



Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Análisis experimental de deformaciones mediante video- extensometría.

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Autor: Ana Karima Guirao Salmán
Director: Manuel Santiago Torrano Martínez

Cartagena, Julio 2020



Universidad
Politécnica
de Cartagena

ÍNDICE

1. Introducción
2. Fundamentos de la extensometría
 - 2.1. Tipos de extensometría
 - 2.1.1. Extensómetros de contacto
 - 2.1.2. Extensómetros de no contacto
 - 2.2. Fundamentos teóricos de la extensometría
 - 2.2.1. Ensayo de tracción
 - 2.2.2. Diagrama tensión-deformación
3. Instrumentación y software
 - 3.1. Máquina de ensayos universal
 - 3.1.1. Máquina de ensayos electromecánicos Microtest EM2
 - 3.2. Videoextensómetro Microstest
 - 3.3. Software SMC 3000-95
 - 3.3.1. Módulos Software SMC
 - 3.3.2. Editor de secuencias
 - 3.4. Software VE-1200
 - 3.5. Preparación de probetas
4. Ensayos de tracción y programación de secuencias
 - 4.1. Materiales de ensayo
 - 4.2. Normativa de ensayos de tracción
 - 4.2.1. Ensayos de tracción con materiales metálicos. UNE-EN ISO 6892-1

4.2.2. Ensayos de tracción con cuerdas de fibra sintética. UNE-EN ISO 2307

4.3. Secuencias programadas

4.3.1. Secuencia de ensayo de tracción para materiales metálicos

4.3.2. Secuencia de ensayo de tracción para cuerdas sintéticas

5. Realización de ensayos

5.1. Ensayos con materiales metálicos

5.1.1. Preparación de probetas de acero

5.1.2. Control del videoextensómetro

5.1.3. Resultados de los ensayos

5.1.4. Tratamiento de datos

5.2. Ensayos con cuerdas sintéticas

5.2.1. Preparación de probetas de cuerda

5.2.2. Control del videoextensómetro

5.2.3. Resultados de los ensayos

5.2.4. Tratamiento de datos

6. Discusión de resultados

7. Conclusiones

8. Trabajos futuros

9. Bibliografía

1. Introducción

El cálculo, diseño y análisis de un componente o estructura en el campo de la ingeniería tiene como objetivo conseguir un modelo en el cual la distribución de tensiones en el material esté dentro de unos límites de seguridad establecidos para el mismo.

La resistencia de materiales estudia el comportamiento de los sólidos deformables cuando son sometidos a cargas, analizando la distribución de fuerzas en un elemento y la relación entre los esfuerzos y deformaciones en el mismo. Para el diseño mecánico de elementos con geometrías complejas, los modelos teóricos de resistencia de materiales se resuelven mediante métodos numéricos, como el método de los elementos finitos. A pesar de que ofrece resultados muy aproximados a la realidad, éste no deja de ser un método que ofrece resultados teóricos. Para el análisis experimental es necesario recurrir a otras técnicas.

La extensometría es una técnica para el análisis experimental de tensiones y deformaciones. En el presente trabajo, se va a estudiar la videoextensometría (o video-extensometría), un método de extensometría en el cual se utiliza una cámara de video para medir las deformaciones del material a estudiar.

Para la realización de este trabajo se ha utilizado la máquina de ensayos universal de 100 KN que el Departamento de Estructuras, construcción y expresión gráfica tiene en el ELDI de la UPCT. La máquina y el videoextensómetro fueron adquiridos de la empresa Microtest. Se han realizado diversos ensayos de tracción sobre diferentes materiales con el objetivo de obtener las curvas tensión-deformación de los mismos, así como diversos parámetros de utilidad para la caracterización de los materiales.

Para poder realizar dichos ensayos, se han programado secuencias de ensayo para los test llevados con cada uno de estos materiales en base a los estándares UNE-EN ISO de ensayos de tracción. La programación de las secuencias de ensayo ha quedado detallada en los siguientes capítulos con el objetivo de que pueda servir de manual para programar secuencias para otros materiales y ensayos en el futuro.

2. Fundamentos de la extensometría

La extensometría¹ es una técnica experimental en la cual se mide la deformación de un material que está sometido a esfuerzos. Un extensómetro es un instrumento que mide la deformación en un material a partir del cambio en las dimensiones del mismo.

Para la medida de esfuerzos en el ámbito experimental, por lo general, se utiliza una máquina universal de ensayo, que es una máquina semejante a una prensa, con la cual se realizan ensayos de tracción, compresión o flexión quedando registrada la carga que se le está aplicando al material en cada momento.

La extensometría tiene gran importancia en la ingeniería y la arquitectura porque es una técnica con la que se pueden obtener experimentalmente las deformaciones en un sólido y, por consiguiente, el estado tensional del mismo. Hasta hace poco era la única técnica para poder medir deformaciones en los materiales, y se han introducido grandes mejoras para obtener una mejor resolución con la nueva generación de extensómetros.

¹ El concepto de extensometría, que literalmente significa medida de la extensión, fue inventado por el Dr. Charles Huston quien describió este método por vez primera en un artículo del *Journal of the Franklin Institute* en 1879.

Debido a la introducción y mejora computacional del método de elementos finitos en el campo de la ingeniería para calcular deformaciones teóricas en estructuras o materiales sujetos a tensión, la extensometría ha pasado a ser menos utilizada, aunque sigue siendo una fuente fiable de resultados ya que se basan en medidas experimentales y no conclusiones analíticas como en el caso del MEF.

2.1. Tipos de extensometría

Podemos dividir principalmente los extensometría en dos tipos dependiendo del tipo de extensómetro que es utilizado para la medida de deformaciones: extensometría “de contacto” o de “no contacto”.

2.1.1. Extensómetros de contacto

Los extensómetros de contacto son, como su propio nombre indica, un tipo de extensómetro que precisan estar en contacto directo con el material del que se quiere medir la deformación. Fueron los primeros extensómetros que se fabricaron, y se han venido utilizando durante muchos años hasta que aparecieron los extensómetros de medida a distancia. En la actualidad, son los extensómetros que más se utilizan aún debido a que tienen un funcionamiento bastante intuitivo y precisan de equipos menos costosos.

Los extensómetros de contacto se pueden dividir, a su vez, en dos subgrupos. El primero es el de los extensómetros mecánicos (también denominados “clip-on”) y el segundo son las galgas extensométricas.

Extensómetro mecánico

Este tipo de extensómetro se utiliza en aplicaciones en las que se precisa una medida de alta precisión con una instrumentación más básica. En las normas internacionales sobre ensayos extensométricos, se trata de los extensómetros de referencia. Tienen diversas configuraciones y pueden medir desplazamientos con alargamientos muy bajos, desde menos de 1 mm, hasta más de 100mm. Sus principales ventajas son su asequibilidad y su facilidad de uso.

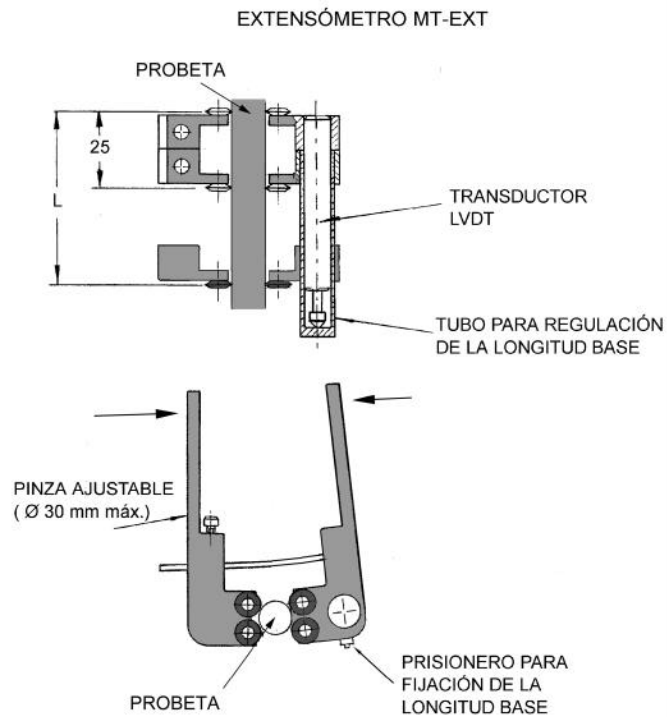


Fig. 2.1 Esquema de extensómetro clip-on Microtest MT-EXT V25

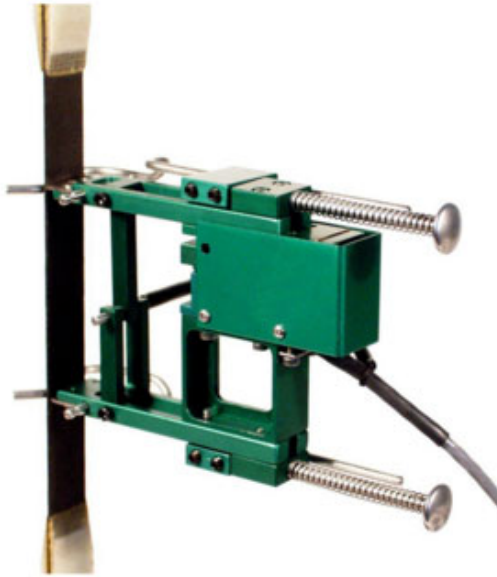


Fig. 2.2 Extensómetro Clip-on sobre probeta

Los extensómetros mecánicos automatizados han sido mejorados dando paso a una nueva generación de extensómetros de brazo sensor. Este tipo de extensómetro monitoriza los resultados en tiempo real y producen mayor repetitividad en los resultados, por encima de los extensómetros mecánicos convencionales. Tienen un contrapeso, lo que produce un efecto casi nulo en la muestra. Esto implica mayor estabilidad y reducción del ruido de la señal. Además, los extensómetros de brazo tensor pueden abarcar mayores longitudes (hasta más de un metro) sin perder resolución. Estos instrumentos pueden tomar lecturas de deformaciones por debajo de $0.02 \mu\text{m}$.



Fig. 2.3 Extensómetro de brazo tensor

Galgas extensométricas eléctricas

El funcionamiento de las galgas extensiométricas se basa en la relación que existe en materiales conductores o semiconductores entre la resistencia eléctrica que posee un material y la deformación del mismo debida a un esfuerzo o estrés mecánico (efecto piezorresistivo) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

donde R es la resistencia eléctrica, ρ es la constante de conductividad, L es la longitud del conductor y A es el área de sección transversal del mismo. La resistencia es directamente proporcional a la longitud e inversamente proporcional al área de la sección transversal.

Cuando se somete a tracción una barra de material conductor se produce un estiramiento en la dirección del eje sobre el que se ejerce el esfuerzo (longitudinal) y también una disminución en el área en sección transversal de esta barra. La resistencia eléctrica del metal aumenta cuando esta barra se estira y disminuye la sección

transversal. Del mismo modo, cuando se comprime la barra la resistencia disminuye debido a la mayor área de sección transversal y disminución de la longitud.

Es precisamente por esa propiedad que se relaciona la resistencia eléctrica con la deformación. Las galgas extensométricas son sensores que miden dicha resistencia, de modo que cuando se somete a tracción o compresión algún material, la galga muestra su variación resistiva, y a través de una relación ya conocida, se obtiene la deformación producida.

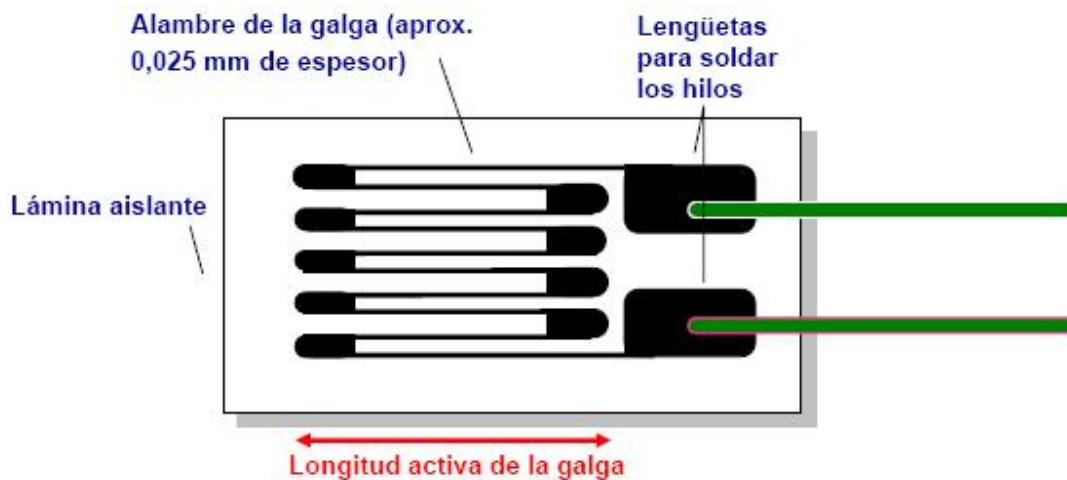


Fig. 2.4 Esquema de una galga extensométrica

Las galgas extensométricas se adhieren sobre una superficie de manera que se hacen solidaria a ella, experimentando las mismas deformaciones que la misma. Para que el comportamiento del material al que se adosan no se vea alterado, el tamaño y rigidez de las bandas deje ser bastante pequeño.

Una galga extensiométrica consiste, por lo general, en un alambre fino o un papel metálico, dispuesto en forma de rejilla. Para que se pueda leer la resistencia generada por la galga, se une a un dispositivo adecuado por medio de soldadura.

Por cada galga se obtiene el valor de deformación de la dirección en la que está orientada, sin embargo, también puede verse afectada por deformaciones en otras direcciones. Debido a ello, hay que elegir y seleccionar el punto y la dirección donde se quiere medir la deformación y colocar la galga cuidadosamente.

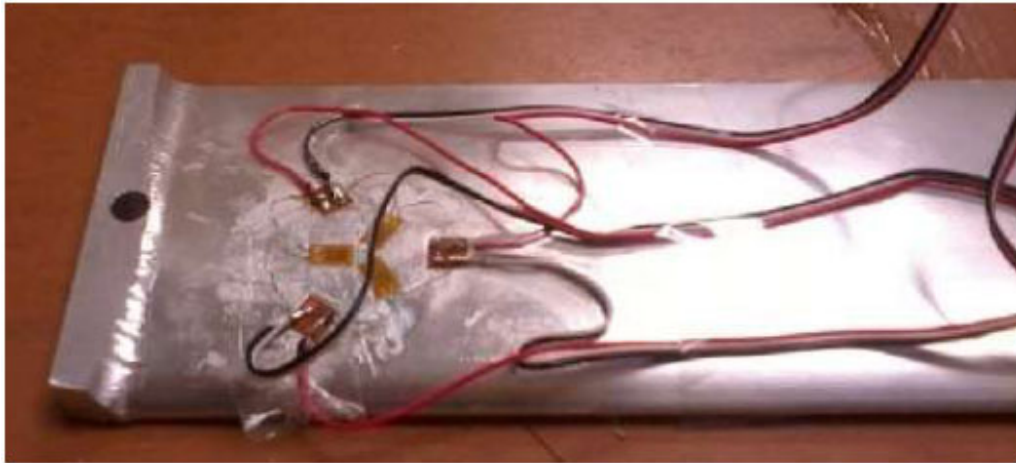


Fig. 2.5 Galgas extensiométricas sobre barra metálica

Hay diversos tipos de galgas extensiométricas: galgas metálicas, semiconductoras, por resistencia, por capacitancia, fotoeléctricas...

Galgas extensiométricas ópticas

Las galgas extensiométricas ópticas, también llamadas sensores de deformación de fibra óptica, sensores de red de Bragg en fibra FOS, sensores ópticos, o FBG, se utilizan para medir deformaciones a partir de la propagación de luz por el interior de una fibra óptica. Las galgas extensiométricas ópticas se componen de un núcleo y un revestimiento

de sílice, y una envoltura exterior, generalmente de plástico. El núcleo y el revestimiento canalizan la luz por el interior de la fibra, mientras que el envoltorio aporta protección.

