO 2.2: EJE DEL DINAMÓMETRO	151
PLANO 2.3: STUB D3x25.....	153
PLANO 2.4: STUB D6.5x25.....	155
PLANO 2.5: STUB D10x25.....	157
PLANO 3: PLACA EN L ALTERNATIVA	159



1	2	Subconjunto 2	2	
1	1	Subconjunto 1	1	
Nº de piezas	Marca	Designación	Plano	Material
AUTOR Carlos Garcia Arbeloa		 ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS EXPERIMENTALES GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA		
MATERIAL	DIMENSIONES mm.			
ESCALA 1:2	FORMATO A4	TÍTULO DEL PROYECTO Estudio sobre la caracterización mecánica de las bobinas de alambre utilizadas en la fabricación de muelles.		
REPRESENTACIÓN 	TÍTULO DEL PLANO Conjunto del sistema		HOJA 0	FIRMA 



2	1.8	Tornillo ISO 4762 M4x30		Acero
1	1.7	Tornillo ISO 4762 M5x20		Acero
2	1.6	Tornillo ISO 4762 M4x10		Acero
2	1.5	Placa en L	1.5	Aluminio
2	1.4	STUB D3x55	1.4	100Cr6
2	1.3	STUB D6.5x55	1.3	100Cr6
6	1.2	STUB D10x55	1.2	100Cr6
1	1.1	Estructura	1.1	Acero
Nº de piezas	Marca	Designación	Plano	Material

AUTOR Carlos Garcia Arbeloa		 UNIVERSITAT JAUME I ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS EXPERIMENTALES GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA	
MATERIAL	DIMENSIONES mm.		
ESCALA 3:5	FORMATO A4	TÍTULO DEL PROYECTO Estudio sobre la caracterización mecánica de las bobinas de alambre utilizadas en la fabricación de muelles.	
REPRESENTACIÓN 	TÍTULO DEL PLANO Subconjunto 1: Ensablaje de la parte fija del sistema		HOJA 1
			FIRMA 

D

A

D C B A

4

3

2

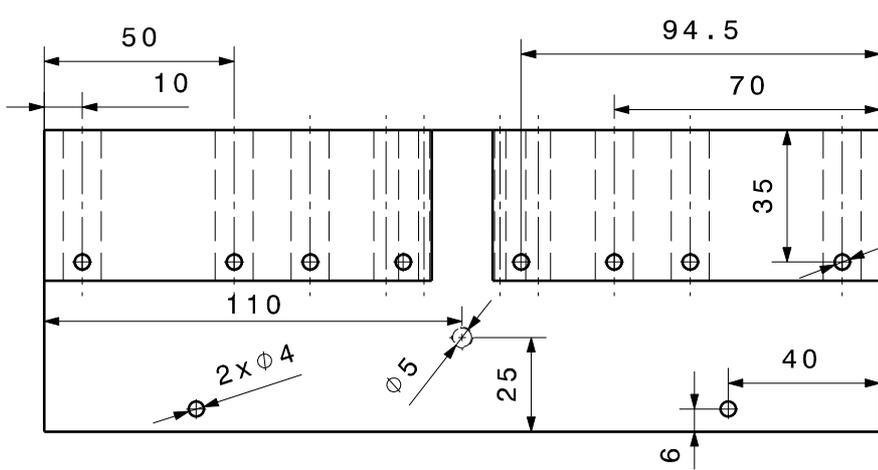
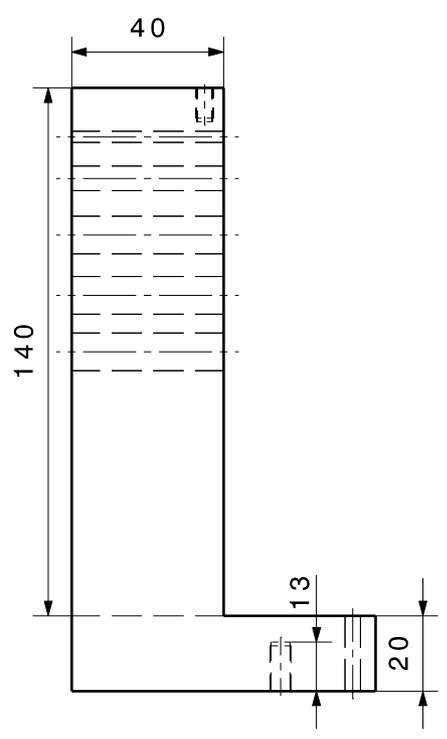
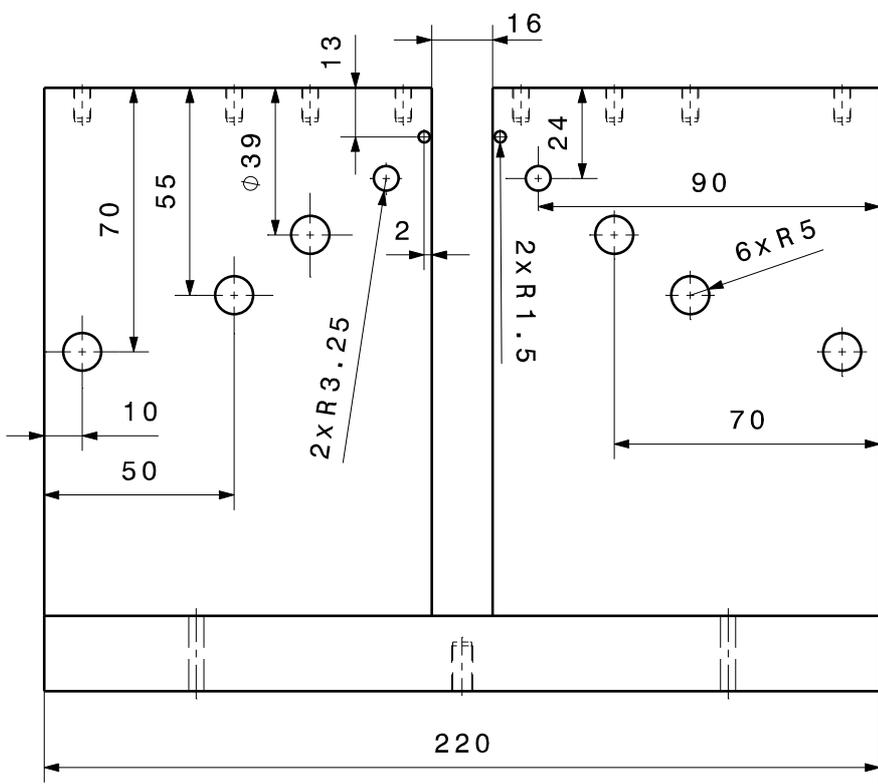
1

4

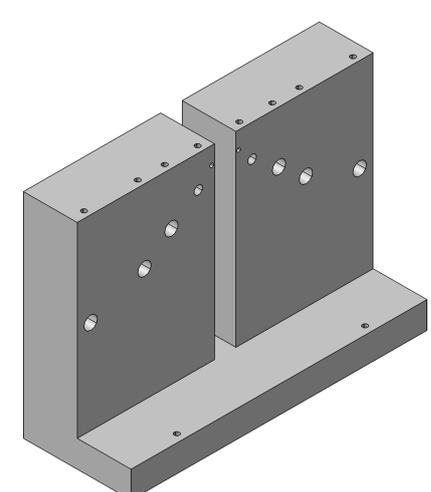
3

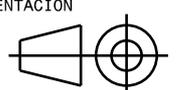
2

1



8x ϕ 4



AUTOR Carlos Garcia Arbeloa		 UNIVERSITAT JAUME I		ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS EXPERIMENTALES	
MATERIAL Acero	DIMENSIONES mm.			FECHA 06/07/2018	GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
ESCALA 1:2	FORMATO A4	TÍTULO DEL PROYECTO Estudio sobre la caracterización mecánica de las bobinas de alambre utilizadas en la fabricación de muelles.			
REPRESENTACIÓN 		TÍTULO DEL PLANO Estructura		HOJA 1.1	FIRMA 

D

A

D

C

B

A

4

4

3

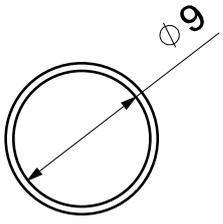
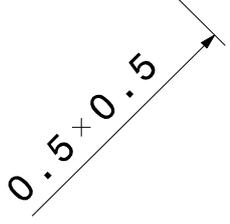
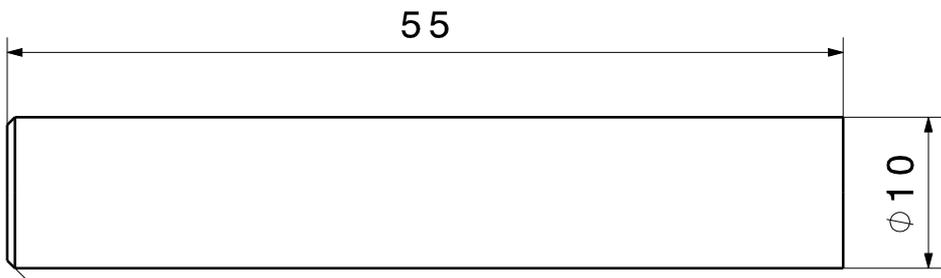
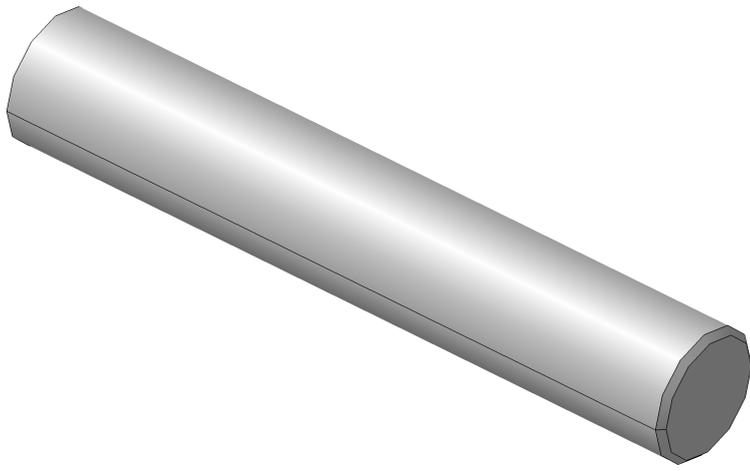
3