Este tipo de galgas utilizan una red de Bragg inscrita en una fibra óptica (FBG), operando según un principio muy distinto al que emplean las galgas extensométricas eléctricas tradicionales. De forma simplificada, una red de Bragg en fibra es una microestructura (típicamente de unos pocos milímetros de longitud) que se genera modificando una fibra de telecomunicaciones mediante un láser ultravioleta. Esta microestructura produce una variación periódica en el índice de refracción de la fibra óptica. Si se introduce una tensión mecánica, el periodo de la red de Bragg dentro de la fibra varía como consecuencia de la extensión o la compresión de la fibra óptica. Esa variación produce a su vez un desplazamiento de la longitud de onda de Bragg, que puede ser detectado y grabado por un sistema de adquisición de datos.

Las galgas extensométricas de fibra óptica basadas en sensores FBG ofrecen una serie de ventajas en comparación con las galgas eléctrica, principalmente la estabilidad de la señal a largo plazo y durabilidad de los sistemas. Son mucho menos propensas a los fallos mecánicos, incluso en presencia de altos niveles de vibraciones. La distancia y la longitud del cable prácticamente no afectan a la precisión de las medidas.

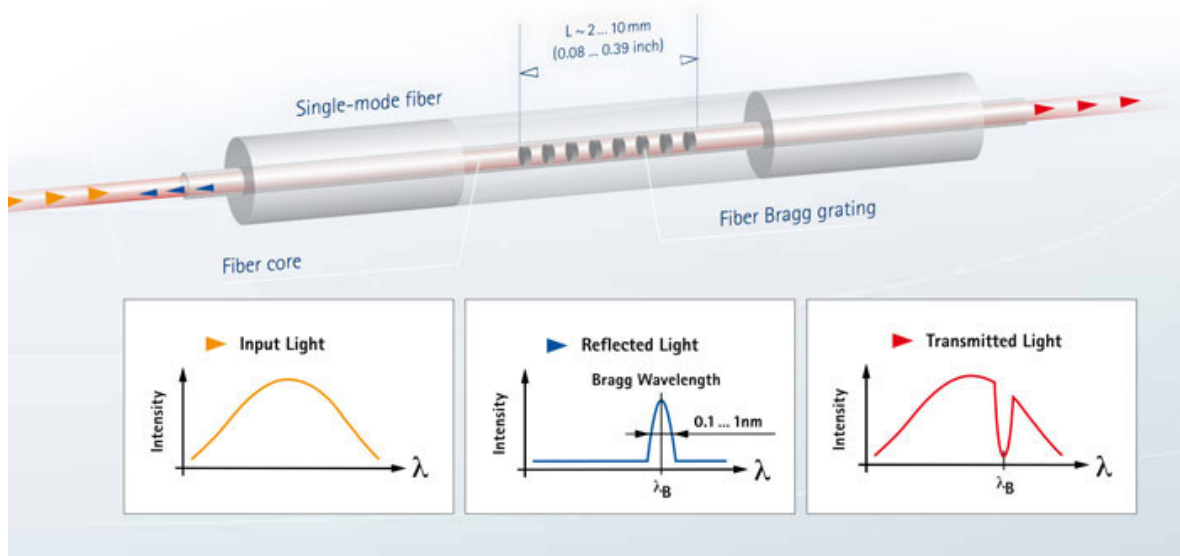


Fig. 2.6 Extensómetro de fibra óptica y variación de la longitud de onda

Extensómetros de cuerda vibrante

Los extensómetros de cuerda vibrante o acústicos consisten principalmente en un alambre unido por sus extremos a dos partes rígidas de la estructura. El alambre sometido a tracción vibra con una cierta frecuencia al sufrir un impulso. El circuito cuenta el número de ciclos de la vibración en un tiempo dado y con ello se obtiene una frecuencia de vibración. La frecuencia de vibración se relaciona directamente con la tensión de la cuerda: los extremos están unidos rígidamente al cuerpo que, al sufrir una deformación, hace que la tensión de la cuerda varíe y, por tanto, la frecuencia de vibración.

El desplazamiento se calcula según la siguiente fórmula: $L - L_0 = k(f^2 - f_0^2)$; donde L son las longitudes, k una constante del tensor y f las frecuencias de vibración.

Este tipo de extensómetro es bastante utilizado en arquitectura e ingeniería para el cálculo de deformaciones en estructuras. En anclaje de los extremos del extensómetro

ha de realizarse de forma correcta para asegurar que el conjunto es estable a largo plazo.

La longitud de la cuerda puede ir desde 50 a 150 mm. Tiene una resolución de 0,5 μm , muy apropiado para estructuras, puesto que las deformaciones dadas en las mismas son normalmente muy pequeñas.

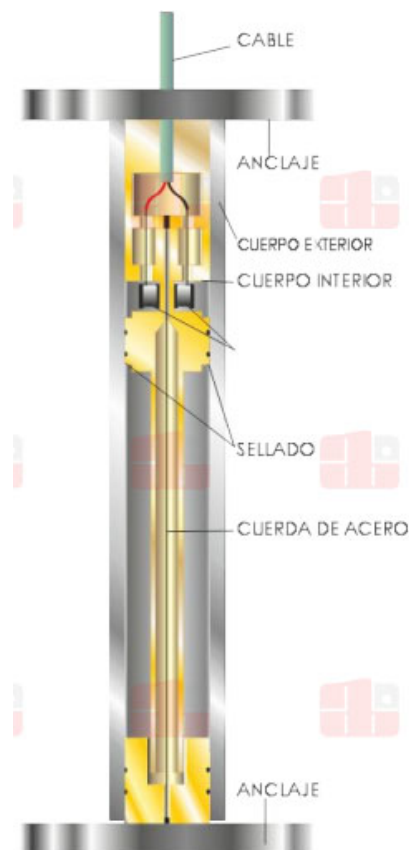


Fig. 2.7 Esquema de un extensómetro de cuerda vibrante.

2.1.2. Extensómetros de no contacto

Los extensómetros de “no contacto” son aquellos que miden deformaciones de un material a cierta distancia de la muestra, sin entrar en contacto con la misma.

Para aplicaciones concretas, los extensómetros sin contacto (non-contact extensometers) han empezado a ofrecer grandes ventajas cuando es difícil de utilizar extensómetros de contacto o no es posible utilizarlos porque alteran la medida obtenida de la muestra. Hay dos tipos de extensómetros sin contacto: de láser o de video.

Extensómetro láser

Un extensómetro láser es un extensómetro capaz de realizar medidas en materiales a través del uso de tecnología láser. Su método de trabajo se basa en iluminar la superficie de la muestra con un láser; el propio reflejo de la superficie es recibido por una cámara CCD, obteniendo una imagen que será procesada mediante algoritmos informáticos. En este tipo de extensómetros no es necesario marcar la muestra, ahorrando tiempo y material de laboratorio.

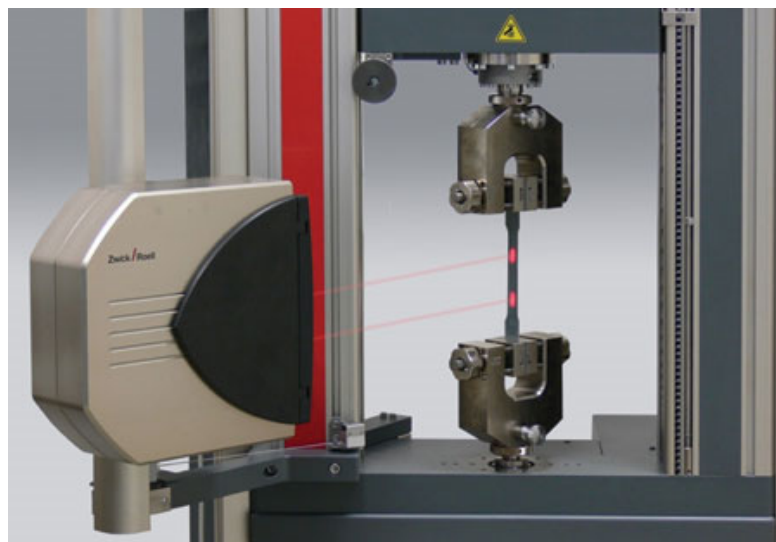


Fig. 2.8 Extensómetro Láser Zwick Rowell

La resolución es de menos de una micra, normalmente de 0.1 μm , y llega a medir longitudes de hasta 900 mm, lo que lo hace un extensómetro válido para un largo rango de ensayos y materiales. Los extensómetros laser son utilizados principalmente para materiales que pueden ser dañados con un extensómetro de contacto, o que puedan verse alterados por el mismo debido a la presión de contacto o la masa del extensómetro. Dichos extensómetros también pueden ser utilizados para un gran rango de temperaturas, a diferencia de los de contacto cuyas propiedades se ven afectadas a altas o bajas temperaturas. Este tipo de extensómetros solo funciona correctamente si la superficie de la probeta a estudiar es mate.

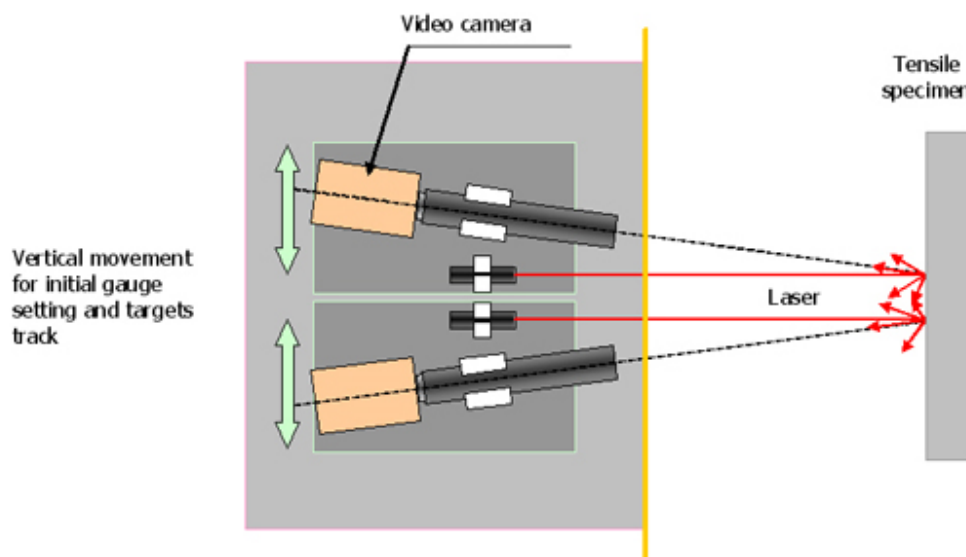


Fig. 2.9 Esquema de funcionamiento de un extensómetro láser

Videoextensómetro

Un videoextensómetro es un aparato que es capaz de medir las deformaciones de ciertos materiales capturando imágenes continuamente de la muestra durante el ensayo a través de una grabadora de fotogramas o una cámara de video digital conectada a un ordenador. La muestra del material a ensayar debe encontrarse marcada, con stickers o con tinta de distinto color y textura a la muestra original para que dichas marcas puedan ser diferenciadas de la superficie de la misma. La distancia entre las marcas en la imagen capturada irá variando en tiempo real conforme varíe la distancia real entre las marcas, y es medida por un software a partir de un valor calibrado inicial. La precisión depende principalmente de la resolución de la cámara y del software utilizado; con una buena calibración, cámara y un algoritmo adecuado, la precisión puede llegar a algo menos de un micrómetro.



Fig. 2.10 Videoextensómetro (AMETEK Test and calibration instruments)

Los videoextensómetros son utilizados principalmente para materiales en los cuales el uso de extensómetros de contacto tradicionales o de brazo extendido pueden producir algún tipo de daño o variación en el comportamiento del material durante el ensayo. En alguna probetas, que el extensómetro esté anclado solidariamente a la misma puede provocar una adulteración de la medida obtenida.

Algunos videoextensómetros tienen dificultad de ofrecer resultados aceptables cuando están en condiciones de temperaturas adversas.

El cambio de luz ambiente durante el test puede afectar a los resultados si no se utilizan filtros de luz, por lo que se suele recomendar el uso de luz adecuada o lámparas que ofrezcan una imagen más nítida.

2.2. Fundamentos teóricos de la extensometría

Las propiedades mecánicas de los materiales son características por las cuales se puede diferenciar, desde el punto de vista del comportamiento mecánico, un material de otros. Puesto que cada material se comporta de forma diferente se realiza el análisis de su comportamiento a partir de pruebas experimentales.

Entre las propiedades mecánicas más comunes que se miden en los materiales se encuentran: la resistencia a la tracción, a compresión, la deformación, el módulo de elasticidad (o de Young) y el coeficiente de Poisson. Para obtener dichas propiedades se precisa conocer cuánto se deforma el material dependiendo de la tensión a la que es sometido. El modo de obtener dicha deformación experimentalmente es a través de la extensometría.

Estos resultados se muestran, usualmente, en la curva tensión-deformación de dicho material. Este diagrama es uno de los más útiles a la hora de analizar materiales, pues nos da información acerca del comportamiento de los mismos cuando son sometidos a una tensión creciente.

2.2.1. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción de un material consiste en someter a una probeta a un esfuerzo de tracción axial creciente hasta que se produce la rotura de la misma. Se realiza con una máquina de ensayos que es capaz de medir la fuerza aplicada. A su vez, se mide con el extensómetro el alargamiento de una zona del material. Dicha zona debe ser lo más centrada en la probeta posible, puesto que será la zona en la que se concentren las tensiones y en la que la probeta tienda a romper si el ensayo se ha llevado a cabo de manera correcta.

Los datos obtenidos en este tipo de ensayos se pueden utilizar para comparar distintos materiales y conocer qué condiciones de carga es capaz de soportar un determinado material. Se realiza con probetas, ya sean de dimensiones normalizadas o no, que se fabrican en diversas formas. La sección transversal de las mismas puede ser de diversas geometrías, siendo las más comunes redonda, cuadrada o rectangular.

El esfuerzo axial ' σ ' en una probeta se calcula dividiendo la carga entre el área de la sección transversal.

2.2.2. Diagrama tensión-deformación

La elasticidad es la capacidad que tienen los materiales de recuperar la forma inicial cuando se les deja de aplicar la carga que produce la deformación. Al exceder el límite de elasticidad se producen deformaciones permanentes. El límite elástico es el parámetro por el cual se valora esta propiedad y se define como la carga que puede soportar un material por unidad de sección de modo que, tras cesar la aplicación de la carga, el material no sufra deformaciones permanentes.

La plasticidad de un material, por el contrario, es la capacidad que tiene el mismo de adquirir deformaciones permanentes sin llegar a la rotura.

Durante el ensayo de tracción se mide el alargamiento de la probeta o de parte de la misma ΔL debido a una fuerza de tracción F , obteniéndose un diagrama $F-\Delta L$. La forma del diagrama dependerá de los parámetros de ensayo y del del material ensayado. Para comparar los resultados obtenidos con probetas de distintos tamaños se usa un diagrama tensión-deformación.

La tensión es la fuerza aplicada a la probeta por unidad de sección:

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

El cociente entre el alargamiento ΔL y la longitud inicial de la probeta L_0 es la deformación o alargamiento unitario ε :

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Tras realizar la conversión $F-\sigma$ y $\Delta L-\epsilon$ se obtiene el diagrama de tensión-deformación σ vs ϵ . En dicho diagrama se puede diferenciar varias zonas según el comportamiento del material:

- Zona elástica: En esta zona se dan alargamientos de tipo elástico. El alargamiento es pequeño y proporcional al esfuerzo. Al cesar el esfuerzo, la probeta recupera su longitud inicial. (Zona OE, ver figura 2.11)

- Zona plástica: En esta zona se da alargamiento de tipo permanente. Se producen deformaciones grandes y cuando cesa la fuerza permanece cierta deformación. Por ejemplo, como se aprecia en la figura 2.11, si la probeta llega al punto A, la probeta recupera una deformación elástica ϵ_e pero persiste una deformación remanente o plástica ϵ_p . Si se repitiera el ensayo, la curva es parecida, pero la zona elástica será mayor. Con este proceso se produce el endurecimiento del material por deformación.

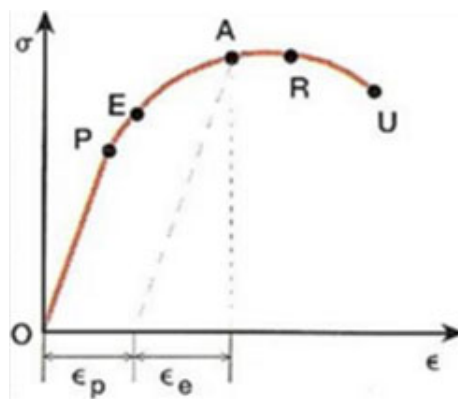


Fig. 2.11 Modelo de diagrama tensión-deformación simplificado

En la zona elástica se distinguen las siguientes regiones:

- Zona proporcional: Relación lineal tensión y deformación (OP).

$$\epsilon = E \cdot \sigma$$

Donde E es el módulo de elasticidad lineal o de Young

Las deformaciones se reparten a lo largo de la probeta. Son deformaciones bajas y al retirar la carga, la probeta recupera su forma inicial. El límite de proporcionalidad es el valor de la tensión que marca la transición a la zona no proporcional.

- Zona no proporcional (Zona PE, según Fig. 2.12). En esta zona, las deformaciones no son permanentes. Una vez detenido el ensayo, la probeta recupera su longitud inicial. Sin embargo, la relación entre tensión y deformación no es proporcional.

En la transición entre zona elástica y zona plástica se produce el fenómeno de fluencia o cedencia. Se trata de una deformación brusca de la probeta sin incremento de la carga aplicada. Esto se produce cuando las impurezas del material o elementos de aleación bloquean la red cristalina, impidiendo su deslizamiento.

En la zona plástica se distinguen las siguientes regiones:

- Zona de deformación plástica uniforme (Zona ER). En esta zona, al producirse pequeños incrementos de carga, se obtiene un gran alargamiento. La resistencia a la tracción se puede obtener a partir del cociente de fuerza máxima entre la sección inicial de la probeta.

- Zona de estricción o de deformación elástica localizada (Zona RU). La deformación se concentra en la parte central de la probeta y la sección se reduce de manera importante. A partir de ese momento, las deformaciones se localizan en esa zona hasta que se produce la rotura de la pieza. La tensión necesaria para que se produzca alargamiento en esta zona disminuye con respecto a la zona de deformación plástica uniforme.

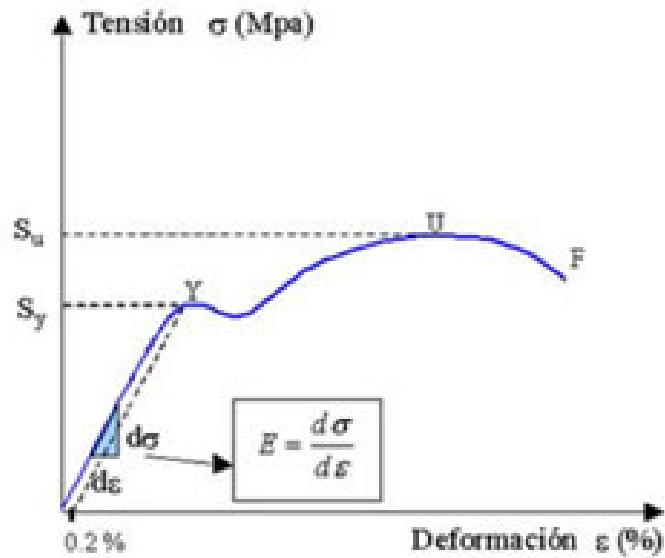


Fig. 2.12 Diagrama de tensión-deformación y cálculo del límite elástico

3. Instrumentación y software

Para realizar los ensayos de tracción en el presente trabajo con cada uno de los materiales se ha utilizado una máquina de ensayo universal, con la cual se puede medir la fuerza que se ejerce sobre la probeta en tiempo real, y un videoextensómetro, con el que se mide la deformación en las probetas a ensayar.

A continuación, se realiza un resumen de los elementos utilizados en dichos ensayos, así como el software necesario para el manejo de la máquina de ensayos universal y el videoextensómetro.

3.1. Máquina de ensayos universal

Una máquina de ensayos universal² es una maquina semejante a una prensa que permite someter a distintos materiales a ensayos para medir sus propiedades. La presión se logra mediante un sistema mecánico o hidráulico. La máquina de ensayos universal tiene como función principal comprobar la resistencia de los materiales que se someten a ensayo. El sistema de la máquina de ensayos aplica cargas controladas sobre una probeta, midiendo dicha carga en cada momento. Para los ensayos se utilizan probetas a escala, que serán representativas del material al conservar las propiedades completas del mismo.

Entre los tipos de ensayo que una máquina universal puede llevar a cabo se encuentran los siguientes: ensayos a tracción, compresión, cizalladura, flexión, pelado, desgarramiento, cíclico y ductilidad a la flexión.

Estas máquinas se pueden dividir, por su accionamiento, en dos tipos:

- Hidráulicas: accionamiento mediante bomba-cilindro. Son capaces de aplicar cargas muy altas. La instalación requiere de mayor espacio (bombas, almacenamiento de fluido hidráulico...) y es más ruidosa en comparación con aquellas de accionamiento mecánico.

- Mecánicas: accionamiento a través de motor y mediante el uso de tornillos y mordazas. Tienen una mayor estabilidad (y son capaces de mantener la carga en sus valores especificados con un error muy bajo. Esto es importante en e caso de ensayos de larga duración o con velocidades de carga lentas. Precisan de menos mantenimiento

² La denominación "máquina de ensayos universal" es debida a que posee las especificaciones de carga universales en kg o kN. A su vez, el término "ensayos" se refiere a que son pruebas para llegar a unas conclusiones.

que las de accionamiento hidráulico y no tienen fugas ni requieren de elementos de refrigeración.



Fig. 3.1 Máquina de ensayos universal Microtest

Todas las máquinas de ensayos tienen en común las siguientes partes:

- Mordaza fija: esencialmente inmóvil y que lleva ubicada una mordaza.
- Mordaza móvil: un miembro móvil que lleva ubicada una mordaza y tendrá un desplazamiento vertical hacia arriba o hacia abajo.
- Mecanismo de arrastre, que es el que le transfiere movimiento y velocidad.

3.1.1. Máquina de ensayos electromecánicos Microtest EM2

La máquina de ensayos que se ha utilizado para este trabajo ha sido una máquina de ensayo electromecánicos MICROTTEST EM2/FR, que es el modelo que se encuentra en el laboratorio de resistencia de materiales del Departamento de Estructuras, Construcción y Expresión Gráfica situado en el edificio ELDI de la UPCT.

Estas máquinas son apropiadas para un rango de materiales muy amplio así como diferentes ensayos: de tracción, compresión, flexión, cortadura y ensayos de ciclo lento, estáticos o cuasiestáticos. Se utilizan en la industria, centros de investigación y desarrollo y centros docentes. Pueden emplearse para materiales plásticos, metálicos tejidos, gomas, etc, siempre que se use con los accesorios adecuados

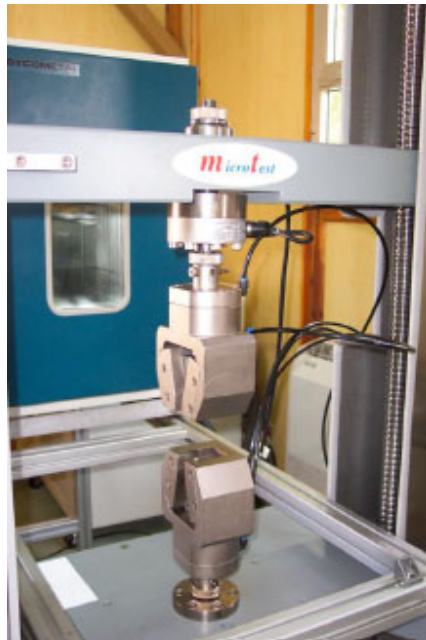


Fig. 3.2 Detalle de modelo Microtest EM2

Estas máquinas se construyen con una capacidad de carga estándar desde 10 kN hasta 500 kN pero se pueden solicitar máquinas específicas con capacidades superiores o inferiores.

En este sistema, la carga es aplicada mediante un sistema de doble husillo que, junto a las columnas de la máquina, hacen que el conjunto sea muy robusto.

El puente superior móvil es accionado por un husillo a bolas y guiado en su movimiento por las columnas laterales. El tamaño o longitud de los husillos marca el recorrido del puente móvil.

Los husillos son de doble efecto y se controlan a partir de un motor de corriente continua o “brushless”, incorporando un encoder óptico para la medida de la posición. La potencia se transmite desde la salida del motor a cada husillo a través de un sistema de polea.

Con la máquina de ensayo se puede realizar ensayos de tracción y ensayos de compresión en la misma zona de ensayo.

Los sistemas electromecánicos se caracterizan, a diferencia de los sistemas de tipo hidráulico, por:

- Es un sistema muy estable, lo que lo hace idóneo para la realización de ensayos con una velocidad de carga muy lenta o ensayos de larga duración.
- El sistema es capaz de mantener la carga con un error menor del 0,1% de la carga aplicada durante grandes intervalos de tiempo.
- La velocidad de los ensayos puede ir desde los 0,001 mm/min hasta 1000 mm/min. (dependiendo del modelo), de modo que se pueden ensayar una gran cantidad de materiales y muestras.

- El mantenimiento de la máquina es bastante básico, puesto que no necesita de cambio de aceite, juntas o filtros.
- No requiere del espacio excesivo que supone una instalación hidráulica.
- La máquina de ensayos electromecánicos es bastante silenciosa, en contraposición con las de tipo hidráulico.
- No existen riesgos de fugas de aceite ni elemento de refrigeración costosos, por lo que el mantenimiento de la máquina y la peligrosidad es menor que en el caso de un sistema hidráulico.

Los sistemas electromecánicos con medida de fuerza de esta máquina de ensayos incluyen un transductor de fuerza o célula de carga. La célula o celda de carga aporta una medida más precisa de la carga que en los sistemas hidráulicos. Los captadores de presión de los sistemas hidráulicos tienen el inconveniente de que la medida se ve afectada por la temperatura del aceite, las oscilaciones de la presión del aceite y el rozamiento producido en el cilindro hidráulico de carga.

La velocidad de ensayo es controlada de forma digital, con un codificador óptico que se encuentra en el eje del motor. De este modo, se regula el movimiento con mayor precisión.

DESCRIPCIÓN DE LA MÁQUINA

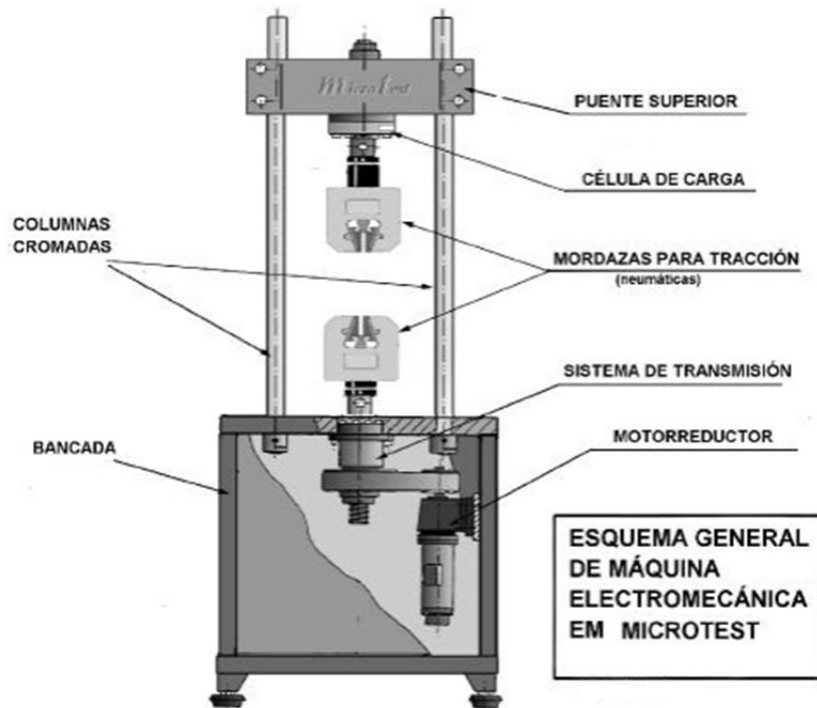
A continuación, se describen los diferentes elementos que conforman la máquina de ensayos universal Microtest EM2.

Bancada

Se trata de la base de la máquina, que contiene el motor, el sistema reductor, las poleas de transmisión, tuercas y husillos a bolas.

Encima de la bancada está colocado el banco de ensayos.

En el caso de accesorios como cámaras climáticas u hornos de ensayo, sobre la bancada hay unas guías de acoplamiento mecanizado para que puedan ser acoplados.



MICROTEST, S.A.

Fig. 3.3 Esquema de la serie Microtest EM

Marco de ensayos

Se trata de un marco de carga de alta rigidez que contiene dos columnas-guía en acero cromado y de doble husillo.

El puente móvil contiene las tuercas de los husillos. De este modo, el movimiento es accionado y guiado por las columnas. En el puente móvil también se incorporan, por lo general, las células de carga. Se pueden acoplar células de carga de menor capacidad de manera adicional a la incluida en la máquina de ensayos.

Mordazas

Las mordazas son los elementos de sujeción de las probetas. Dependiendo del tipo de ensayo y material, tenemos a nuestra disposición un amplio grupo de mordazas.

Las mordazas de accionamiento neumático utilizan aire comprimido para ser accionadas y retener la probeta. Precisan de un grupo compresor de aire y son capaces de retener probetas que se vayan a ensayar hasta fuerzas de 300 kN.

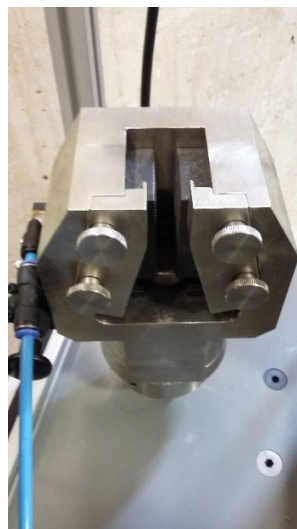


Fig. 3.4 Mordaza Microtest serie MN (utilizada para los ensayos con aceros).

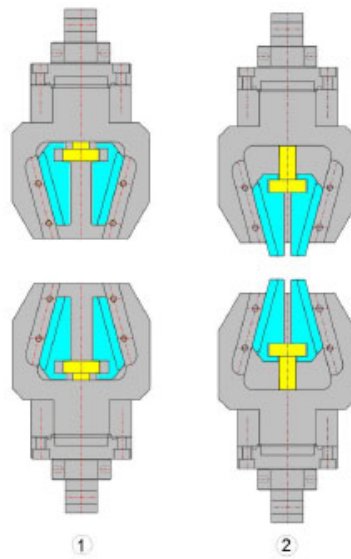


Fig. 3.5 Accionamiento de una mordaza neumática Microtest serie MN

A su vez, existen mordazas de accionamiento que precisan de apriete manual o a través de muelles. Las mordazas utilizadas para ensayos textiles o de cuerdas y cables son de este tipo.



Fig. 3.6 Mordazas utilizadas para los ensayos con telas (izquierda) y cuerdas (derecha).

Sistema actuador

El sistema de carga de la máquina es electromecánico mediante doble husillo a bolas de aplicación universal.

El accionamiento se controla a través de un motor de corriente continua con un sistema de reducción para que se proporcione el par adecuado al sistema.

Para la monitorización de la posición y la velocidad de la mordaza móvil con bastante precisión, la máquina incluye un codificador óptico en el eje del motor.

Para que sea más fácil el manejo y la colocación de las probetas, la máquina de ensayo tiene un panel frontal en el que se incluye un mando para modificar la posición del puente móvil.

Elementos de seguridad

Las máquinas EM2 incluyen varios elementos de seguridad para evitar accidentes durante su uso.

Entre ellos, se encuentra una mampara de policarbonato de alta resistencia, para evitar proyecciones, límites “finales de carrera” y límites mecánicos, para controlar el movimiento y evitar que éste se produzca fuera de la zona deseada; y botón de emergencia, para que se produzca la detención del proceso en caso de emergencia.



Fig. 3.7 Panel de control manual, con botón de parada de emergencia.

Células de carga

Una célula de carga es una estructura diseñada para soportar cargas de tensión, compresión y flexión. En el interior de la célula hay diversos sensores de deformación llamados “Strain Gauges” que detectan los valores de deformación.