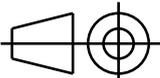
2

2

1

1



AUTOR Carlos Garcia Arbeloa		 UNIVERSITAT JAUME I		ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS EXPERIMENTALES	
MATERIAL 100Cr6	DIMENSIONES mm.			FECHA 06/07/2018	GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
ESCALA 2:1	FORMATO A4	TÍTULO DEL PROYECTO Estudio sobre la caracterización mecánica de las bobinas de alambre utilizadas en la fabricación de muelles.			
REPRESENTACIÓN 	TÍTULO DEL PLANO STUB D10x55		HOJA 1.2	FIRMA 	

D

A

D

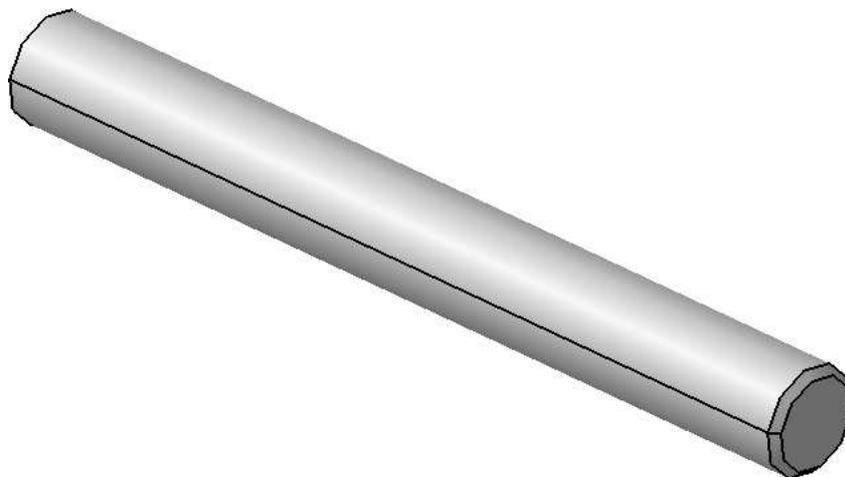
C

B

A

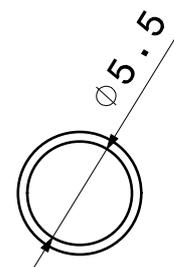
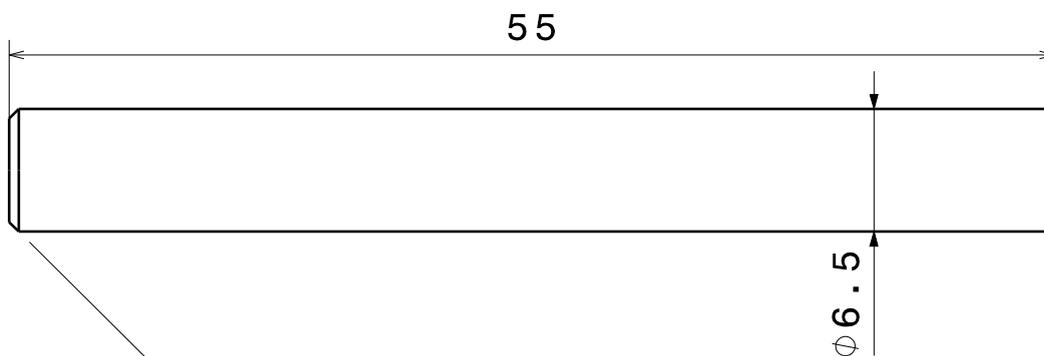
4

4



3

3



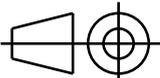
2

2

 0.5×0.5

1

1

AUTOR Carlos Garcia Arbeloa		 UNIVERSITAT JAUME I		ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS EXPERIMENTALES	
MATERIAL 100Cr6	DIMENSIONES mm.			FECHA 06/07/2018	GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
ESCALA 5:2	FORMATO A4	TÍTULO DEL PROYECTO Estudio sobre la caracterización mecánica de las bobinas de alambre utilizadas en la fabricación de muelles.			
REPRESENTACIÓN 		TÍTULO DEL PLANO STUB D6.5x55		HOJA 1.3	FIRMA 

D

A

D

C

B

A

4

4

3

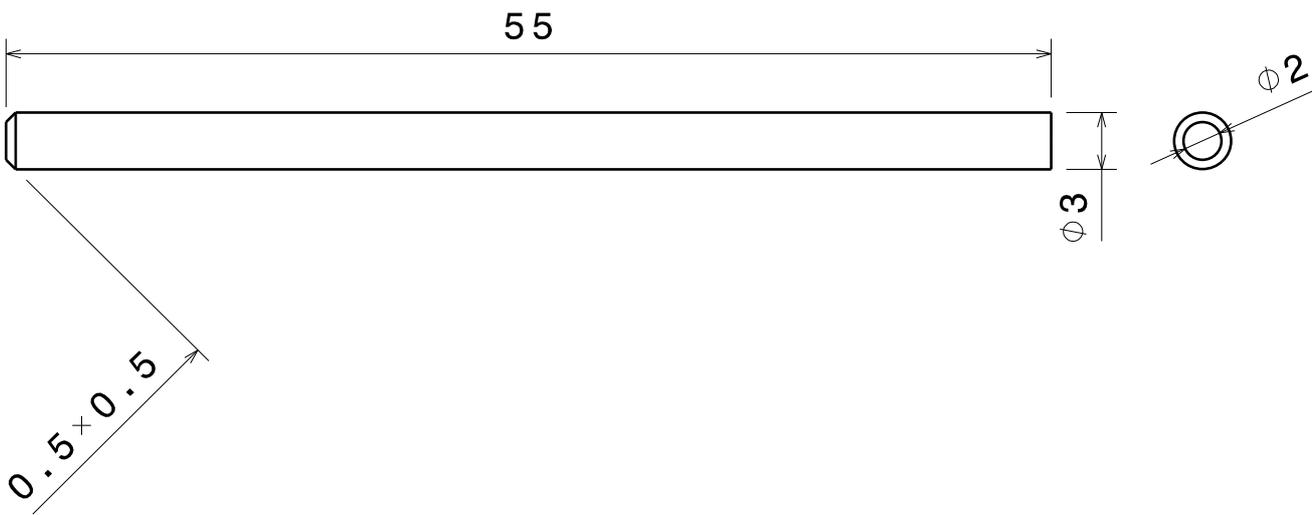
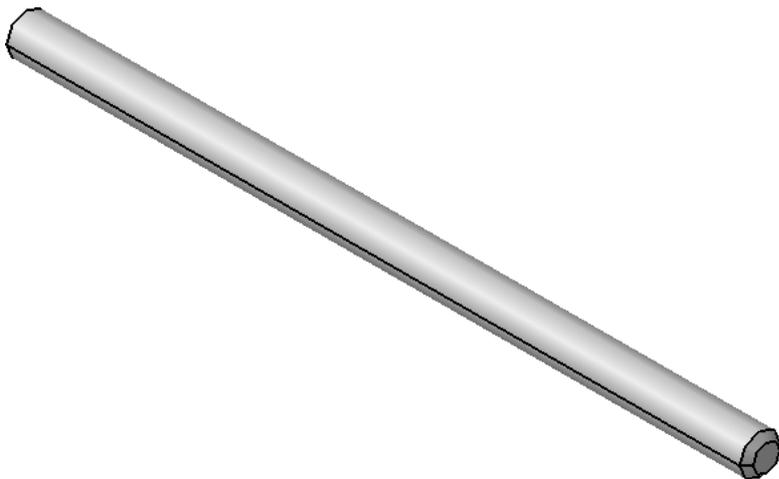
3

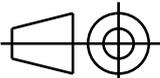
2

2

1

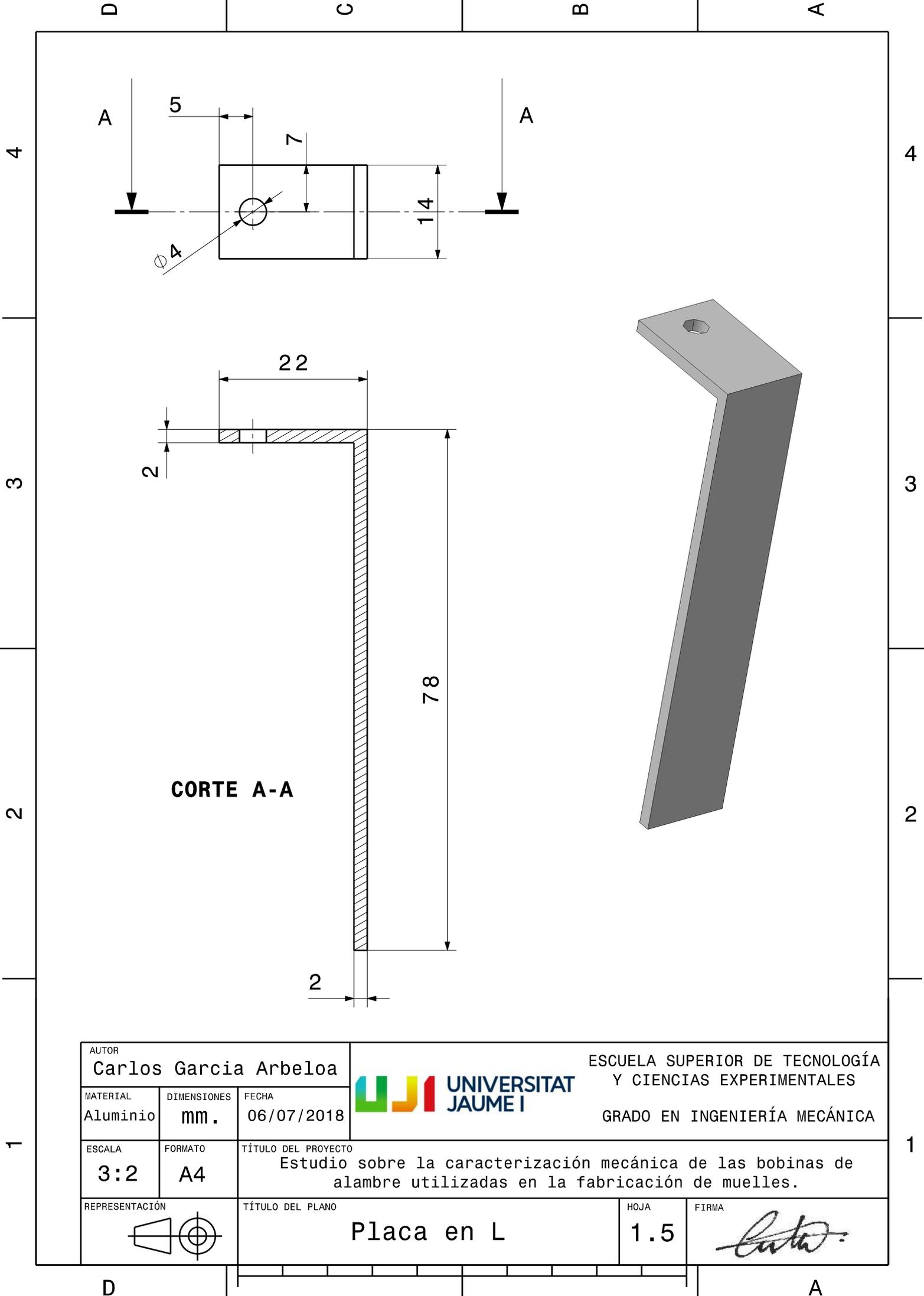
1



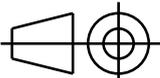
AUTOR Carlos Garcia Arbeloa		 UNIVERSITAT JAUME I		ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS EXPERIMENTALES	
MATERIAL 100Cr6	DIMENSIONES mm.			FECHA 06/07/2018	GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
ESCALA 5:2	FORMATO A4	TÍTULO DEL PROYECTO Estudio sobre la caracterización mecánica de las bobinas de alambre utilizadas en la fabricación de muelles.			
REPRESENTACIÓN 		TÍTULO DEL PLANO STUB D3x55		HOJA 1.4	FIRMA 

D

A

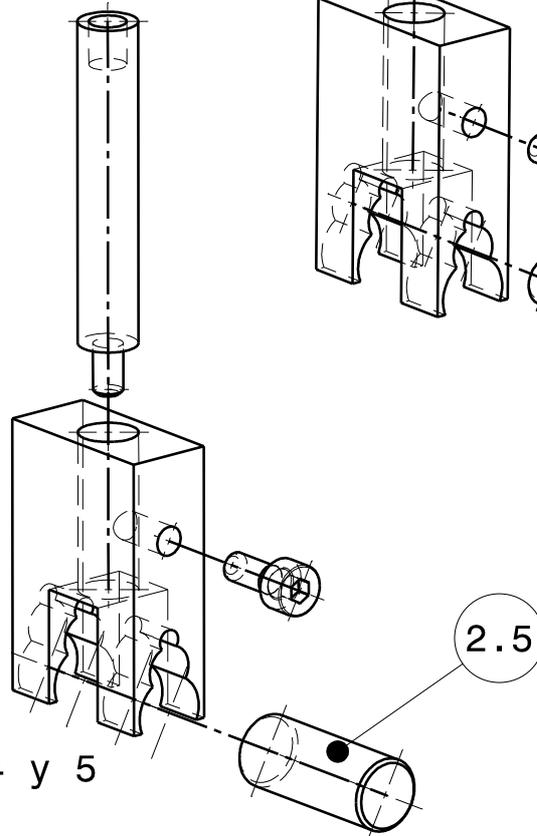
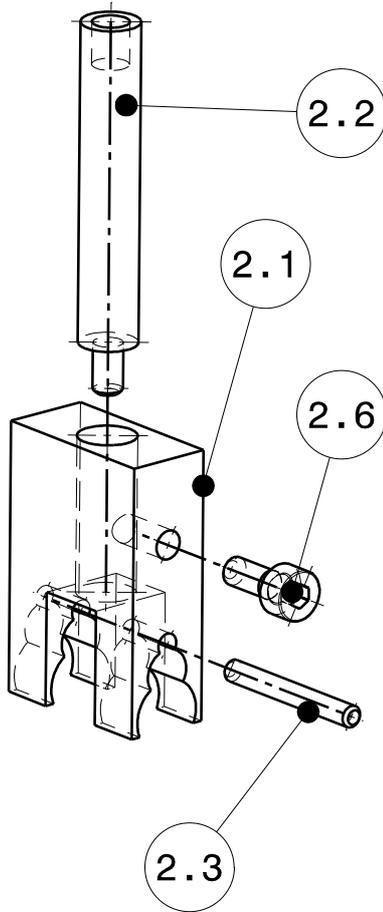


CORTE A-A

AUTOR Carlos Garcia Arbeloa		 UNIVERSITAT JAUME I		ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS EXPERIMENTALES	
MATERIAL Aluminio	DIMENSIONES mm.			FECHA 06/07/2018	GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
ESCALA 3:2	FORMATO A4	TÍTULO DEL PROYECTO Estudio sobre la caracterización mecánica de las bobinas de alambre utilizadas en la fabricación de muelles.			
REPRESENTACIÓN 		TÍTULO DEL PLANO Placa en L		HOJA 1.5	FIRMA 

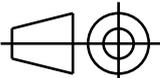
Montaje para nivel 1

Montaje para nivel 2



Montaje para niveles 3, 4 y 5

1	2.6	Tornillo ISO 4762 M4x10		Acero
1	2.5	STUB D10x25	2.5	100Cr6
1	2.4	STUB D6.5x25	2.4	100Cr6
1	2.3	STUB D3x25	2.3	100Cr6
1	2.2	Eje del dinamómetro	2.2	Acero
1	2.1	Aplicador de fuerza	2.1	Acero
Nº de piezas	Marca	Designación	Plano	Material

AUTOR Carlos Garcia Arbeloa		 UNIVERSITAT JAUME I ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS EXPERIMENTALES GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA		
MATERIAL	DIMENSIONES mm.			
ESCALA 1:1	FORMATO A4	TÍTULO DEL PROYECTO Estudio sobre la caracterización mecánica de las bobinas de alambre utilizadas en la fabricación de muelles.		
REPRESENTACIÓN 	TÍTULO DEL PLANO Subconjunto 2: Ensablaje del elemento aplicador de carga		HOJA 2	FIRMA 

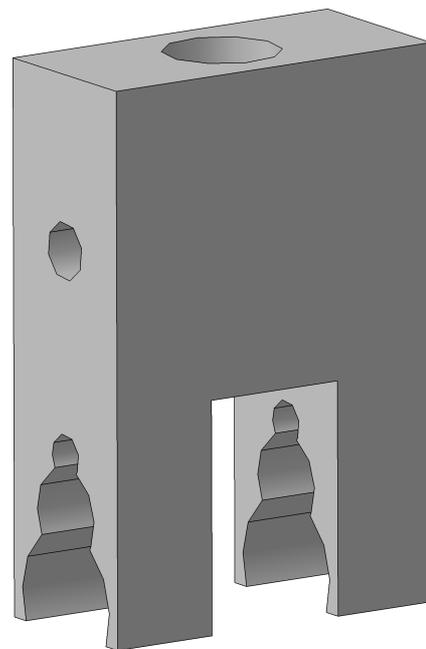
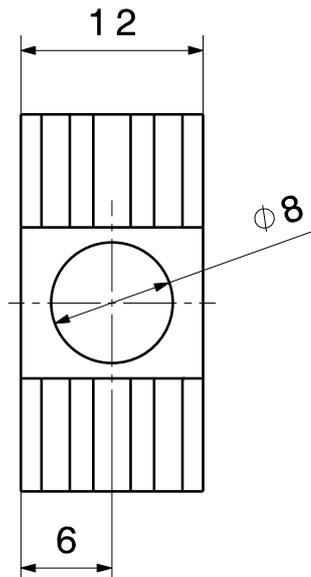
D

C

B

A

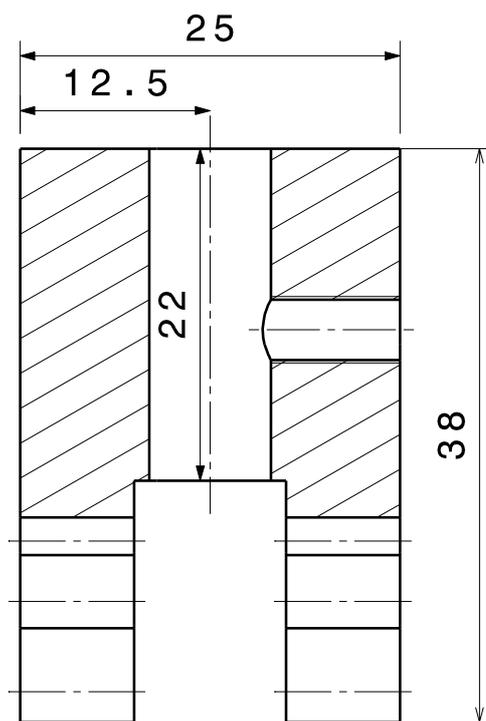
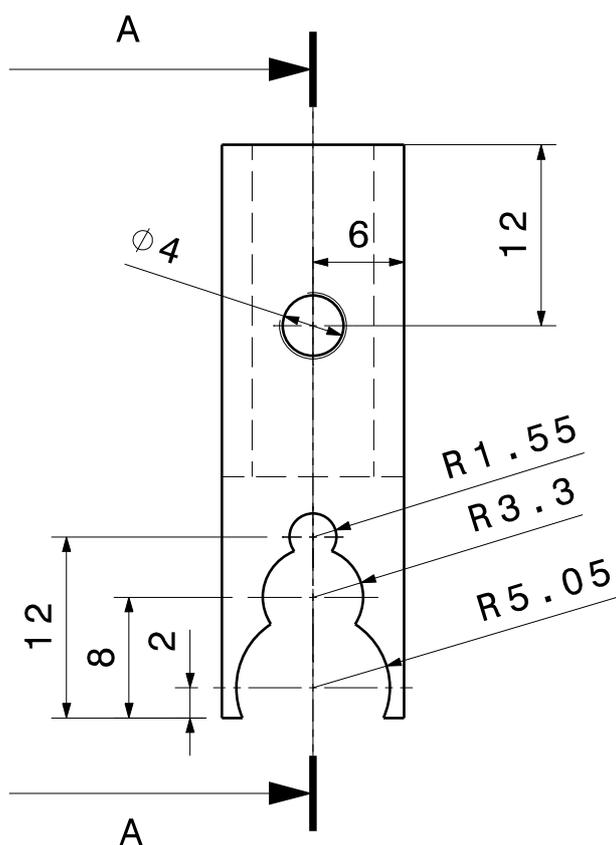
4