La célula de carga digital ejerce una fuerza mediante circuitos o sistemas de pesaje y, al detectar la resistencia, se produce la traducción de este dato y se obtiene el valor de la fuerza que se ha ejercido. Este es un proceso continuo.

La señal de la fuerza ejercida se transfiere a un ordenador, dispositivo electrónico o de almacenamiento, donde se recopilan los datos.

Existen células de carga adecuadas a cada tipo de ensayo, se debe elegir aquella en cuyo rango de valores se encuentre la fuerza de ensayo y cuyo valor sea más próximo a la misma, puesto que la precisión de la medida de fuerza será mayor cuanto menor sea el valor de la célula de carga.



Fig. 3.8 Célula de carga de 100 kN. Acoplada bajo ésta, célula de carga de 1000 kg.

3.2. Videoextensómetro Microtest

El video-extensómetro desarrollado por Microtest está diseñado para la medida de deformaciones en ensayos estáticos a velocidades de deformación relativamente lentas. Se puede utilizar tanto para ensayos estáticos destructivos como no destructivos.

El sistema completo está compuesto de una cámara digital conectada al PC a través de un puerto USB o FireWire 1394.

Se realiza la captura de imágenes de la probeta a ensayar por una cámara de formato completo (full-frame). Estas imágenes se procesan en tiempo real, de modo que se reconocen las marcas situadas sobre la probeta (marcas de medición) y, a partir de ahí, se calcula la distancia entre ellas en todo momento.

Todos estos datos se transmiten al software de procesamiento de imagen VE-1002.



Fig. 3.9 Videoextensómetro Microtest (Laboratorio Resistencia de Materiales)

El sistema de videoextensómetro está compuesto por:

- Video cámara. Puede ser analógica o digital, y debe estar montada sobre un elemento de sujeción, por ejemplo, un trípode.
- Óptica. Conjunto de lentes para la cámara con diversas características. Debe escogerse en función del tamaño de las probetas o del rango de imagen que se va a monitorizar.

- Frame grabber o capturadora de imágenes. Hardware que convierte la señal de la cámara a formato digital. Es necesaria cuando se utiliza una video cámara analógica.
- Software de procesamiento. Software que procesa la imagen de la cámara, devolviendo los valores de las medidas obtenidas.

El sistema posee, entre otras, las siguientes características:

- Medida de múltiples zonas de medida por eje y capacidad de medida de hasta dos ejes a la vez.
- Calibración del sistema de medida desde el software VE1200.
- Herramientas para el ajuste de la imagen.
- Visualización de las medidas obtenidas en tiempo real.

La resolución y precisión de la medida depende en parte de la distancia de la cámara con respecto a la probeta sometida a ensayo. Esto implica que la medida será más precisa cuando el videoextensómetro es colocado a menor distancia de la muestra sobre la que realizar el ensayo. Esto no siempre es posible puesto que, dependiendo del tipo de ensayo y material, puede darse el caso en el que la longitud inicial de medida sea muy grande o que la deformación del material sea alta, lo que obligaría a colocar el videoextensómetro a una distancia mayor para abarcar todo el campo de visión necesario.

A su vez, la resolución también depende de la propia cámara y la óptica de la misma. A distancias bajas y con una cámara de alta resolución, se puede llegar a medir deformaciones de hasta 20 μm .

En el laboratorio de resistencia de materiales del Departamento de Estructuras, Construcción y Expresión Gráfica situado en el edificio ELDI de la UPCT, el videoextensómetro disponible es un modelo facilitado por Microtest con la máquina de ensayos universal, que tiene una resolución de imagen relativamente baja.

3.3. Software SMC 3000-95

El software SCM3000 de MICROTEST permite el control de los ensayos que se realizan con la máquina de ensayos. Este software proporciona un control en lazo cerrado de la máquina y realiza la conversión de los canales de medida (de analógica a digital), con una capacidad de 8 canales diferentes. El control de la máquina se realiza con un ordenador y la transmisión de los datos se lleva a cabo a través de una conexión USB.

Los parámetros de uso y control de la máquina de ensayos se manejan a través del ordenador. El software da la capacidad al usuario de automatizar sus operaciones, a partir de un editor de operación y resultados. Estos últimos se pueden exportar a Excel o ASCII al finalizar el ensayo para poder generar informes del ensayo.

El control de la máquina a través del software permite la regulación por fuerza y posición, puesta a cero de los diversos canales, configuración de canales y alarmas, registro de medidas, realización de ensayos automáticos, definición de los parámetros de ensayo, cálculos, tablas de resultados, gráficas, etc.

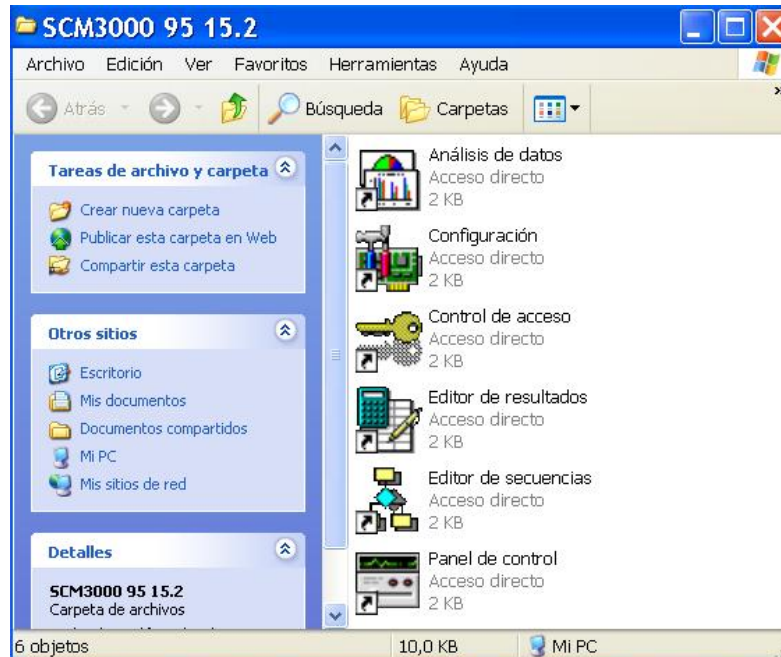


Fig. 3.10 Conjunto de módulos que conforman el software SMC 3000-95

Este sistema trabaja bajo un entorno Windows, y consta de seis módulos: análisis de datos, configuración, control de acceso, editor de resultados, editor de secuencias y panel de control.

En el siguiente apartado se procede a explicar las características de cada uno.

3.3.1. Módulos

CONFIGURACIÓN

En el módulo configuración, se pueden variar diversos parámetros de ensayo. tales como: configuración de Entrada/salida, control del motor, de presión, puertos, etc., de modo que se pueden guardar en un fichero y cargar en el momento de realizar el ensayo. Existe un fichero de configuración prediseñado que se carga por defecto, sobre el que se puede hacer modificaciones sobre los distintos apartados.

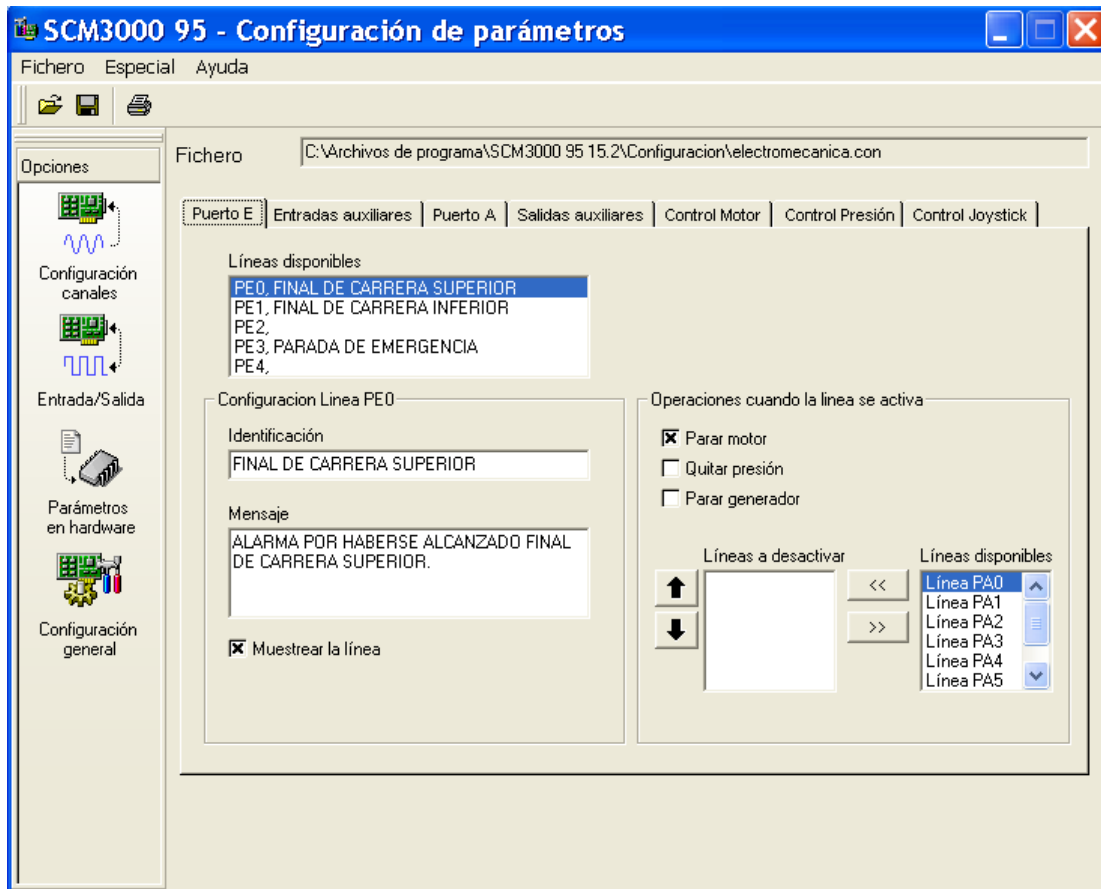


Fig. 3.11 Configuración de parámetros en SMC 3000

EDITOR DE RESULTADOS DE ENSAYO

El editor de resultados permite al usuario diseñar a su medida un conjunto de expresiones que pueden definir un ensayo y que el SCM3000 puede evaluar, para obtener ciertos valores directamente, tales como: fuerza máxima, alargamiento máximo, etc.

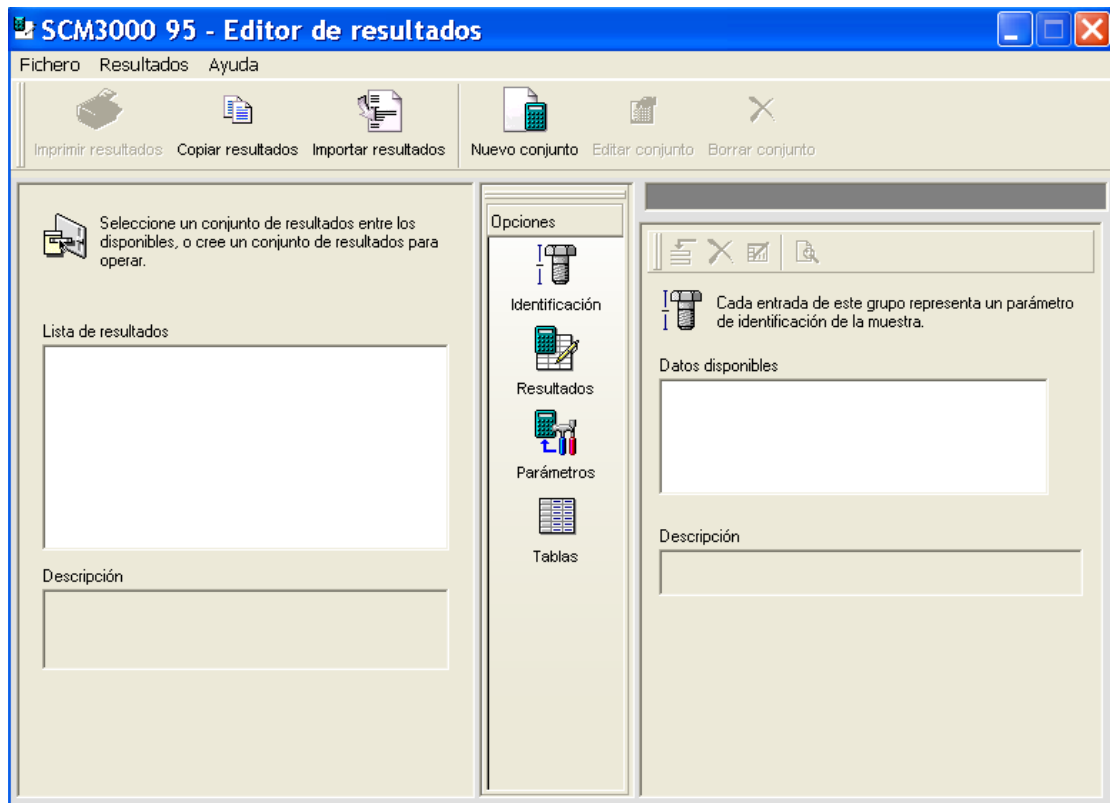


Fig. 3.12 Editor de resultados en SMC 3000

PANEL DE CONTROL

El panel de control de ensayos es el módulo que tiene más importancia en el proceso. Permite el control de la máquina de ensayos a partir del software instalado en el PC, ya sea en control manual o automático.

Tiene dos modos de funcionamiento:

- El modo automático, en el cual el operador selecciona una secuencia de ensayo y los resultados que desea obtener, y el programa se encarga de llevar a cabo el resto de las operaciones.

- Control manual, donde el operador es capaz de controlar los diferentes elementos de la máquina de ensayos, sin que el programa recurra a ninguna secuencia de ensayos programada.

En este trabajo se ha utilizado el modo automático, puesto que las secuencias de operaciones que deben llevarse a cabo según las normativas de test de tracción de los materiales a testear son bastante complejas como para poder llevar a cabo el ensayo en modo manual instantáneamente.

En este modo automático, el aspecto del panel de control es el siguiente:

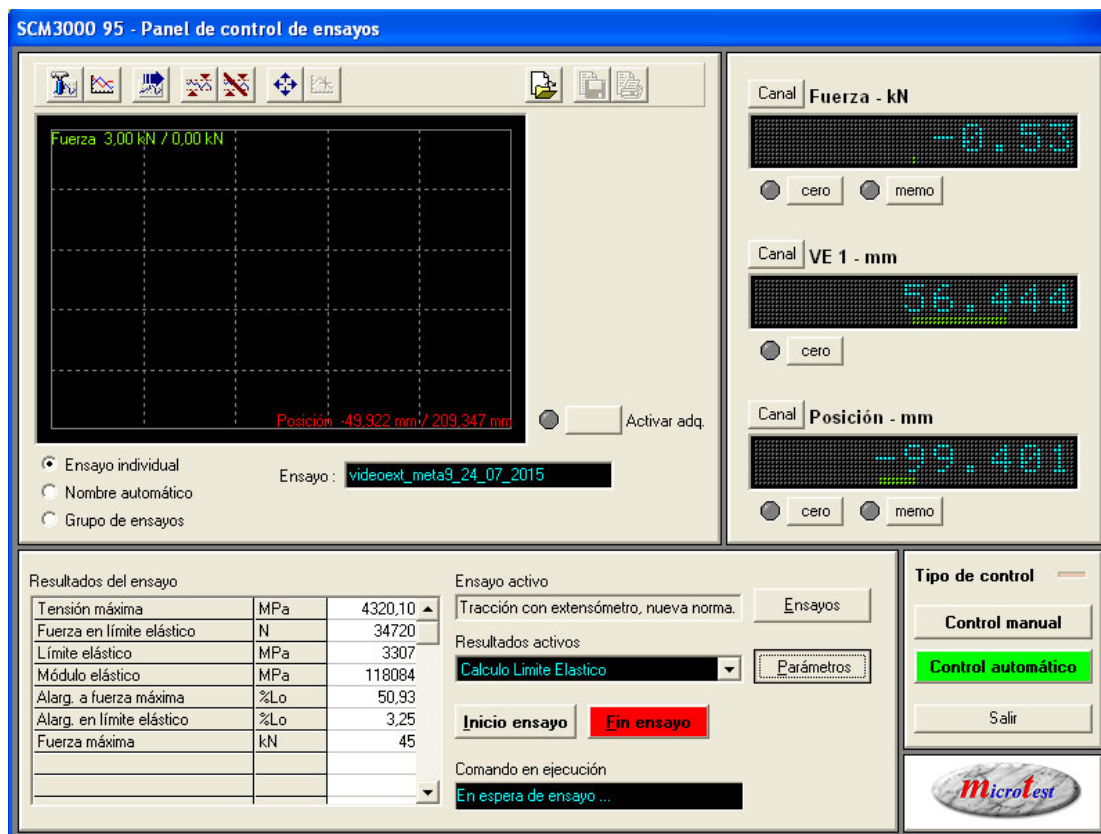


Fig. 3.13 Panel de control del SMC 3000

Tiene un apartado para cargar el ensayo que se va a realizar. Un ensayo está compuesto de una secuencia y unos resultados. La secuencia se crea a través del editor

de secuencias, con las distintas órdenes de operación. Los resultados son el conjunto de expresiones que se han definido previamente en el Editor de resultados (Fmax, alargamiento, límite elástico...), y cuyos valores aparecerán al finalizar el ensayo en el apartado "Resultados de ensayo" del panel de control.