4

3

3



CORTE A-A

2

2

2

1

1

AUTOR Carlos Garcia Arbeloa		ESCUOLA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS EXPERIMENTALES	
MATERIAL Acero	DIMENSIONES mm.	FECHA 06/07/2018	UNIVERSITAT JAUME I GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
ESCALA 2:1	FORMATO A4	TÍTULO DEL PROYECTO Estudio sobre la caracterización mecánica de las bobinas de alambre utilizadas en la fabricación de muelles.	
REPRESENTACIÓN 	TÍTULO DEL PLANO Aplicador de esfuerzo	HOJA 2.1	FIRMA

D

A

D

C

B

A

4

4

3

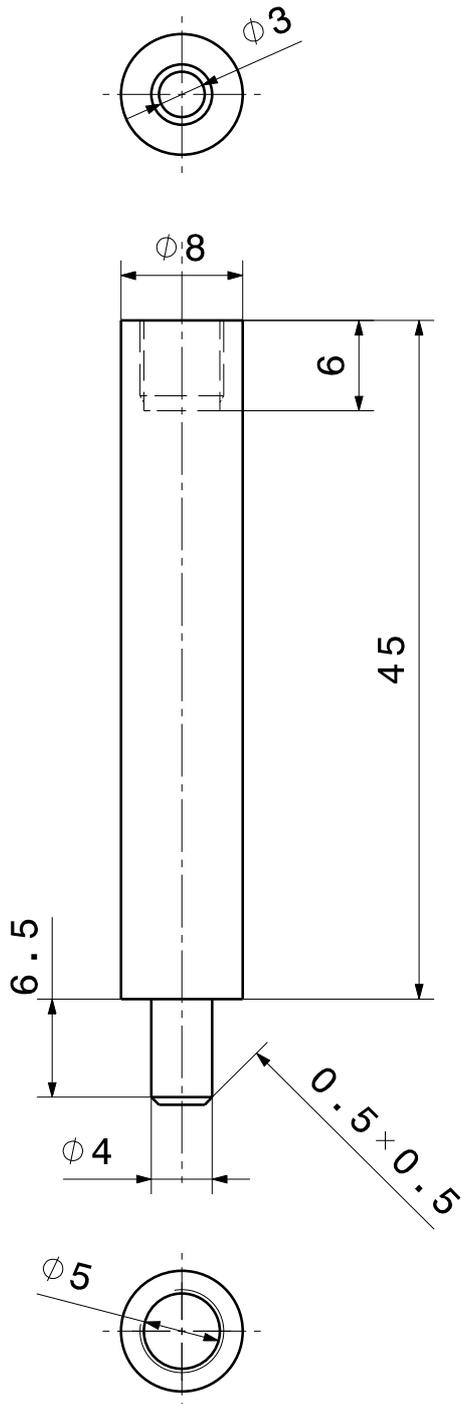
3

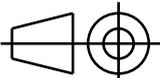
2

2

1

1



AUTOR Carlos Garcia Arbeloa		 UNIVERSITAT JAUME I		ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS EXPERIMENTALES	
MATERIAL Acero	DIMENSIONES mm.			FECHA 06/07/2018	GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
ESCALA 2:1	FORMATO A4	TÍTULO DEL PROYECTO Estudio sobre la caracterización mecánica de las bobinas de alambre utilizadas en la fabricación de muelles.			
REPRESENTACIÓN 		TÍTULO DEL PLANO Eje del dinamómetro		HOJA 2.2	FIRMA 

D

A

D

C

B

A

4

4

3

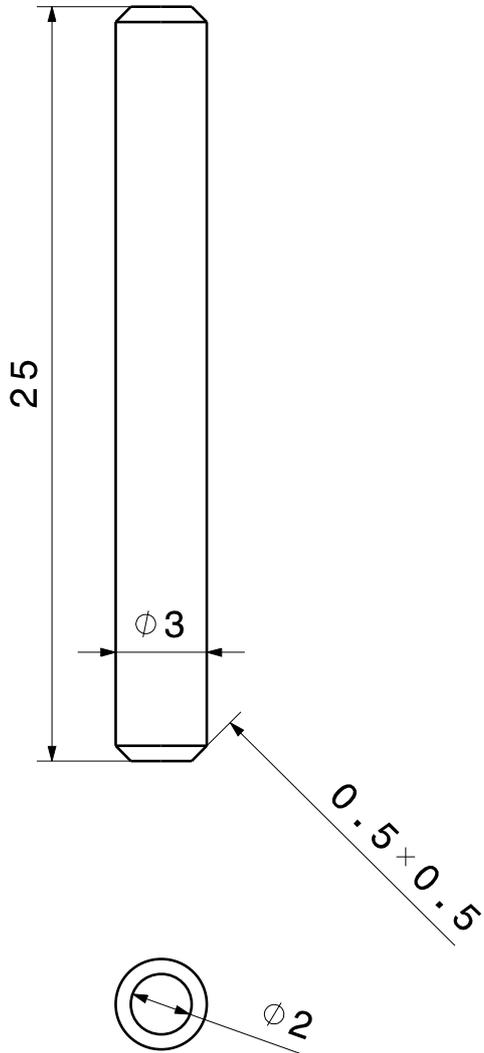
3

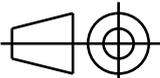
2

2

1

1



AUTOR Carlos Garcia Arbeloa		 UNIVERSITAT JAUME I		ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS EXPERIMENTALES	
MATERIAL 100Cr6	DIMENSIONES mm.			FECHA 06/07/2018	GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
ESCALA 4:1	FORMATO A4	TÍTULO DEL PROYECTO Estudio sobre la caracterización mecánica de las bobinas de alambre utilizadas en la fabricación de muelles.			
REPRESENTACIÓN 		TÍTULO DEL PLANO STUB D3x25		HOJA 2.3	FIRMA 

D

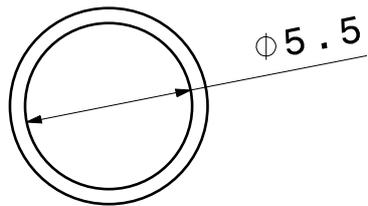
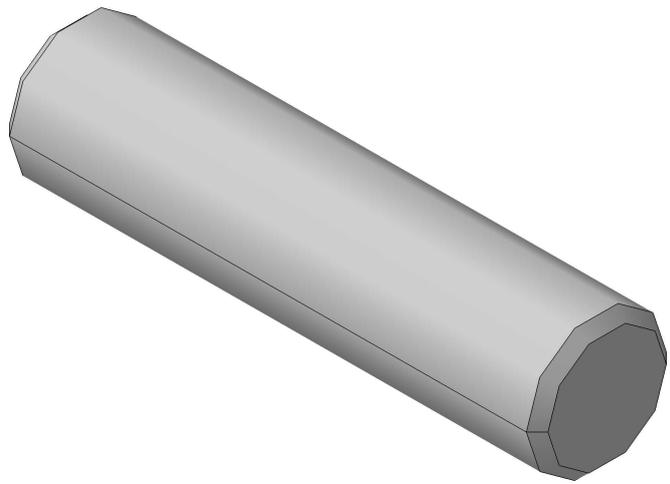
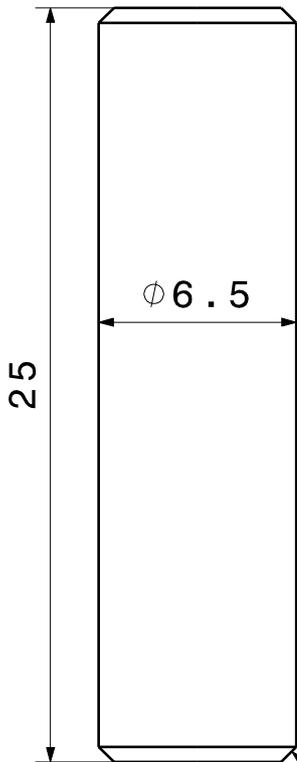
A

D

C

B

A



4

4

3

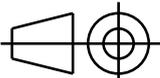
3

2

2

1

1

AUTOR Carlos Garcia Arbeloa		 UNIVERSITAT JAUME I		ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS EXPERIMENTALES	
MATERIAL 100Cr6	DIMENSIONES mm.			FECHA 06/07/2018	GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
ESCALA 4:1	FORMATO A4	TÍTULO DEL PROYECTO Estudio sobre la caracterización mecánica de las bobinas de alambre utilizadas en la fabricación de muelles.			
REPRESENTACIÓN 		TÍTULO DEL PLANO STUB D6.5x25		HOJA 2.4	FIRMA 

D

A

D

C

B

A

4

4

3

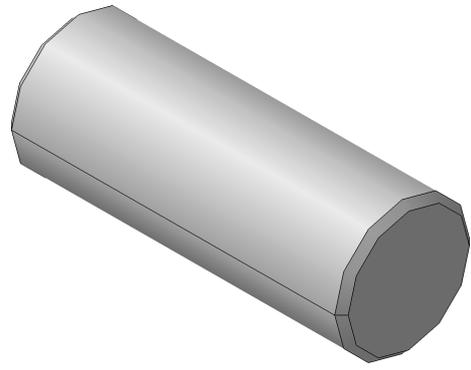
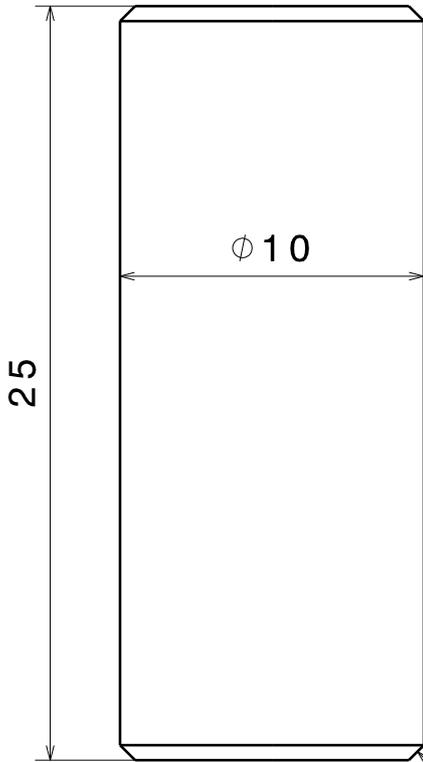
3