Contiene un cuadro de lecturas, con los displays de los diferentes canales activos en tiempo real. Se puede cambiar el canal en cada uno de dichos displays, así como poner cada canal a cero en cualquier instante o memorizar la lectura máxima que nos ofrece dicho canal.

También tiene un apartado para dar nombre al ensayo que se va a llevar a cabo, y un panel de adquisición de resultados en el se obtiene una gráfica con cualquiera de las dos variables de los canales de lectura que indiquemos (por ejemplo, fuerza en función del tiempo, fuerza en función de la posición...).

ANÁLISIS DE DATOS

El módulo de tratamiento de datos permite al usuario recuperar los ficheros de datos generados por el programa de control y visualizarlos en pantalla. En este módulo se puede visualizar gráficamente las curvas correspondientes a ensayos almacenados, hacer seguimiento estadístico de resultados y obtener tablas con los datos del ensayo.

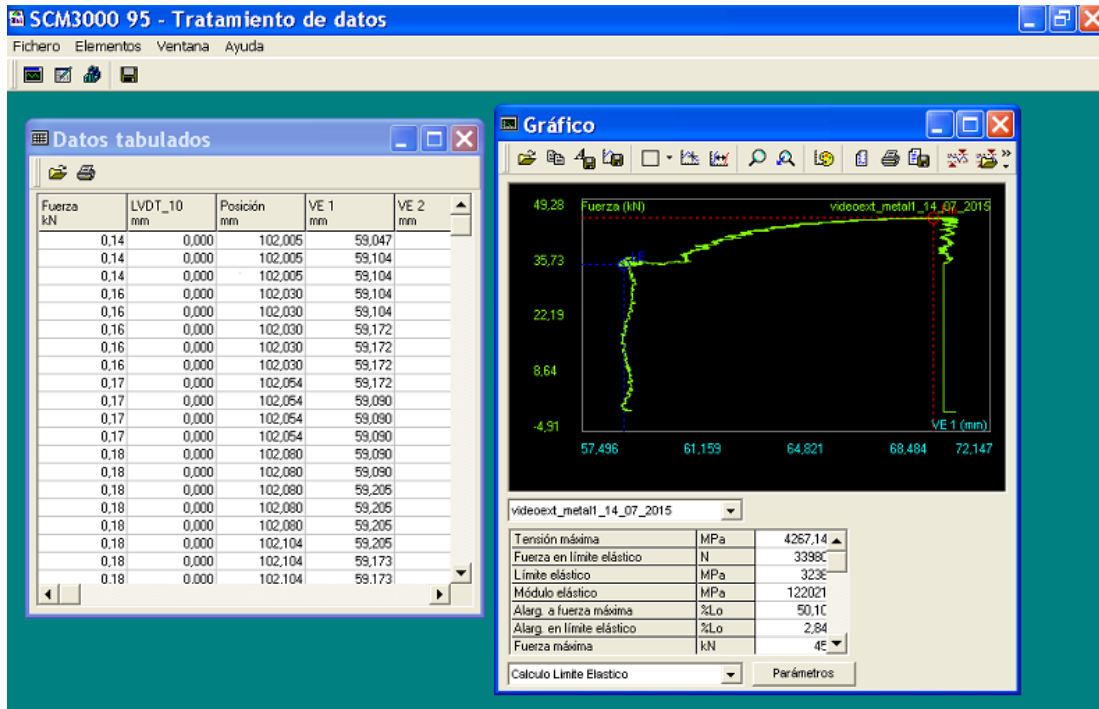


Fig. 3.14 Análisis de datos (tabla y gráfico) en SMC 3000

Los resultados se expresan en una tabla con 5 columnas, correspondientes a los siguientes canales de datos obtenidos:

Tabla 1. Datos obtenidos por canal de medida

Columna	Canal - Resultado
Fuerza kN	Medida de fuerza ejercida por la máquina de ensayos
LVDT_10 mm	Medida de la posición del extensómetro mecánico
Posición mm	Medida de la posición de las mordazas de la máquina de ensayo

VE 1 mm	Medida del primer canal del videoextensómetro obtenido a través del software VE-1200
VE 2 mm	Medida del segundo canal del videoextensómetro obtenido a través del software VE-1200
Tiempo s	Canal de medida del tiempo de ensayo

Es posible volcar los resultados en formato excel o pdf, para poder editarlos y guardarlos.

Fuerza kN	LVDT_10 mm	Posición mm	VE 1 mm	VE 2 mm	Tiempo s
3,16	0,001	99,374	0,201	0,000	25,3
3,16	0,001	99,374	0,201	0,000	25,4
3,34	0,000	99,398	0,201	0,000	25,5
3,34	0,000	99,398	0,210	0,000	25,7
3,34	0,000	99,398	0,210	0,000	25,8
3,34	0,000	99,398	0,210	0,000	25,9
3,52	0,000	99,422	0,210	0,000	26,0
3,52	0,000	99,422	0,229	0,000	26,3
3,52	0,000	99,422	0,229	0,000	26,4
3,71	0,000	99,449	0,229	0,000	26,5
3,71	0,000	99,449	0,218	0,000	26,7
3,71	0,000	99,449	0,218	0,000	26,8
3,71	0,000	99,449	0,218	0,000	26,9
3,89	0,001	99,473	0,218	0,000	27,0
3,89	0,001	99,473	0,218	0,000	27,3
3,89	0,001	99,473	0,218	0,000	27,4
4,09	0,001	99,498	0,218	0,000	27,5
4,09	0,001	99,498	0,215	0,000	27,7
4,09	0,001	99,498	0,215	0,000	27,8

Fig. 3.15 Expresión de resultados en tablas

EDITOR DE SECUENCIAS

El editor de secuencias es un módulo de programación de ensayos a partir del cual se crean las secuencias de ensayo personalizadas, enlazando los comandos y órdenes que contiene el editor.

Este módulo es muy importante pues, dependiendo del ensayo que se quiera realizar, se deben de crear unas órdenes u otras. Es por ello que el funcionamiento de este módulo será explicado con un poco más de detalle a continuación, así las secuencias que se han creado para los ensayos con los distintos materiales.

3.3.1.1. Editor de secuencias

Las secuencias de ensayo son un grupo de órdenes que el programa de control de la máquina de ensayo puede interpretar y ejecutar directamente, sin necesidad de tener que manejar el panel de control instantáneamente, lo que provocaría pausas en los ensayos.

Dichas secuencias facilitan los ensayos y son de gran utilidad para algunos ensayos especialmente complejos, como aquellos que contienen órdenes cíclicas.

Para crear y modificar secuencias existe la herramienta, dentro del grupo de programas de SMC, de editor de secuencias. Este programa permite, de manera más o menos intuitiva, crear y modificar secuencias, enlazando comandos y órdenes de manera gráfica y consecutiva. Se tiene a disposición del usuario un manual que el propio fabricante facilita para aprender a utilizar dicho programa.

A continuación, se va a realizar un resumen de la utilización del editor de secuencias y los comandos que se pueden introducir para crear secuencias de ensayo.

La ventana principal del editor de secuencias tiene el siguiente aspecto:

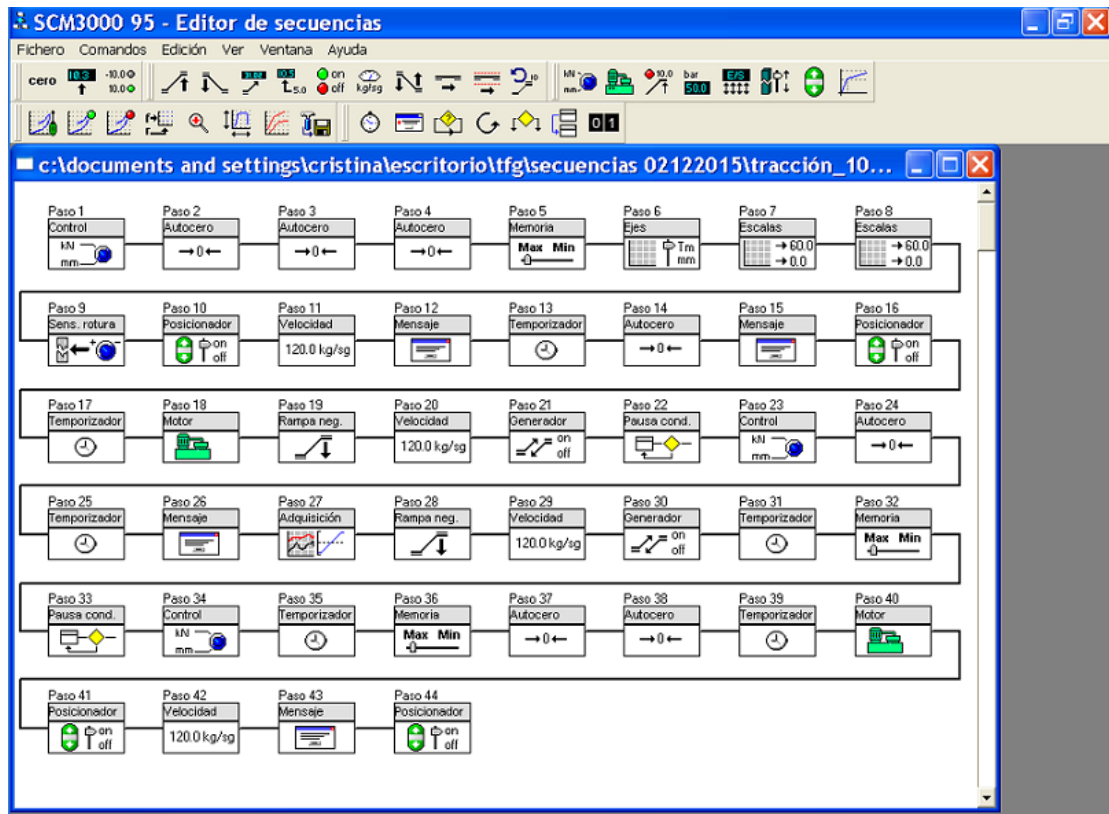


Fig. 3.16 Editor de secuencias de SMC 3000

En la parte superior se puede encontrar una fila con todos los comandos disponibles. Si se pulsa sobre ellos son añadidos directamente al nuevo documento abierto. Este programa permite tener varias secuencias abiertas a la vez.

Funciona de forma parecida a un editor de textos, permitiendo guardar, cargar, o modificar archivos, imprimir secuencias...etc.

Dentro del menú comandos se seleccionan las funciones que se quieren insertar en la secuencia.

Dichos comandos se pueden eliminar, editar, modificar o cambiar por otro en cualquier momento, con el acceso a la barra de opciones al pulsar el botón derecho del rato sobre dicho comando.

COMDANDOS DE LECTURA

Activan y modifican funciones que afectan a la presentación de las lecturas en el canal en el panel de control.



Autocero: Activa o desactiva el autocero de un canal.



Canales a presentar en displays



Memoria: Activa la memoria del canal, para que en el panel de control retenga el máximo valor.

COMANDOS DE CONTROL POSICION

Relacionados con el movimiento de la máquina.



Rampa a positivo: Produce movimiento en el sentido de la compresión. Se introduce el parámetro objetivo y el valor de consigna, y si se prefiere que la variación sea absoluta o relativa al valor actual.



Rampa a negativo: Produce movimiento en el sentido de la tracción. Se introduce el parámetro objetivo y el valor de consigna, y si se prefiere que la variación sea absoluta o relativa al valor actual.



Control de retorno rápido: como indica su propio nombre, produce un retorno a la máxima velocidad de la máquina.



Salto a un punto de consigna: Produce un movimiento directo a un punto fijado.



Control del generador: Arranca o detiene el generador hasta o desde un valor de consigna.



Velocidad de rampa: Cambia la velocidad de rampa a la que el operador determine.



Función alternante: Activa una rampa a positivo y a negativo de manera alternante un número de ciclos designado.



Mantenedor: mantiene la consigna actual durante un tiempo determinado.



Mantenedor entre dos límites: mantiene la carga entre dos límites durante un tiempo prolongado.



Reset de final de rampa.

COMANDOS DE CONTROL

Contienen funciones críticas de la máquina de ensayos como la marcha o parada del motor, control de presión...



Variable de control: Selecciona con qué variable opera la maquina: fuerza o posición.



Control del motor: marcha o parada del mismo.



Puntos de parada por alarma: Establece parada cuando algún parámetro llega a un límite establecido



Control de la presión: Permite activar o desactivar la presión.



Control de accionamientos: Puede variar acciones que se toman desde el panel de control.



Sensibilidad de rotura: Permite definir un porcentaje de sensibilidad de rotura (será la caída de fuerza instantánea por el cual se considera rotura en la probeta) que produzca parada del generador.



Control del joystick: activa o desactiva el joystick manual de la máquina para poder mover el brazo superior y permite fijar una velocidad de movimiento del mismo.



Control de la acción integral: Permite controlar, activas o desactivar la acción PID

COMANDOS DE ADQUISICION DE DATOS

Asociado a la adquisición y presentación de datos en tiempo real



Configurar adquisición de datos: Llama a un fichero de adquisición de datos que se puede crear o modificar desde el panel de control y que varía funciones como cuándo parar de tomar datos.



Arrancar adquisición: Hace que se comience a efectuar la adquisición de datos.



Detener adquisición de datos.



Definir ejes presentación: Da la opción de elegir los ejes de representación de la grafica que podremos visualizar en el panel de control a tiempo real.



Escalas de presentación: Permite determinar los valores máximos y mínimos de los ejes de dicha grafica.



Autoescala automática: como indica su nombre, escala la gráfica dependiendo de los valores máximos en cada momento.



Presentar puntos de control: Permite llamar a un fichero de puntos de control para representarlos en la misma grafica del panel de control.



Acciones durante la adquisición de datos: Permite cargar un archivo y programa run conjunto de acciones en función de los valores que se obtengan en el ensayo.

COMANDOS CONTROL DE SECUENCIA

Reúne funciones asociadas al control del flujo de la secuencia.



Pausa temporizada: Introduce pausa durante un tiempo determinado.



Ventana de mensaje: Hace que aparezca una ventana con un mensaje al usuario en el panel de control, que se ha de cerrar dándole a aceptar.



Esperar condición: Introduce una pausa hasta que se cumpla una condición, relacionada con que cierto valor de un canal sea mayor o menor o igual a un valor de

consigna, o se pare el generador o se rompa la probeta, lo cual produce que se pase al siguiente comando de la secuencia.



Bucles: permite repetir un grupo de comandos de la secuencia.



Salto condicional a otro comando: saltar de un comando otro en función de una condición se cumpla o no.



Salto a un comando de la secuencia: sin condición, determina el comando con el que se quiere que continúe la secuencia.



Contador de ciclos de ejecución de la secuencia: en el caso de bucles y saltos, registra el valor de los ciclos ejecutados.

3.4. Software VE 1002

Con este software, el usuario puede calibrar y configurar la medida del videoextensómetro, ajustar la imagen recibida por el mismo para la mejor precisión de medidas y visualizar en tiempo real las medidas obtenidas. Funciona reconociendo pares de marcas en la probeta, a través del cambio de color de las mismas con respecto al fondo (resto de probeta).