2

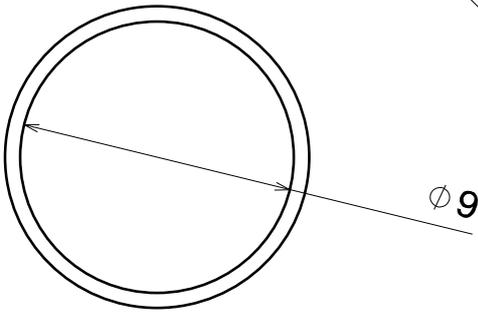
2

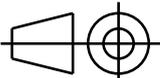
1

1



0.5x0.5



AUTOR Carlos Garcia Arbeloa		 UNIVERSITAT JAUME I		ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS EXPERIMENTALES	
MATERIAL 100Cr6	DIMENSIONES mm.			FECHA 06/07/2018	GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
ESCALA 4:1	FORMATO A4	TÍTULO DEL PROYECTO Estudio sobre la caracterización mecánica de las bobinas de alambre utilizadas en la fabricación de muelles.			
REPRESENTACIÓN 		TÍTULO DEL PLANO STUB D10x25		HOJA 2.5	FIRMA 

D

A

D

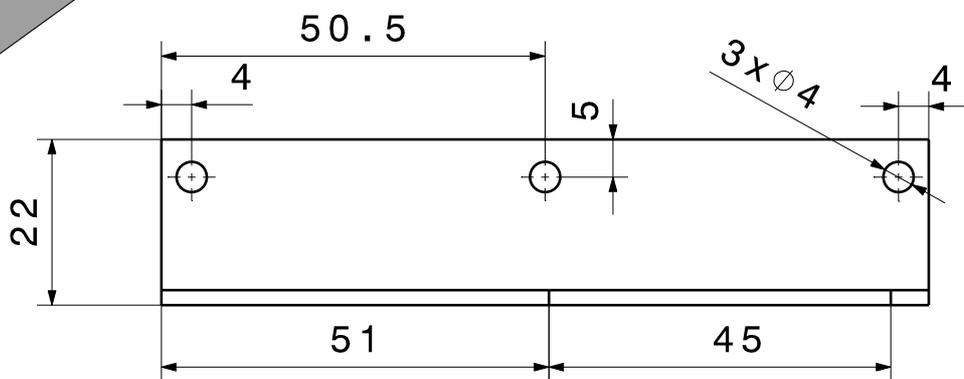
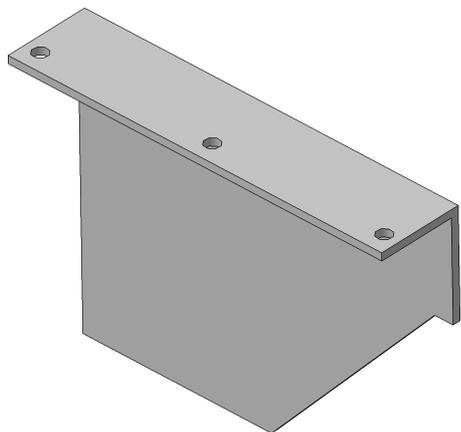
C

B

A

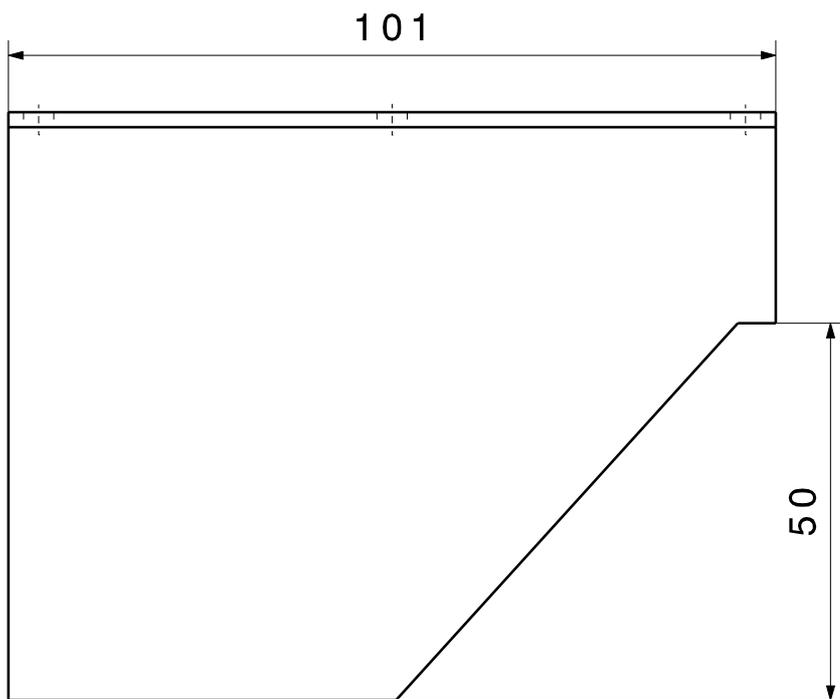
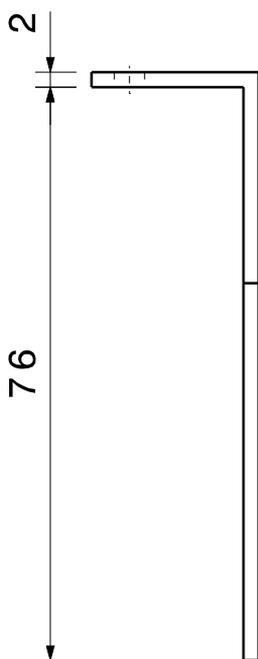
4

4



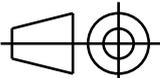
3

3



2

2

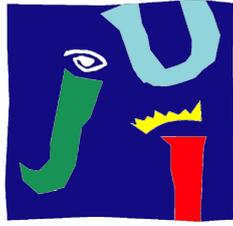
AUTOR Carlos Garcia Arbeloa		 UNIVERSITAT JAUME I		ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS EXPERIMENTALES	
MATERIAL PMMA	DIMENSIONES mm.			FECHA 06/07/2018	GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
ESCALA 1:1	FORMATO A4	TÍTULO DEL PROYECTO Estudio sobre la caracterización mecánica de las bobinas de alambre utilizadas en la fabricación de muelles.			
REPRESENTACIÓN 		TÍTULO DEL PLANO (Alternativa) Placa en L		HOJA 3	FIRMA 

1

1

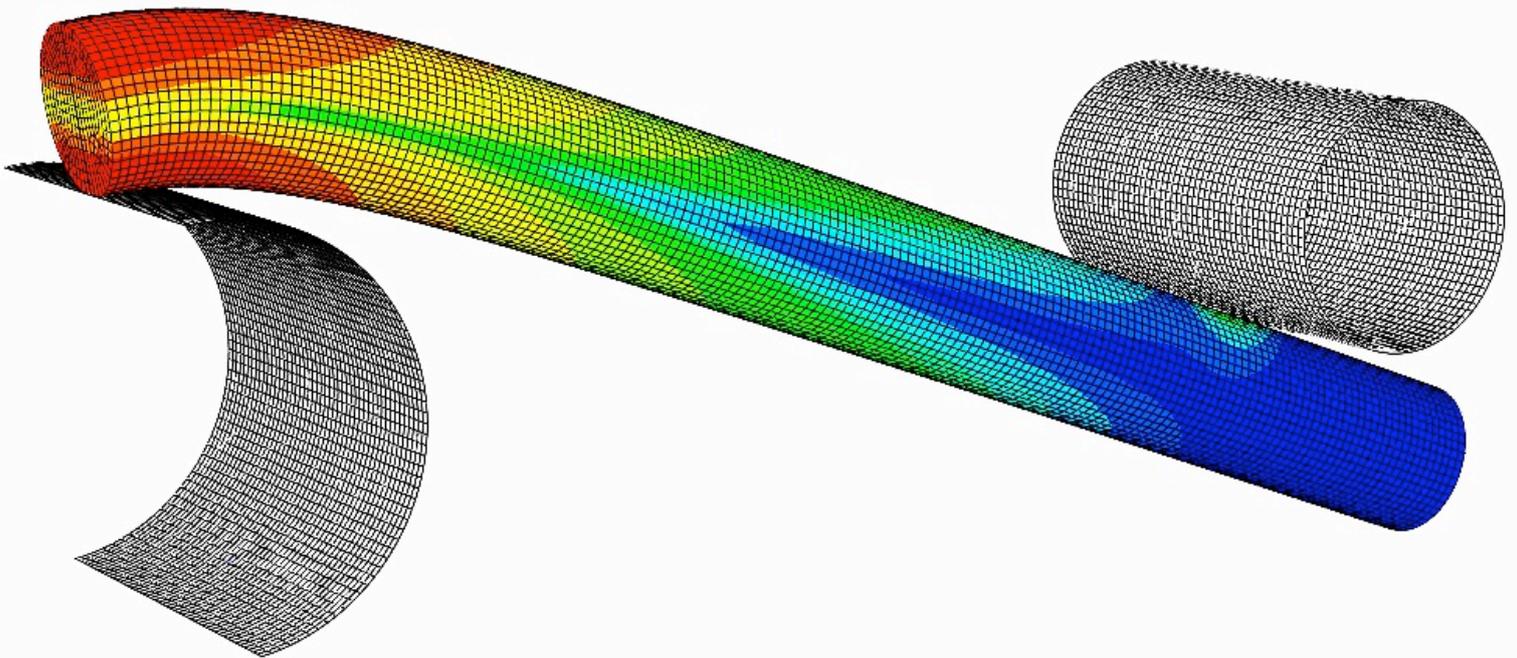
D

A



**UNIVERSITAT
JAUME·I**

***ESTUDIO SOBRE LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE
LAS BOBINAS DE ALAMBRE UTILIZADAS EN LA
FABRICACIÓN DE MUELLES***