El software puede abrirse desde el propio panel de control de SMC3000, puesto que el panel del mismo tiene dos opciones: toma de datos con o sin videoextensómetro.

Si se pulsa la opción del videoextensómetro, directamente se abre el panel de control de VE 1002, el cual tiene el siguiente aspecto:

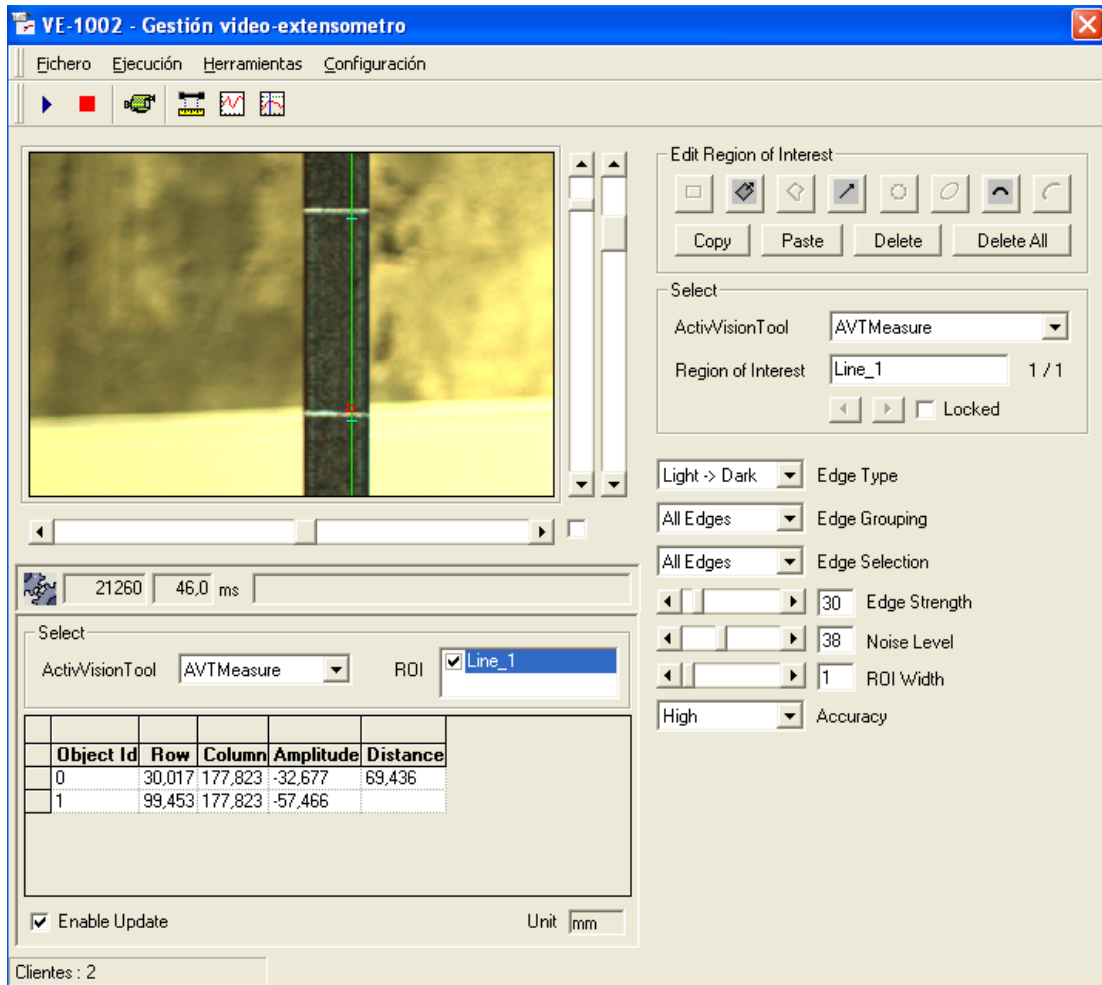


Fig. 3.18 Panel de control VE 1002

En él se puede ver la captura de imagen a tiempo real del videoextensómetro, una tabla de lectura de datos en tiempo real, un menú y barra de herramientas, la configuración de la región de interés y los parámetros de medida.

En el menú se puede configurar la capturadora, poniendo el tipo de cámara con la que se toman imágenes.

También se puede calibrar el sistema de medidas en el menú Herramientas-calibración. Esta opción permite darle un valor de longitud real (mm, pulgadas...) a una

longitud determinada en la imagen tomada. Cuando se haya activado el cuadro de calibración, se activará en el panel principal, dentro de “Editar Región de interés” un pulsador en forma de flecha. Una vez pulsado, se crea una flecha sobre la imagen, que va desde dos puntos de la probeta (cuya distancia real se ha medido inicialmente).

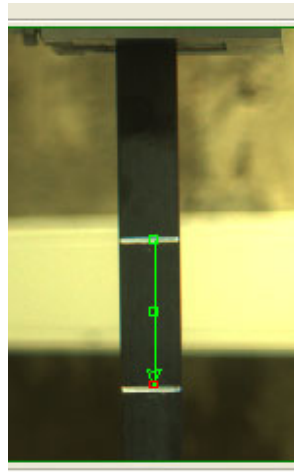


Fig. 3.19 Asignación flecha: distancia entre marcas

Normalmente será la distancia entre las dos líneas marcadas sobre la probeta. Una vez creada esa flecha cuyo origen y destino son dos puntos de distancia real conocida, se introduce en el cuadro de calibración dicha distancia. Es de esta manera como se relaciona distancia real con distancia de pixel. Esta conversión pixel-longitud real la hará directamente el programa durante todo el ensayo una vez se haya determinado ese valor inicial.

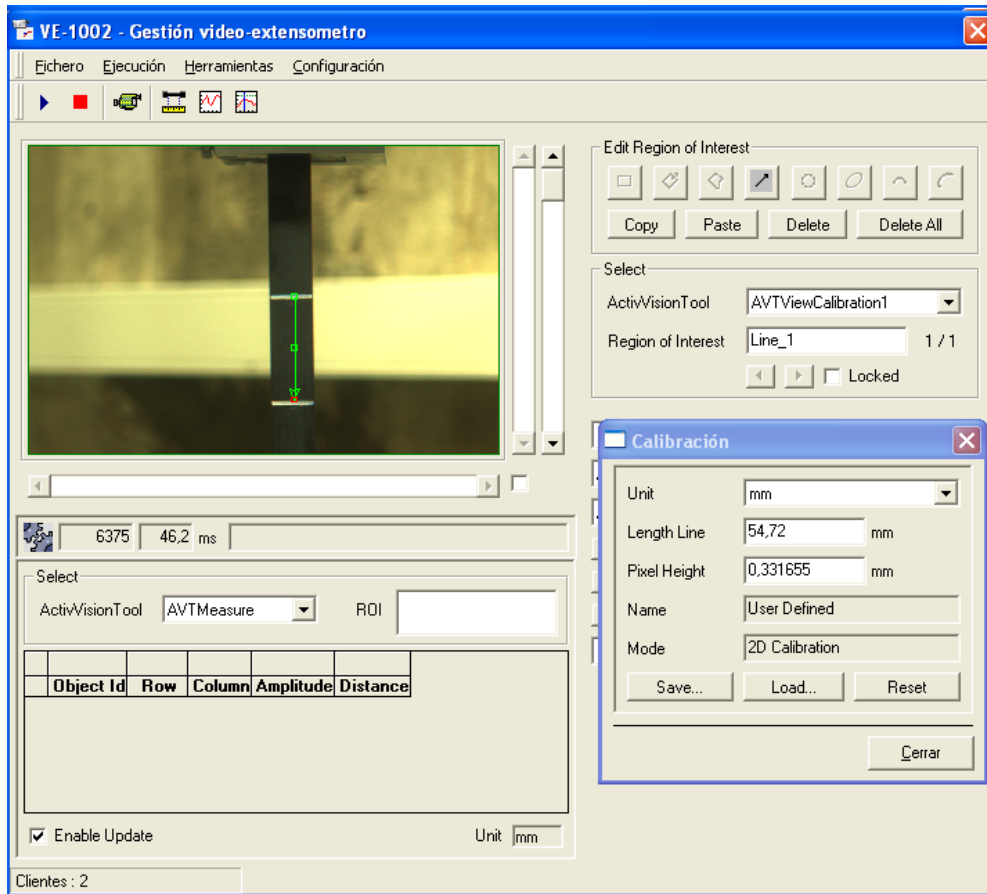


Fig. 3.20 Calibración de la longitud inicial en VE 1002

La zona de presentación de la imagen muestra la imagen capturada. Ésta puede aumentarse a través de la segunda barra vertical, y se puede desplazar dentro de la misma a través de la barra horizontal y la primera vertical.

Debajo de la imagen hay un recuadro que muestra el estatus de la captura, así como el tiempo desde que se inició la captura de imágenes.

La velocidad a la que el sistema toma imágenes depende de varios factores, principalmente el tipo de cámara empleada (analógica o digital) así como el interface empleado, y el propio PC, puesto que dependerá de la memoria RAM y la tarjeta grafica del mismo.

La configuración de la región de interés permite seleccionar dentro del cuadro de la imagen capturada un área a tener en cuenta, de modo que el propio programa deseche el resto de la imagen y solo centre la obtención de resultados en dicha área. Esto es muy útil para que el programa no tome otras marcas que no sean las de la propia probeta.

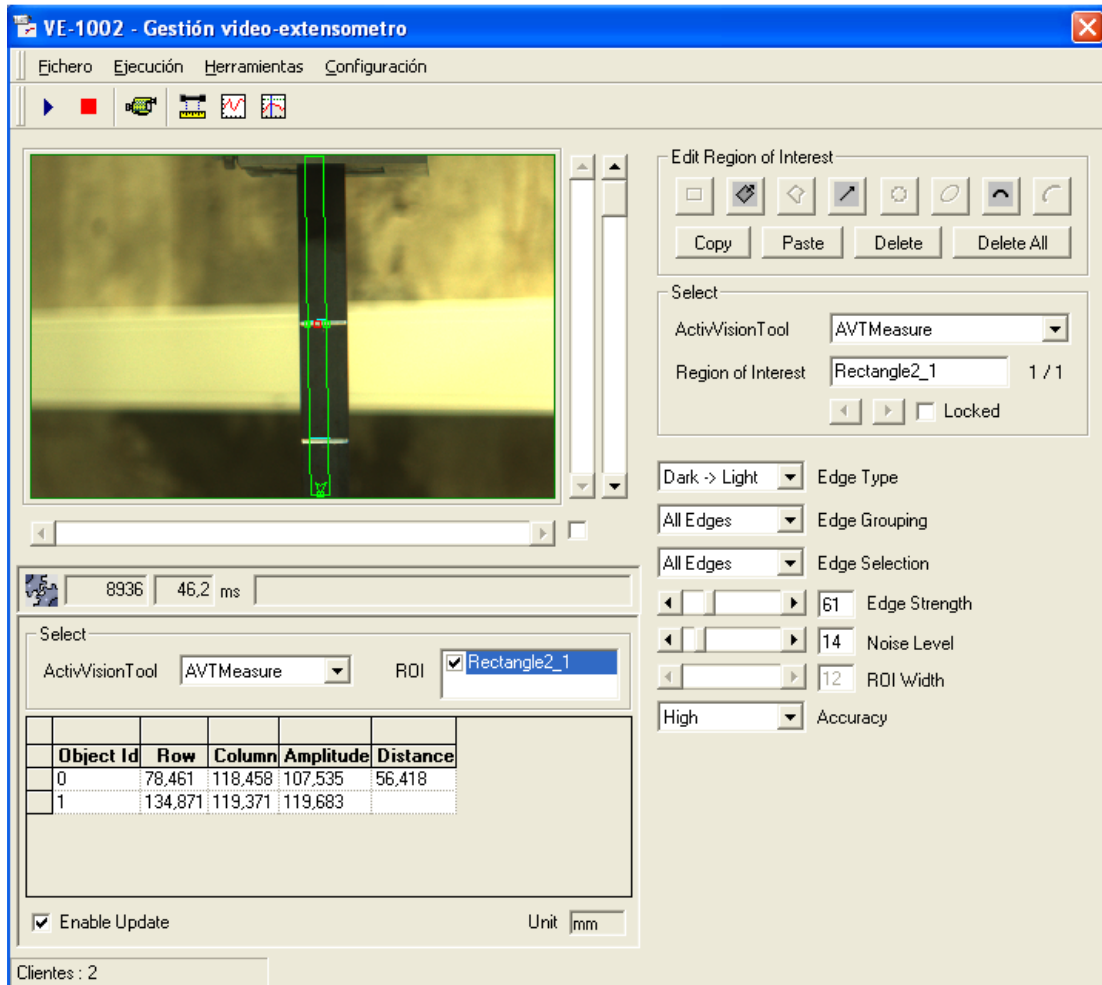


Fig. 3.21 Configuración de región de interés en VE-1002

Los parámetros de medida permiten seleccionar qué aristas tomara el programa para calcular los datos (esto depende de si son marcas negras sobre una superficie clara o al contrario, así como si queremos que tome solo un par de marcas o un grupo de ellas).

También se puede regular la detección de la imagen por parte del programa jugando con la intensidad y el nivel de ruido, para poder conseguir que el software pase por alto líneas de la propia probeta que puedan ser tomadas como marcas por el captador y no lo sean.

El ensayo se lleva a cabo con los dos programas, VE-1002 y SMC 3000, funcionando a la vez, de modo que la medida de distancia del videoextensómetro obtenida por el primero se convierte en la señal de uno de los canales de medida del SMC.

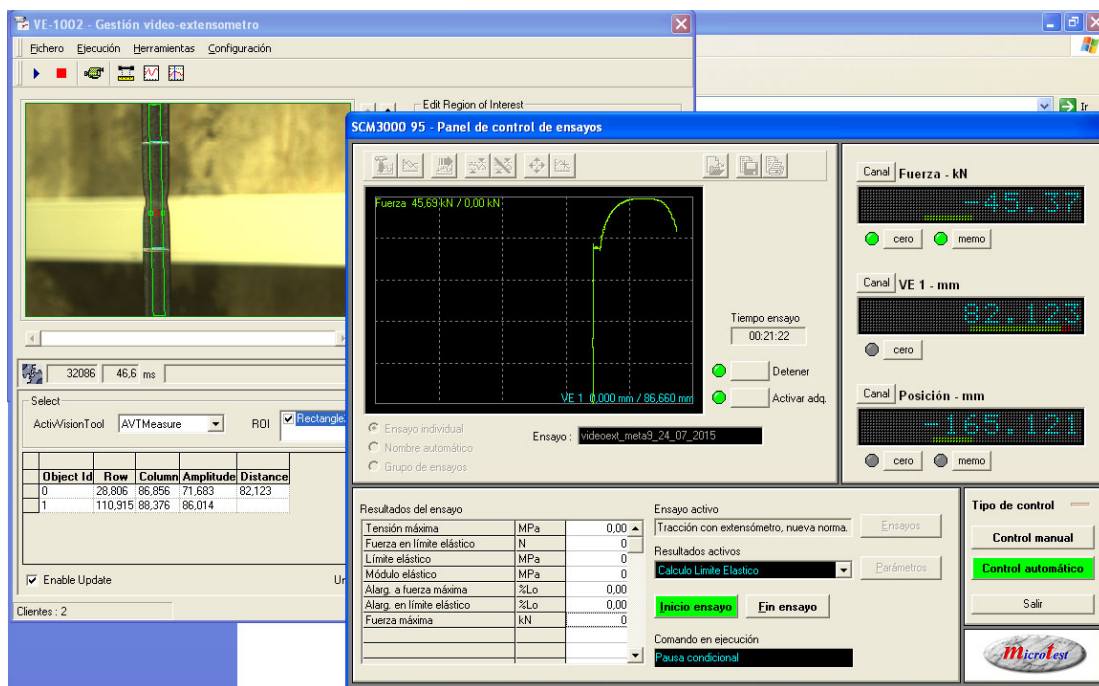


Fig. 3.22 Panel de control de SMC3000 y VE-1002.

3.5. Preparación de probetas

Antes de llevar a cabo el ensayo se deben preparar las probetas y realizar las marcas iniciales en las mismas. Dicha distancia vendrá dada, dependiendo del ensayo a realizar, por la normativa aplicable a cada material.

Estas marcas deberán de ser de un color intenso, que provoque un gran contraste con la superficie de la probeta. En el caso de tener un material oscuro, se recomienda hacer marcas con un rotulador de tinta fuerte y sin brillo que sea de un color claro. En el caso de ensayo con aceros, por ejemplo, se utiliza un color blanco mate.

Si, por el contrario, el material a ensayar es de color claro, las marcas se deberán hacer con un rotulador negro.

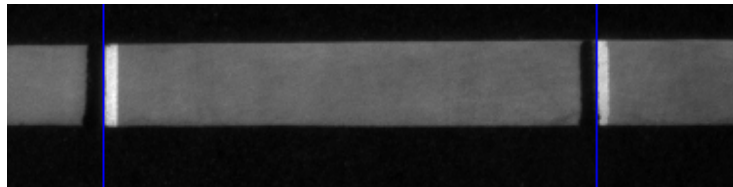


Fig. 3.23 Ejemplo de señalización de probeta y detección digital de marcas.

La superficie de las probetas debe de ser uniforme y no tener marcas de ningún tipo, por lo que se recomienda limpiarla o, en caso de probetas metálicas, lijarla ligeramente.

Antes de llevar a cabo el ensayo, y una vez la probeta está ya colocada en las mordazas, se posiciona la cámara a una distancia suficientemente cercana para que la captura de imágenes sea óptima, y suficientemente alejada para que la imagen capturada contenga toda la probeta al terminar el ensayo, teniendo en cuenta la deformación de la misma.

4. Ensayos de tracción y programación de secuencias.

4.1. Materiales a ensayo.

Con el objetivo de obtener datos sobre la deformación de diversos materiales con el videoextensómetro, se han querido realizar ensayos de tracción con la máquina de Ensayos Microtest del laboratorio de Resistencia de materiales del Departamento de Estructuras, Construcción y Expresión Gráfica situado en el edificio ELDI de la UPCT sobre materiales que se comportasen de manera muy diferente cuando son sometidos a esfuerzos.

Los objetos de estudio que se escogieron para realizar ensayos de tracción fueron probetas de acero, cuerda y tela.

ACERO

El acero es un material que ofrece una gran resistencia a la tracción. Tiene altos valores de límites elásticos, por encima de los 200 MPa, así como una tensión de rotura que puede llegar a superar los 800 MP dependiendo del tipo de acero. Este material tiene bajas velocidades de deformación, llegando a la rotura tras sufrir un escaso alargamiento.

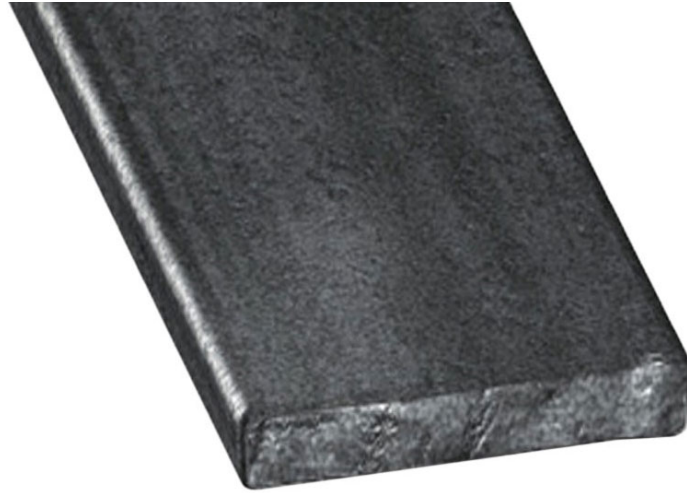


Fig. 4.1 Probeta de acero seccionada.

Con respecto al tipo de extensómetro a utilizar, en el caso del acero se puede utilizar tanto un extensómetro de contacto como de no contacto. Para el estudio de la deformación del acero se suelen utilizar galgas extensométricas aprovechando el carácter conductor del material.

Dado que la superficie del mismo no sufre grandes variaciones durante el proceso de tracción, también es un material óptimo para ser objeto de estudio utilizando extensómetros clip-on.

CUERDAS

Por contraposición, las cuerdas precisan de poca carga y pueden llegar a tener grandes deformaciones, dependiendo del tipo.

Durante la tracción, las cuerdas y telas pueden llegar a sufrir un gran aumento de longitud en detrimento del área transversal (dependiendo de la elasticidad de las mismas),

produciéndose en algunos casos ruptura de los hilos que las componen (generalmente, aquellos que se encuentran en la superficie) antes de llegar a la rotura de la probeta. A parte de que un extensómetro clip-on convencional (sin brazo tensor) no es capaz de medir un alto rango de longitudes, la propia deformación de la superficie del material puede producir que el extensómetro no se adhiera bien a la superficie, provocando errores de medida.



Fig. 4.2 Cuerda sintética.

4.1. Normativa de ensayos de tracción.

Para llevar a cabo los distintos ensayos se ha utilizado de guía la normativa UNE-EN ISO sobre los ensayos de tracción de cada tipo de material. Es en base a la misma por la cual se han redactado las distintas secuencias de ensayos para materiales.

A continuación, se procede a explicar dicha normativa de forma resumida para cada uno de los materiales y ensayos con el objetivo de adaptar el procedimiento de ensayo a una secuencia para cada tipo de material.

4.1.1. Ensayos de tracción con materiales metálicos: UNE-EN ISO 6892-1

La norma de referencia para el ensayo de tracción para materiales metálicos es la *UNE-EN ISO 6892-1 2010: Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente.*

A continuación, se procede a definir los distintos términos que son necesarios conocer para comprender la norma.

L_0 : Longitud inicial entre puntos (al inicio del ensayo)

L_u : Longitud final entre puntos (al finalizar ensayo)

L_c : Longitud calibrada, es la longitud de la parte de la probeta que tiene una sección más reducida. En el caso de probetas no mecanizadas, dicha longitud se tomará como la longitud entre mordazas.

L_e : Longitud base del extensómetro, que es la longitud inicial que se utiliza como base para el extensómetro que vayamos a utilizar.

S_0 : Área de la sección transversal inicial de la parte calibrada. En nuestro caso será la sección de la probeta, puesto que es de sección constante.

Velocidad de deformación: incremento de la deformación, medida por un extensómetro, en la longitud base del extensómetro (L_e) por unidad de tiempo.

Velocidad estimada de deformación de la longitud calibrada: incremento de la deformación en la longitud calibrada (L_c) por unidad de tiempo, basada en la velocidad de separación de las mordazas. Desplazamiento de las mismas por unidad de tiempo.

Como se parte de productos de sección constante, no es necesario mecanizar las probetas disponibles en el laboratorio.

Velocidad de ensayo

La longitud inicial entre puntos tendrá un valor de $L_0 = k \cdot \sqrt{S_0}$ con $k = 5,65$. Ésta es la longitud que habrá entre las marcas iniciales para la medida del alargamiento.

La longitud del extensómetro L_e debe de hallarse entre $0.5L_0$ y $0.9 L_c$, como L_0 es bastante menor que L_c , por simplicidad se ha definido $L_e=L_0$, que siempre cumple con este requisito.

La velocidad de ensayo puede estar basada en 2 métodos: por control de la velocidad de deformación y por control de puesta en carga. Se recomienda el primer método porque en cualquier caso se pide que la velocidad de deformación sea lo más constante posible, y éste minimiza la variación de las velocidades de ensayo.

A continuación, se describe dicho método, que es el que he seguido para crear la secuencia de ensayo.

Se pueden utilizar dos tipos de velocidades, a partir de la longitud calibrada y a partir de la longitud del extensómetro. Como en el software de la máquina de ensayos no se puede obtener la longitud del extensómetro como parámetro para calcular la velocidad de deformación en cada momento, se utiliza siempre la longitud calibrada, puesto que la norma nos permite esta licencia.

En dicho caso, la velocidad de deformación de las mordazas será $V_c = L_c \cdot E_{lc}$

L_c se determinará al amarrar la probeta con las mordazas, y será la longitud entre las mismas una vez colocada la probeta y E_{lc} es un valor que varía dependiendo de qué parámetro queremos hallar.

- Para la determinación del límite superior de cedencia, o las propiedades del límite elástico convencional y límite de alargamiento: $0.00007 \leq E_{lc} \leq 0.00025$
- Para la determinación del límite inferior de cedencia y la extensión porcentual del escalón de cedencia: $0.00025 \leq E_{lc} \leq 0.002$
- Para la determinación de la resistencia a la tracción, alargamiento porcentual a la rotura, extensión total porcentual bajo fuerza máxima, extensión plástica porcentual bajo fuerza máxima y coeficiente de estricción: $0.00025 \leq E_{lc} \leq 0.002$ y 0.0067 , el cual se recomienda en caso de que solo queramos hallar resistencia a la tracción.

En este caso se desea hallar el diagrama de tensión-deformación, en el que influyen las propiedades elásticas y plásticas, por lo que el valor a utilizar es el de 0.00025 .

Por tanto, la velocidad de deformación de las mordazas será de $V_c = L_c \cdot 0.00025$.

Para llevar a cabo el ensayo, se tendrá que llevar la probeta desde una tensión inicial nula hasta la rotura a dicha velocidad. El ensayo será válido siempre y cuando la rotura y el alargamiento localizado (estricción) tengan lugar dentro de la longitud base del extensómetro.

4.1.2. Ensayos de tracción con cuerdas de fibra: UNE-EN ISO 2307

La norma en la que se han basado los ensayos realizados sobre cuerdas es la norma UNE-EN ISO 2307:2011 Cuerdas de fibra. Determinación de ciertas propiedades físicas y mecánicas.

En este caso, interesa obtener la medición del alargamiento de la cuerda y la curva de fuerza-alargamiento.

En el laboratorio se tienen disponibles mordazas de tipo “corneta de caza” (Fig. 4.4) y, por tanto, se utiliza este método de agarre para realizar el ensayo de tracción. La única especificación para utilizarlas es que el diámetro de la mordaza sea, al menos, diez veces superior al diámetro de las cuerdas con las que se ensaye.

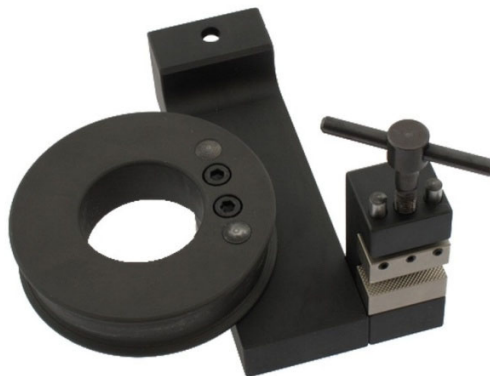


Fig. 4.4 Mordaza tipo corneta de caza para ensayos con cuerdas y cables

La tensión de referencia se obtiene de la tabla A.1 de esta norma, dependiendo del número de referencia de la cuerda. La fuerza de rotura de la cuerda vendrá dada por el fabricante, y si no es así, se ha de realizar un ensayo de rotura de la cuerda hasta hallarla.

La velocidad de ensayo es constante: $V = 250 \pm 50$ mm/min.

Alargamiento

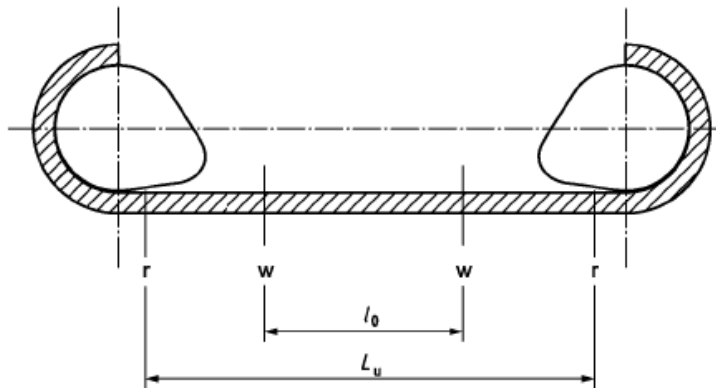
Antes de realizar el ensayo, se debe realizar unas marcas en cada probeta a ensayar.

El primer par de marcas “r-r” delimita la longitud efectiva L_u , que se trataría del tramo de cuerda en el que se considera normal la rotura de ésta cuando se realiza el ensayo de tracción hasta rotura. Según la norma, la longitud mínima L_u ha de ser de 400 mm para cuerdas con un número de referencia ≤ 10 .

El segundo par de marcas, denominado “W-W” y separado por la longitud inicial l_0 , es el par de marcas que se monitorizará para medir el alargamiento de la cuerda. Debe tener una longitud entre ellas de al menos 400 mm y estar contenido dentro del tramo “r-r” (L_u). La distancia entre estas marcas y el extremo del empalme será como mínimo de dos veces el diámetro de la cuerda.

La probeta debe tener una longitud entre los extremos (mordazas) adecuada para contener la longitud efectiva L_u .

En la figura 4.5 se muestra un esquema de las marcas en la probeta colocada en las mordazas de la máquina de ensayos.



Leyenda

- r Marcas delimitadoras para el ensayo normalizado
- L_u Longitud efectiva medida sin tensión
- w Marcas delimitadoras para l_0

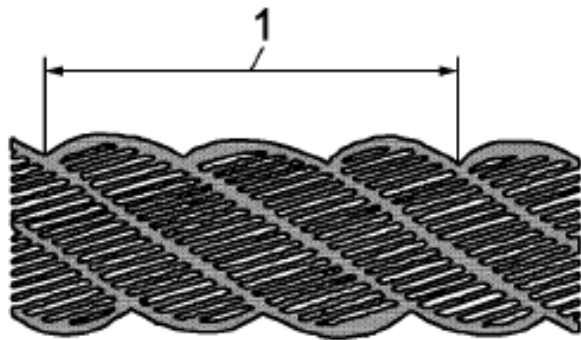
Figura 2 – Longitud efectiva, L_u , en máquinas de ensayo del tipo "corneta de caza" aplicadas a cuerdas de número de referencia < 20

Fig. 4.5 Esquema de marcas sobre cuerdas según UNE-EN ISO 2307:2011

Así pues, se han de señalar los dos pares de marcas separados por las longitudes inicial y efectiva, l_0 y $L_u \geq l_0$.

Adicionalmente, se pueden obtener otros parámetros durante el ensayo que pueden ofrecer datos sobre el comportamiento de la cuerda.

- Longitud de paso es la longitud en la que un cabo en cuerda retorcida da una vuelta entera. Se mide la longitud del número máximo de pasos posibles dentro de L_u . Esta longitud se obtiene a la tensión de referencia.



Leyenda

1 Un paso en una cuerda de 3- cabos

Fig. 4.6 Longitud de paso según UNE-EN ISO 2307:2011

- Longitud de galga l_2 es la longitud entre las marcas W a tensión de referencia.
- Longitud de galga al 50% de la fuerza de mínima de rotura, l_3 . Se trata de la longitud entre las marcas W. Esta medida se realiza tras aplicar una carga cíclica de tres veces entre la tensión de referencia y el 50% de la fuerza de mínima de rotura.
- Alargamiento. Se calcula según la siguiente fórmula:

$$E = \frac{(l_3 - l_2)}{l_2} \cdot 100$$

Rotura

La fuerza de rotura es la fuerza a la cual se produce la rotura de al menos un cabo de la cuerda. Es necesario disponer de dicho dato antes del ensayo, puesto que durante el ensayo se aplica una carga cíclica hasta el 50% de la fuerza de mínima de rotura.

Un breve resumen de los pasos a seguir para la medida del alargamiento de cada probeta se muestra a continuación:

- l_0 = distancia entre W-W inicial.
- Se lleva la probeta a tensión de referencia y se mide l_2 = distancia entre W-W.
- Después se aplica una carga alternante de tres ciclos entre la tensión de referencia y el 50% de la fuerza de rotura, y cuando acaba, l_3 = distancia entre W-W con $F=50\%$ fuerza de rotura.
- Una vez medida l_3 , se sigue aumentando la fuerza hasta que la probeta rompa.
- Se considera correcto el ensayo si la probeta rompe entre las marcas "r".

Se registra el alargamiento $E = \frac{(l_3-l_2)}{l_2} \cdot 100$ (%) y la fuerza de rotura.