Capítulo 4: PLIEGO DE CONDICIONES

Institut Clément Ader de Toulouse – Septiembre de 2018

➤ **Carlos García Arbeloa**

ÍNDICE DEL PLIEGO DE CONDICIONES

1	ALCANCE DEL PLIEGO DE CONDICIONES	165
2	CONDICIONES GENERALES DEL INSTITUTO	166
2.1	RESPONSABILIDAD	166
3	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE MATERIALES Y EQUIPOS.....	168
3.1	CONTROL DE CALIDAD	168
3.2	MATERIALES EMPLEADOS EN LA FABRICACIÓN	170
3.3	CONDICIONES DE MONTAJE Y EJECUCIÓN	173
4	CONDICIONES DE SEGURIDAD	174
4.1	ACCESO DEL PERSONAL AUTORIZADO AL INSTITUTO	174
4.2	HIGIENE DE LAS INSTALACIONES	174
4.3	PROTECCIÓN INTELECTUAL	174
4.4	INCUMPLIMIENTO DE LAS NORMAS	174
4.5	SANCIONES	175

1 ALCANCE DEL PLIEGO DE CONDICIONES

El pliego de condiciones que se presenta en este proyecto indica las relaciones que deben establecerse entre los estudiantes en periodo de prácticas y la institución de acogida. Por lo que el conocimiento de la información recogida en este capítulo es de vital importancia para que dichas relaciones sean lo más adecuadas posibles. Es necesario matizar que el pliego que se presenta en este capítulo es propio de un proyecto de investigación, con lo cual difiere de uno creado para un proyecto industrial de empresa en cuanto a los aspectos que se tratan.

Así pues, se detallan en este capítulo las normas establecidas por el Instituto Clément Ader para la organización y el procedimiento burocrático del laboratorio que ofrece. Seguidamente, se incluyen también las normas y especificaciones tanto técnicas, como de seguridad e higiene que deben respetarse durante el uso de las instalaciones del Instituto. Finalmente se presentan las especificaciones de los materiales empleados en la materialización del prototipo de ensayo de flexión a partir de la ficha técnica que ofrece el proveedor de los mismos.

2 CONDICIONES GENERALES DEL INSTITUTO

El laboratorio está dividido en función de los grupos principales de investigación:

- Grupo MSC: Materiales y Estructuras Compuestas (*Matériaux et Structures Composites*).
- Grupo SUMO: Superficie, Fabricación, Materiales y Herramientas (*Surface, Usinage, Matériaux et Outillages*).
- Grupo MS2M: Modelización de Sistemas y Microsistemas Mecánicos (*Modélisation des Systèmes et Microsystèmes Mécaniques*).
- Grupo MICS: Metrología, Identificación, Control e Inspección (*Métrologie, Identification, Contrôle et Surveillance*).

La organización del Instituto cuenta con la ayuda de un equipo de apoyo administrativo y técnico denominado grupo ESTA. La dirección del instituto está compuesta de un director y dos directores adjuntos, los cuales pertenecen a entidades que representan a los tres ministerios de tutela. Estos, están representados por un equipo que gestiona el día a día del Instituto y aplica su política científica con la ayuda de un comité de dirección y un consejo de laboratorio. Los investigadores que forman parte del ICA de Toulouse, son a su vez profesores pertenecientes a cuatro grandes establecimientos asociados, tales como la UPS y el INSA pertenecientes al Ministerio de Enseñanza Superior de Investigación, la ISAE perteneciente al Ministerio de Defensa y Mines Albi perteneciente al Ministerio de Industria. A su vez, el personal que forma parte del ICA está repartido entre los tres lugares geográficos de la región de Midi-Pyrénées mencionados anteriormente (Albi, Tarbes y Toulouse).

Por otra parte, el equipo compuesto por el personal administrativo, técnicos e ingenieros está organizado en tres grupos, uno por cada ministerio. Finalmente, cada grupo de investigación existente reúne al personal de cada institución, independientemente de su situación geográfica.

2.1 Responsabilidad

La responsabilidad de cada grupo de investigación recae en los directores de los mismos que se encargan de velar por que se cumplan las normas básicas establecidas para el uso del laboratorio y de asegurar el correcto estado de los dispositivos empleados reponiendo los componentes dañados durante su uso. El laboratorio del grupo MS2M está equipado con diversas máquinas y dispositivos que, según su complejidad de uso, su manipulación está más o menos restringida. Es decir, la manipulación de las máquinas con las que cuenta el laboratorio está condicionada por el grado de preparación académica y técnica que estas requieren por parte del operario. En este proyecto, el encargado de manipular del banco de ensayos empleado durante los ensayos experimentales sobre los alambres provistos debe estar cursando o haber cursado cualquiera de las preparaciones citadas a continuación:

- Grado en Ingeniería Industrial.
- Grado en Ingeniería Mecánica.
- Máster de investigación en Ensayos Mecánicos.
- Máster de investigación en Resistencia y Elasticidad de Materiales.
- Máster de investigación en Modelización Mecánica Avanzada.

Además, el director de cada proyecto de investigación debe promover el desarrollo del mismo y asegurarse que el proyectista cumple con los plazos y los objetivos establecidos inicialmente.

3 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE MATERIALES Y EQUIPOS

3.1 Control de calidad

Asegurar la calidad tanto de las piezas que componen el mecanismo de ensayos como del equipo empleado para su fabricación es primordial para asegurar una buena fiabilidad de los resultados finales obtenidos. Aumentando este control se disminuye el error sistemático potencial que pueda producirse durante los ensayos, además de evitar en gran medida posibles rupturas y por consiguiente un aumento de presupuesto del proyecto que conlleva la reparación de los componentes dañados. Por ello se plantean ciertas pautas a seguir que velan por la calidad del prototipo diseñado:

- Los equipos de medición y materiales pueden reutilizarse de otros proyectos anteriores siempre y cuando se asegure el buen funcionamiento de los mismos y no se aprecien defectos graves de desgaste que pongan en peligro la funcionalidad del producto, como grietas, deformaciones o impactos.
- Se lleva a cabo la calibración de los equipos electrónicos empleados antes de su utilización con el fin de obtener una lectura correcta de los datos obtenidos.
- Los instrumentos eléctricos deben estar convenientemente conectados a la red eléctrica de alimentación.
- La manipulación del dinamómetro *Centor Easy* debe realizarse con delicadeza teniendo en cuenta que el límite de fuerza que puede alcanzar el sensor es de 500 Newtons. Si la fuerza registrada aplicada sobre el alambre se acerca a dicho valor se debe detener inmediatamente el ensayo. Posteriormente se procede al reajuste de la distancia establecida entre los apoyos a partir de la cual no se supere el límite de fuerza aplicada sobre el alambre establecido por el dinamómetro.
- Las averías en los dispositivos electrónicos y las piezas defectuosas que puedan presentarse se notifican al responsable del proyecto para evaluar los daños ocasionados y proceder a su sustitución. En ningún momento se deben hacer reparaciones sobre estos componentes si no se trata del ingeniero técnico o de un especialista asociado al proyecto.
- No operar con los dispositivos eléctricos si están mojados, húmedos o si existe riesgo de cortocircuito.
- Todo fallo o anomalía presentada debe ser notificada al director de proyecto o a los ingenieros técnicos del equipo de investigación al que se relaciona el proyecto.
- Se deben utilizar las herramientas mecánicas adecuadas para cada tarea establecida. Éstas han permanecer siempre dentro del taller y notificar su utilización al responsable de materiales y herramientas. Una vez finalizada la tarea se deben depositar en el mismo lugar de donde se extrajeron, notificando al responsable del taller su desgaste severo o daño provocado si se diese el caso.
- Han de seguirse en todo momento las normas de seguridad y control del taller, tanto si se está realizando una operación mecánica o no.

- El uso de los dispositivos electrónicos o mecánicos más complejos y delicados se lleva a cabo bajo la presencia de un ingeniero técnico especializado en su manipulación.

3.2 Materiales empleados en la fabricación

Los materiales a partir de los cuales se conforman las piezas del mecanismo de ensayo de flexión diseñado están indicados en los planos explicativos de cada una de ellas.

- El acero empleado para la fabricación de las piezas masivas y del elemento acoplado al dinamómetro se trata de un acero de uso general (acero de construcción no aleado, soldable) sin requerimiento de una calidad extraordinaria. La ficha técnica de este material se expone en la página siguiente.
- Las placas en L, puesto que no existen fuerzas importantes que las soliciten durante el desarrollo del ensayo de flexión, cabe la posibilidad de escoger el metacrilato por su transparencia o el aluminio. Sin embargo, prepondera el uso del aluminio en este caso debido a que la manipulación del mismo es más efectiva. Es más complicado doblar el metacrilato con un ángulo exacto de 90° ya que después de calentar la pieza, doblarla y dejarla enfriar, el material puede volver un poco a su estado original aumentando el grado de la doblez generada. Por ello, se prefiere el aluminio ya que, a pesar de ser más caro, requiere menor cantidad de operaciones a la hora de obtener la forma de la pieza deseada.
- Finalmente, los elementos más delicados y que por lo tanto necesitan una mayor precisión a la hora de escoger su material es el de los cilindros finos que actúan de apoyos para el alambre en el ensayo. La elección del material para estas piezas requiere de mayor estudio puesto que son los elementos más solicitados y por lo tanto más propensos a sufrir deformaciones. Por lo tanto, se emplea el acero rectificado STUB (100cR6), un acero con una alta resistencia a las deformaciones y a la rotura. Su ficha técnica obtenida del catálogo de la empresa francesa proveedora *MDS (Metaux Detail Services)* se precisa a continuación.



S355
J2+N, J0, JR...

St52-3U
E36

1.0577
1.0553
1.0045



Análisis químico (% en masa)

	C	Si	Mn	P	S	Al
Análisis de Referencia	< = 0,20	< = 0,55	< = 1,60	< = 0,035	< = 0.035	< = 0.020

Tipo de acero

Acero de construcción no aleado, soldable.

Aplicación

Uso corriente en mecánica general y en construcción de máquinas especiales. Bastidor de la máquina. Piezas oxicortadas, placas de asiento de la herramienta.

Estado de entrega

Bruto aserrado u oxicortado; premecanizado
Rm 490-630 Mpa

Documento no contractual. Edición del 01 de Septiembre de 2014

DEVILLE RECTIFICATION
Z.I Desforanges
Boite postale 3
F-43330 Pont-Salomon

Tél :+ 33 (0)4 71 66 29 71
Fax :+ 33 (0)4 71 66 29 72
Com@deville-rectif.com
www.deville-rectif.com



100 C6

AFNOR	AISI	NF A 35-590
100 C6	52100	100 Cr 6

Composition chimique en %

C	Cr	S	Mn	P	Si
0,95-1,05	1,35-1,60	≤ 0,015	0,25-0,45	≤ 0,025	0,15-0,35

Propriétés

Acier à outils allié pour le travail à froid résistant à l'usure et à la fatigue, assez sensible aux chocs. Bonne ténacité et faible déformation après trempe (dans la masse ou superficielle par induction). Acier pour roulements trempant à l'huile. Dureté superficielle après trempe et revenu = 62-63 HRC assurant une bonne résistance à l'usure.

Domaines d'application

Très utilisé en mécanique d'outillage : goupilles, poinçons, roulements, colonnes de guidage, limes, forêts, alésoirs

Caractéristiques mécaniques moyennes (état normalisé adouci)

Rm N/mm ²	Re N/mm ²	A %	Dureté HB
700 / 800			217

Soudage

Soudabilité déconseillée

Livraison

Ronds rectifiés h7 (genre « stub »)
Ronds étirés ou laminés,
Tubes

3.3 Condiciones de montaje y ejecución

Una vez dimensionado y diseñado el dispositivo de ensayo, los planos tienen que ser revisados y aprobados por el director de proyecto y el responsable de la sección de fabricación del Instituto Clément Ader. Del mismo modo, cualquier modificación que se realice sobre los planos debe ser puesta bajo revisión antes de dar paso a la fabricación de las piezas.

Posteriormente, el proceso de ensamblaje debe de llevarse a cabo por dos personas necesariamente, ya que una de ellas supervisa el trabajo de la segunda. La adición de una tercera persona empeoraría la maniobrabilidad del resto provocando errores que conllevan a la pérdida de la funcionalidad del mecanismo global. La responsabilidad de la supervisión del trabajo del encargado del ensamblaje debe recaer en el doctor jefe del proyecto o el ingeniero técnico responsable del laboratorio.

4 CONDICIONES DE SEGURIDAD

4.1 Acceso del personal autorizado al Instituto

Las instalaciones y las máquinas de las que dispone el Instituto Clément Ader son de uso exclusivo para sus investigadores contratados. Por ello, es necesario tener en todo momento la acreditación que además de servir de identificación personal, es necesaria para tener acceso a los distintos laboratorios. Por ello, cada trabajador tiene acceso a las áreas propias del grupo de investigación al que pertenece (despachos y laboratorios), además de las zonas comunes.

Por otro lado, queda terminantemente prohibida el acceso a las instalaciones a personas ajenas al Instituto y el de un investigador a un laboratorio asociado a un equipo de investigación distinto al suyo propio.

4.2 Higiene de las instalaciones

En cuanto a los objetos cuya introducción en los diferentes laboratorios no están permitidos, el Instituto sigue una restricción muy severa. Queda prohibida la entrada de comida, bebida o cualquier otro producto que pueda plantear daños potenciales a los equipos del laboratorio. La zona de trabajo debe de permanecer siempre libre de polvo o virutas metálicas, por ello, inmediatamente después de cualquier proceso mecánico se debe limpiar la máquina o herramientas y zona de trabajo utilizada.

Queda terminantemente prohibido por ley fumar en las instalaciones del Instituto, exceptuando las zonas habilitadas para tal fin.

4.3 Protección intelectual

Está prohibido el uso de teléfonos móviles para evitar las posibles filmaciones o fotografías del montaje experimental que pongan en peligro la protección intelectual de las investigaciones realizadas. Únicamente con el consentimiento y bajo la supervisión del director de proyecto se pueden realizar fotografías con el fin de documentar el proyecto, de esta manera se evitan las posibles filtraciones de información o las acciones de espionaje industrial.

4.4 Incumplimiento de las normas

El no cumplimiento de las normas marcadas por el Instituto se clasifican en función de su gravedad. Estas faltas conllevan diferentes sanciones en relación al peligro que supone el incumplimiento de las normas.

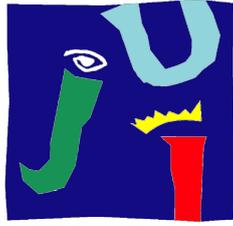
- **Faltas de gravedad leve:**
 - Utilización indebida del teléfono móvil dentro del laboratorio.
 - No informar de algún incidente o rotura provocada sobre los equipos o máquinas del laboratorio durante su utilización.
 - Utilización indebida de las herramientas o instrumentos electrónicos.
 - Ausencia de espíritu de trabajo dentro de la comunidad científica del Instituto.
 - No llevar la protección personal requerida (bata, gafas y guantes protectores) durante la presencia en el laboratorio.

- Realizar operaciones de dificultad superior a nuestra preparación académica y técnica sin la supervisión de un especialista.
- **Faltas de gravedad media:**
 - Rotura de los equipos más delicados e importantes por el uso indebido de los mismos.
 - Divulgación no autorizada sobre el desarrollo y avances del proyecto de investigación.
 - La introducción de comida, bebida o fumar en las zonas no habilitadas para ello.
 - La desobediencia de las normas de uso de las instalaciones y de los campos de investigación a desarrollar.
 - Incumplimiento del horario establecido en el contrato de trabajo.
 - El encubrimiento de una falta de gravedad alta, media o leve.
 - La reiteración de la práctica de una o varias faltas de gravedad leve.
- **Faltas de gravedad alta:**
 - Agresión física o psíquica al resto de trabajadores del Instituto.
 - Robo de cualquier objeto propio del Instituto o de los trabajadores.
 - El consumo o la introducción de drogas dentro de las instalaciones.
 - La práctica reiterada de una o varias faltas de gravedad media o alta.
 - El encubrimiento de la realización de una falta de gravedad alta.
 - Cualquier delito contra el Instituto Cleément Ader.
 - Provocar un accidente que afecte al resto de trabajadores del Instituto por el uso indebido de los equipos de los que se dispone.
 - Provocar daños estructurales a la propiedad de manera intencionada o por un descuido personal.

4.5 Sanciones

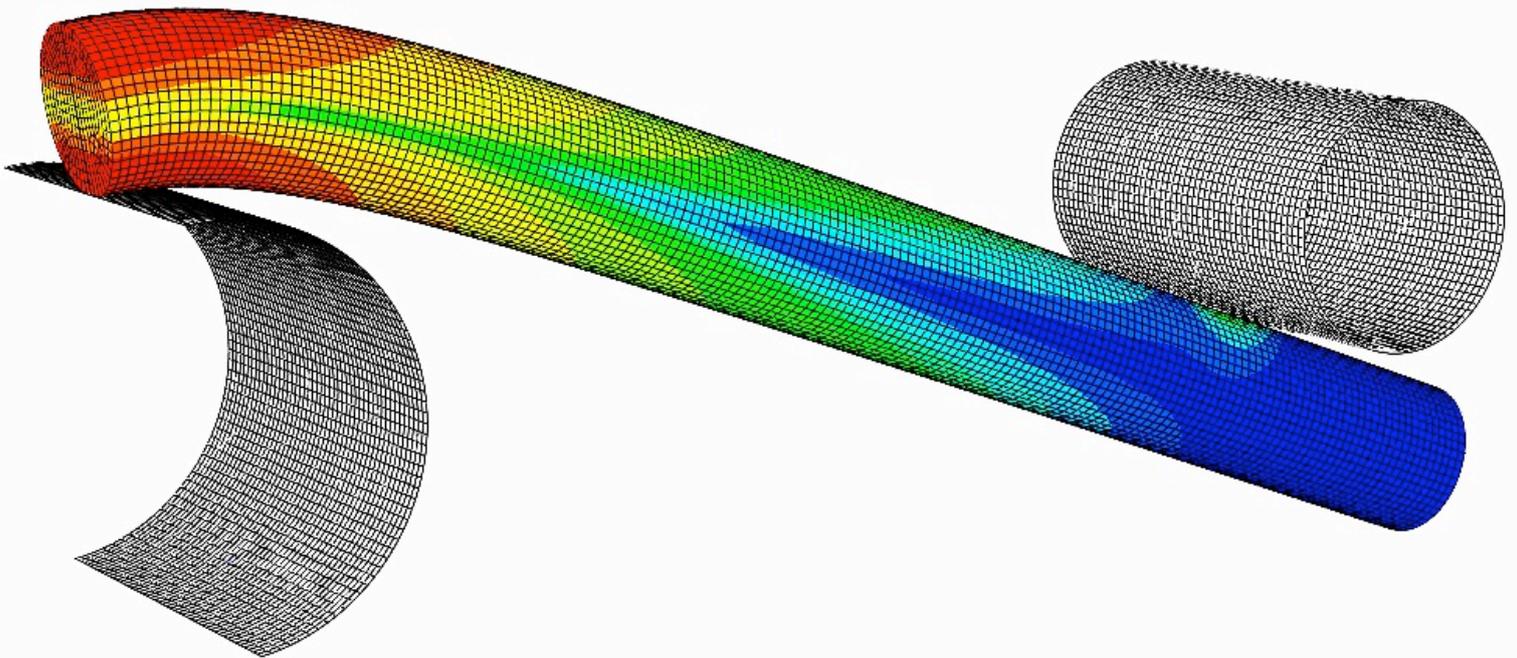
Las infracciones cometidas durante la realización del proyecto y que por lo tanto afectan negativamente al Instituto se penalizan en función de la gravedad o peligrosidad que estas suponen.

- **Faltas de gravedad leve:** Aviso por escrito al empleado implicado explicándole las consecuencias de reiterar frecuentemente las faltas cometidas por muy leves que sean (expulsión y rescisión del contrato).
- **Faltas de gravedad media:** Aviso por escrito a la persona o personas implicadas y control posterior de los mismos por si la mala praxis de su actividad en el centro se reitera, lo que conllevaría a la expulsión y rescisión de su contrato con en Instituto.
- **Faltas de gravedad alta:** Expulsión inmediata del Instituto con rescisión del contrato.



**UNIVERSITAT
JAUME·I**

***ESTUDIO SOBRE LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE
LAS BOBINAS DE ALAMBRE UTILIZADAS EN LA
FABRICACIÓN DE MUELLES***



Capítulo 5: MEDICIONES Y PRESUPUESTO

Institut Clément Ader de Toulouse – Septiembre de 2018

➤ **Carlos García Arbeloa**

ÍNDICE DE LAS MEDICIONES Y EL PRESUPUESTO

1 ESTADO DE MEDICIONES.....	181
1.1 EQUIPOS.....	181
1.2 MATERIALES.....	181
1.3 ACCESORIOS.....	181
2 PRESUPUESTO DEL PROYECTO.....	182
2.1 PRESUPUESTO POR PARTIDAS.....	182
2.2 PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL.....	183
2.3 PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA.....	183
2.3.1 <i>Gastos generales</i>	183
2.3.2 <i>Beneficio industrial</i>	183
2.3.3 <i>Presupuesto de ejecución por contrata parcial</i>	183
2.3.4 <i>Presupuesto de ejecución por contrata</i>	184
3 VIABILIDAD ECONÓMICA.....	185
4 ESTUDIO ECONÓMICO.....	186
4.1 RENTABILIDAD ANUAL.....	186
4.2 PERIODO DE RETORNO (PAY-BACK).....	186

1 ESTADO DE MEDICIONES

En este documento se especifican las unidades que componen el total del diseño desarrollado que garantiza el correcto funcionamiento de la alternativa de mecanismo de ensayo de flexión escogida en el presente proyecto.

El montaje del prototipo completo se divide en las siguientes partidas:

1.1 Equipos

Cantidad	Unidades	Descripción
1	uds.	Dinamómetro CENTOR EASY modelo CNR EA 500 (Andilog Technologies)
1	uds.	Banco de ensayos BAT 1000R (Andilog Technologies)

1.2 Materiales

Cantidad	Dimensiones	Unidades	Descripción
1	200x100x2	mm.	Plancha de aluminio liso 5,60 euros IVA incluido
1	240x180x100	mm.	Bloque de acero de uso general 74,63 euros con IVA
1	50x50x1,5	mm.	Bloque de acero de uso general 18,53 IVA incluido
1	∅3x500	mm.	Varillas de acero rectificado STUB 100Cr6
1	∅6,5x500	mm.	Varillas de acero rectificado STUB 100Cr6
1	∅10x500	mm.	Varillas de acero rectificado STUB 100Cr6

1.3 Accesorios

Cantidad	Dimensiones	Unidades	Descripción
2	M4x30	mm.	Tornillo ISO 4762
1	M5x20	mm.	Tornillo ISO 4762
3	M4x10	mm.	Tornillo ISO 4762

Peso total del mecanismo de ensayo diseñado	23,11 Kg
--	----------

2 PRESUPUESTO DEL PROYECTO

2.1 Presupuesto por partidas

- **Equipos:**

Cantidad	Unidades	Descripción	Valor
1	uds.	Dinamómetro CENTOR EASY modelo CNR EA 500 (Andilog Technologies)	850,00 €
1	uds.	Banco de ensayos BAT 1000R (Andilog Technologies)	1.600,00 €

- **Materiales:**

Cantidad	Dimensiones	Unidades	Descripción	Valor
1	200x100x2	mm.	Plancha de aluminio liso	5,60 €
1	240x180x100	mm.	Bloque de acero de uso general	74,63 €
1	50x50x1,5	mm.	Bloque de acero de uso general	18,53 €
1	∅3x500	mm.	Varillas de acero rectificado STUB 100Cr6	3,84 €
1	∅6,5x500	mm.	Varillas de acero rectificado STUB 100Cr6	6,18 €
1	∅10x500	mm.	Varillas de acero rectificado STUB 100Cr6	10,8 €

- **Accesorios:**

Cantidad	Dimensiones	Unidades	Descripción	Valor
2	M4x30	mm.	Tornillo ISO 4762	0,16 €
1	M5x20	mm.	Tornillo ISO 4762	0,10 €
3	M4x10	mm.	Tornillo ISO 4762	0,18 €

2.2 Presupuesto de ejecución material

Los pagos de la fabricación y obtención de piezas necesarias para el progreso del mecanismo de ensayo de flexión diseñado se realizan a cargo del director del proyecto, responsable de su desarrollo. El importe de la factura final se abona a partir de las becas recibidas por el Instituto, las cuales se ingresan en una cuenta común y la institución misma distribuye entre los grupos de investigación según las necesidades de sus proyectos y los intereses de investigación de la institución.

Para obtener el presupuesto de ejecución material del proyecto se debe tener en cuenta el coste de los equipos, accesorios y materiales junto con el coste relativo a la fabricación de las piezas que conforman el mecanismo de ensayo de flexión.

Equipos	2.450,00 €
Materiales	119,58 €
Accesorios	0,44 €
Mano de obra	126,81 €
Presupuesto de ejecución material	2.696,83 €

2.3 Presupuesto de ejecución por contrata

Tomando como ejemplo la existencia de un contrato hipotético con la empresa valenciana Muelles Castellano SL, el estudio del presupuesto final de la aplicación del proyecto desarrollado en la planta de fabricación de muelles de dicha empresa sería el detallado a continuación.

2.3.1 Gastos generales

Dirección del proyecto	1.200,00 €
Ingeniería	6.000,00 €
Otros (3%)	80,905 €
Total de gastos generales	7.280,905 €

2.3.2 Beneficio industrial

Beneficio industrial (6%)	161,81 €
----------------------------------	----------

2.3.3 Presupuesto de ejecución por contrata parcial

PEC Parcial = PEM + Gastos Generales + BI	10.139,545 €
--	--------------

2.3.4 Presupuesto de ejecución por contrata

PEC = PEC Parcial + IVA (21%)	12.268,85 €
--------------------------------------	-------------

Por lo tanto, el presupuesto final asciende a **DOCE MIL DOSCIENTOS SESENTA Y OCHO EUROS CON OCHENTA Y CINCO CÉNTIMOS (12.268,85 €)**.

3 VIABILIDAD ECONÓMICA

Con el fin de cuantificar la viabilidad económica y los beneficios que aportarían hipotéticamente a la empresa Muelles Castellano SL la introducción del modelo de estudio de los alambres recogido en este proyecto, se comparan los escenarios siguientes:

- Balance económico de la empresa: se trata del caso de partida, en el que se recogen los costes de producción de muelles por parte de la empresa. En este caso la producción se lleva a cabo sin aplicar de forma directa el ensayo de flexión sobre los alambres para estudiar sus características mecánicas exactas antes de dar comienzo al proceso de fabricación del muelle. Los datos recogidos en el balance son referentes a los resultados registrados por la empresa en 2016.
- Balance económico tras la introducción del dispositivo de ensayo de flexión en la planta de producción de muelles.

A continuación (Tabla 5.1) se presenta la tabla comparativa entre los costes de los dos escenarios. La situación final refleja el incremento de productividad de la empresa y la reducción de pérdidas económicas derivadas de la fabricación de resortes defectuosos.

	Producción sin estudio de los alambres	Producción con estudio de los alambres	ΔCOSTES CON APLICACIÓN DEL PROYECTO
Rentabilidad sobre recursos propios (%)	23,31	33,32	10,01
Rentabilidad sobre capital empleado (%)	20,63	29,82	9,19
Rentabilidad sobre el activo total (%)	8,97	12,78	3,81
Margen de beneficio (%)	5,89	10,89	5
Ingresos de explotación	1.791.022,00 €	1.970.124,20 €	179.102,20 €

Tabla 5.1. Balance comparativo de la productividad de la empresa Muelles Castellano SL.

Como se observa tras comparar ambos balances, el hecho de estudiar mecánicamente las bobinas de alambre antes del comienzo del proceso de fabricación de muelles provoca:

- Aumento de la productividad.
- Aumento de la cotización anual ligado a un mayor aprovechamiento del alambre.

Como conclusión al estudio de la viabilidad económica, la aplicación del proyecto desarrollado en la planta de producción de muelles de la empresa Muelles Castellano SL supone un ahorro anual de:

Ahorro anual	179.102,20 €
---------------------	--------------

4 ESTUDIO ECONÓMICO

Una vez estudiados los beneficios que se derivan de la implantación del estudio recogido en este proyecto en la planta de producción de muelles se desarrolla un estudio económico. Para ello se procede al cálculo de ciertos parámetros de rentabilidad de un proyecto:

1. Rentabilidad anual
2. Periodo de Retorno (PB)

4.1 Rentabilidad anual

El estudio de la rentabilidad que supone la implantación de este proyecto en la empresa Muelles Castellano S.L. de manera anual, se determina a partir de la siguiente expresión (4.1):

$$\text{Rentabilidad anual (\%)} = \frac{\text{Ingresos tras la inversión} - \text{Ingresos}_0}{\text{Ingresos}_0} \quad (4.1)$$

$$\text{Rentabilidad anual (\%)} = \frac{1.970.124,20 - 1.791.022,00}{1.791.022,00} = 10\% \quad (4.2)$$

4.2 Periodo de retorno (Pay-Back)

Se trata del tiempo que tarda en recuperarse la inversión realizada con el beneficio o ahorro anual estimado:

$$PB \text{ (años)} = \frac{\text{Inversión}}{\text{Ahorro anual}} = \frac{12.268,85}{179.102,20} < 1 \text{ año} \quad (4.3)$$

Finalmente, tras analizar los resultados de la rentabilidad anual, del periodo de retorno y del coste de fabricación del dispositivo de ensayo diseñado, se puede concluir que el proyecto es viable económicamente, destacando el corto periodo de retorno de la inversión realizada y el aumento considerable de la productividad de la planta de fabricación de la empresa.