Ensayo real - adaptaciones

Durante la realización de los primeros ensayos (ver punto 5.2.1) no se consiguió la ruptura en las cuerdas debido a que el alargamiento de estas (en concreto de las cuerdas más finas) era muy grande para las dimensiones de la máquina de ensayos disponible, Esto provocaba que no se pudiese finalizar los ensayos ni llevar las cuerdas a rotura. Por este motivo, se realizó una adaptación del ensayo a las dimensiones de la máquina, de modo que, para la cuerda más fina, la longitud efectiva pasó a ser de $L_u=200$.

Adicionalmente, y puesto que el campo de visión de la cámara ha de ser lo más estrecho posible para una obtención de datos más precisos, la medida entre marcas inicial seleccionada fue de $l_0=50$ mm.

Puesto que la información que se desea obtener de estos ensayos es la curva de deformación de la muestra y la medida del alargamiento de cada probeta, no se realiza el ciclo hasta rotura durante todos los ensayos de deformación, sino que solo se realiza para los ensayos previos, con el objetivo de obtener el dato de tensión de rotura característica de cada cuerda.

4.2. Secuencias programadas

4.2.1. Secuencia de ensayo de tracción para materiales metálicos.

A continuación, se procede a explicar la secuencia creada con el módulo “Editor de secuencias” del software SMC 3000.

El esquema de la secuencia es el siguiente:

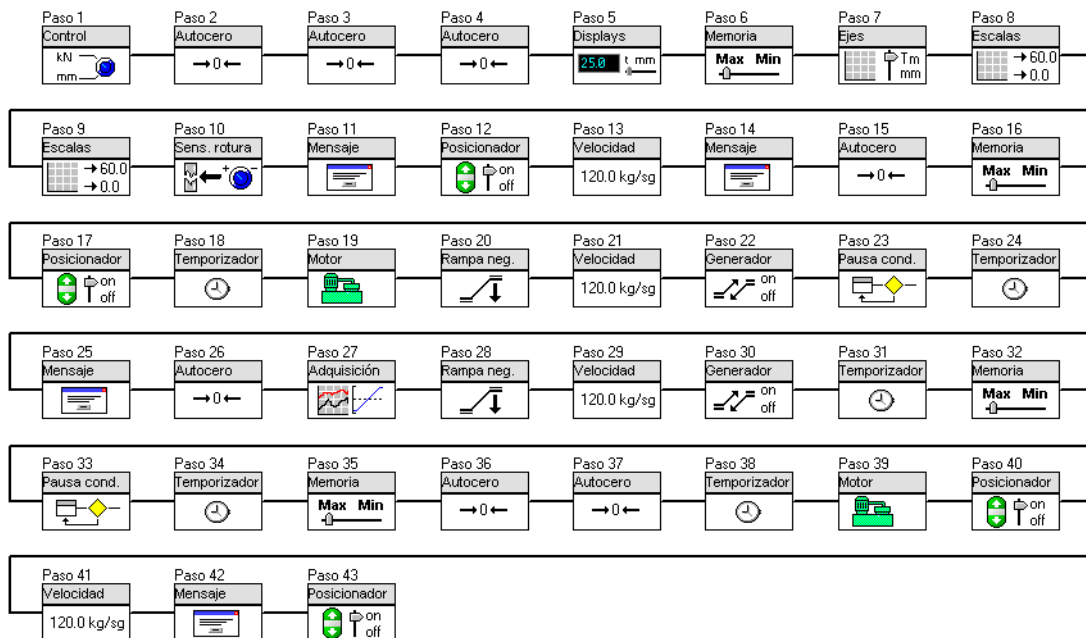


Fig. 4.7 Secuencia para ensayo de tracción con materiales metálicos

Se comienza poniendo la maquina en control por posición (1). A continuación, se desactiva el autocero de los parámetros de videoextensómetro, posición y fuerza (por si se hubiese mantenido activo de ensayos previos). (2, 3, 4)

Se define qué variables se quiere que aparezcan en los displays de la pantalla del panel de control, en este caso: posición, fuerza y medida del videoextensómetro. (5)

Se desactiva la memoria en el canal de fuerza (por si estuviese activada de ensayos previos). (6)

Se programa que en el panel de control aparezca una gráfica con ejes Fuerza vs videoextensómetro y se escalan. (7, 8, 9)

Se fija una sensibilidad a la rotura del 25%, esto es, que cuando detecte una bajada de la fuerza de esa envergadura el software supondrá que la pieza se ha roto. (10)

Llegado a este punto, aparecerá el siguiente mensaje: “COLOCAR PROBETA EN MORDAZA SUPERIOR”. (11)

Se activa el posicionador manual para que podamos moverlo a una velocidad alta (75 mm/min). (12, 13)

Ahora que ya se puede mover el puente móvil, se programa que aparezca le siguiente mensaje: “APROXIMAR PUENTE MOVIL Y FIJAR PROBETA EN MORDAZA INFERIOR”. (14)

Una vez realizado este paso y colocada la probeta en las mordazas, el canal de fuerza se activa en autocero, así como la memoria del mismo. (15, 16)

Se desactiva la posibilidad de utilizar el posicionador manual (17) y se activa la marcha en el motor. (19)

Se pone en marcha el movimiento, una rampa negativa de -0.10 kN, velocidad de 2 mm/min y el generador. Este paso es para fijar la probeta con una fuerza pequeña pero que asegure que está estirada en tensión. (20, 21, 22). Cuando llega al final de dicha rampa el generador para. (23)

Ya que se encuentra la probeta en condiciones de comenzar el ensayo, aparecerá el siguiente mensaje: “DAR NOMBRE AL ENSAYO Y PULSA ACEPTAR” para guardar el ensayo con un nombre fijado en la carpeta del sistema. (25)

Se activa el autocero en el canal de la medida del videoextensómetro (26), la adquisición de datos (para que puedan guardarse) (27) y se programa una rampa negativa, con final de rampa 100 kN. La velocidad del ensayo³ se podrá cambiar al principio del ensayo dependiendo del tamaño de la longitud calibrada. Se pone en marcha el generador. (28, 29, 30)

Se activa la memoria en el canal de fuerza, para que quede registrado el mayor valor y pueda calcular la caída de tensión cuando hay rotura y detectarla. (32)

EL generador se para cuando llegue al fin de rampa o cuando se detecte la rotura, que será el caso en las muestras a ensayar. (33)

Posteriormente, se desactiva la memoria, los autoceros (35, 36, 37), se para el motor (39) y se activa el posicionador manual con una velocidad alta (7 mm/min). (40, 41)

Aparecerá el siguiente mensaje “ENSAYO FINALIZADO, RETIRAR PROBETA”. (42)

Una vez aceptado, se desactiva el posicionador manual. (43)

³ La velocidad de ensayo en un parámetro que se ha de fijar en el panel de control antes del ensayo, puesto que depende de la distancia entre mordazas, variable en cada ensayo ($V_c = L_c \cdot 0.00025$).

4.2.2. Secuencia de ensayo de tracción para cuerdas sintéticas

A continuación, se procede a explicar la secuencia creada con el módulo “Editor de secuencias” para los ensayos con cuerdas según la normativa antes mencionada.

La secuencia es la siguiente:

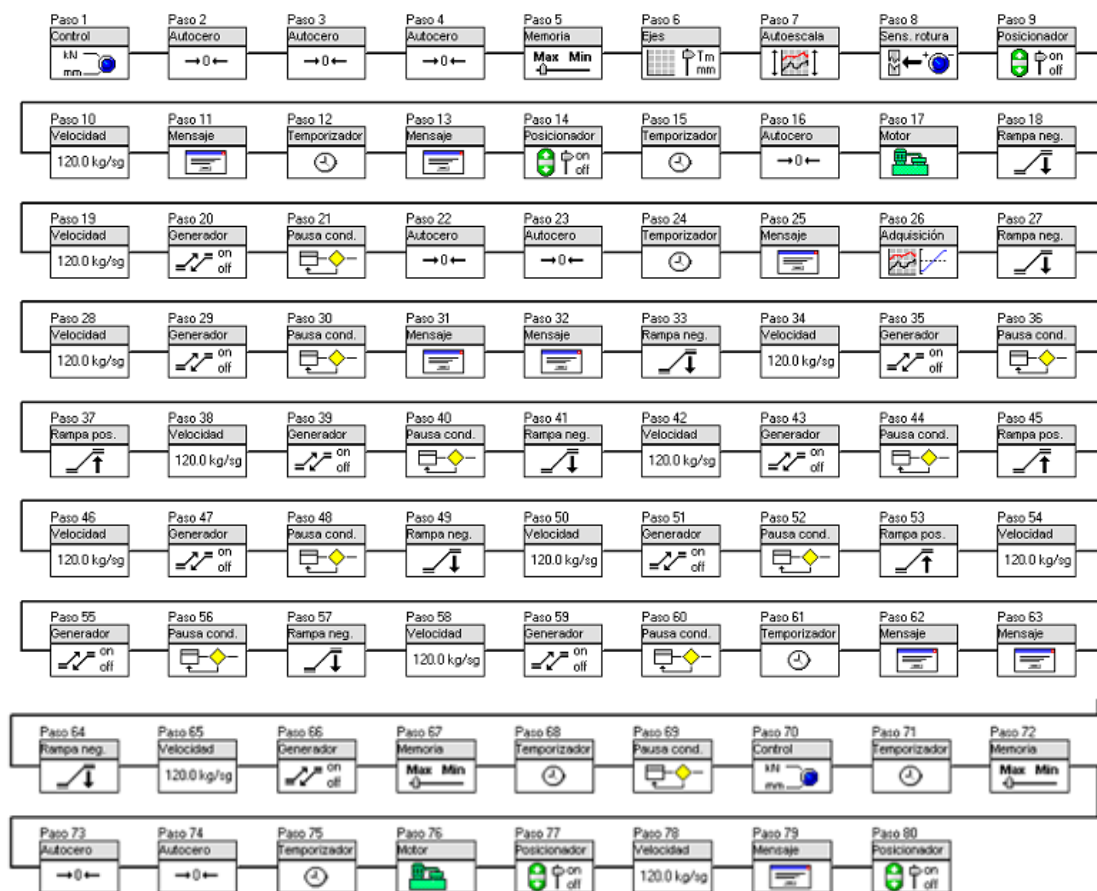


Fig. 4.8 Secuencia para ensayos de tracción con cuerdas

Se comienza poniendo la maquina en control por posición. (1)

A continuación, se desactiva el autocero de los parámetros de videoextensómetro, posición y fuerza y la memoria en el canal de fuerza. (2, 3, 4, 5)

Se definen las variables que queremos que aparezcan en los displays de la pantalla del panel de control, en este caso, posición, fuerza y medida del videoextensómetro. (6)

Posteriormente, se programa que en el panel de control aparezca una gráfica con ejes Fuerza vs videoextensómetro y se escalan. (7)

Se selecciona una sensibilidad a la rotura del 25%, esto es, que cuando detecte una bajada de la fuerza de esa envergadura, supondrá que en la pieza ha habido ruptura. (8)

Se activa el posicionador manual para que se pueda mover a una velocidad alta (75 mm/min). (9, 10)

A continuación, aparecerá el siguiente mensaje: "COLOCAR PROBETA EN MORDAZA SUPERIOR". (11)

Una vez colocada la probeta, y se pulse aceptar en dicho mensaje, aparecerá el siguiente mensaje: "APROXIMAR PUENTE MOVIL Y FIJAR PROBETA EN MORDAZA INFERIOR". (13)

Se desactiva la posibilidad de utilizar el posicionador manual. (14)

Una vez finalizado este paso, se activa en el canal de fuerza el autocero (16) y la marcha en el motor. (17)

Se comienza con una rampa negativa de -0.05 kN, velocidad de 50 mm/min y se pone en marcha el generador. Este paso es para tensar la probeta con una fuerza pequeña y asegurar que está estirada. (18, 19, 20) Cuando llega al final de rampa, el generador para. (21)

Se activa el autocero en el canal de la medida del videoextensómetro y en el canal de fuerza. (22, 23)

Ya que se tiene la probeta en condiciones de comenzar el ensayo, aparecerá el siguiente mensaje: “DAR NOMBRE AL ENSAYO Y PULSA ACEPTAR” para guardar dicho ensayo con un nombre fijado en la carpeta del sistema. (25)

Se activa la adquisición de datos (para que puedan guardarse) (26), se fija una rampa negativa, con final de rampa igual a la tensión de referencia de la cuerda y velocidad la del ensayo 25 mm/min y se pone en marcha el generador (27, 28, 29). El movimiento parará cuando llegue a la tensión de referencia. (30)

Entonces aparecerá un mensaje que pondrá: “MIDE LONGITUD DE PASO Y LONGITUD DE GALGA” (31), momento en el que se aproveche para realizar esa medida. Tras cerrarlo, aparecerá otro a continuación que pone “¿HAS MEDIDO LONGITUD DE PASO Y DE GALGA? CONTINÚA ENSAYO DE ALARGAMIENTO”. (32)

Se activa una rampa negativa con límite igual al 50% de la fuerza mínima de rotura de dicha cuerda, a la misma velocidad. Posteriormente, se activa el generador, y termina el movimiento cuando llegue a esa fuerza. (33, 31, 35, 36)

A continuación, se selecciona una rampa positiva con límite igual a la tensión de referencia y se vuelve a activar el generador. (37, 38, 39, 40)

Estos últimos ocho pasos se repiten dos veces más, debido a que la norma requiere que se realicen tres ciclos alternantes antes de volver al 50% de fuerza mínima de rotura. (41-60)

Cuando se terminan estos tres ciclos, aparecerá el siguiente mensaje: “ALARGAMIENTO: MEDIMOS DISTANCIA ENTRE MARCAS L3” (62) y se avisa de que

se va a continuar con el ensayo con el siguiente mensaje “ROTURA: SIGUE TRACCIÓN HASTA QUE SE ROMPA 1 CABO. PARAR ENSAYO ENTONCES”. (63)

A continuación se selecciona una rampa negativa de 10 kN y se activa la memoria en el canal fuerza. El ensayo parará cuando la maquina detecte una rotura por la sensibilidad a rotura que tenemos activada del 25%. (64, 65, 66, 67, 69)

Ahora que ha acabado el ensayo, se vuelve a activar el control por posición, desactivando autocero y memoria, parando el motor y activando el posicionador manual con una velocidad alta (75 mm/min). (70-78)

Aparece el siguiente mensaje “ENSAYO FINALIZADO, RETIRAR PROBETA”. (79)

Una vez aceptado, se desactiva el posicionador manual. (80)

Nota: todos los límites de rampa (tensión de referencia y 50% de fuerza de rotura) se fijan antes del ensayo en el propio panel de control, debido a que no son valores fijos sino que dependen de la cuerda a ensayar (la tensión de referencia viene dada en la tabla A.1 de la norma UNE-EN ISO 2307:2011 y la fuerza de rotura es un dato obtenido a partir del fabricante).

5. Realización de ensayos

Una vez programadas las secuencias de ensayo de tracción para materiales metálicos y cuerdas sintéticas, se realizaron los ensayos con diversas muestras de cada uno de los materiales. A continuación, se detalla el procedimiento experimental en cada uno de los ensayos realizados y los resultados obtenidos a partir de los mismos.

5.1. Ensayos con materiales metálicos

5.1.1. Preparación de probetas.

Para realizar los ensayos sobre materiales metálicos, se utilizaron probetas de acero normalizado de sección rectangular de una medida aproximada de d de X mm.

Según la normativa explicada en el capítulo anterior y la secuencia de ensayos diseñada para el test de tracción con probetas metálicas, la longitud inicial entre marcas es de $L_0 = k \cdot \sqrt{S_0}$ con $k = 5,65$. Debido a que las medidas de la sección variaban ligeramente en cada una de las probetas, se calculó L_0 en cada uno de los casos y, posteriormente, se realizaron las marcas con un roturador de tinta blanca opaca, que ofrecías un gran contraste entre la superficie metálica y la marca.

Así mismo, la longitud entre las mordazas, L_c , se mide una vez se coloca la probeta entre las mismas estando ésta en torno a unos 200 mm, de modo que las marcas de la probeta se encuentren centradas entre ambas mordazas para que la zona de rotura se halle entre las mismas.

Los parámetros iniciales de cada una de las probetas se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros iniciales de ensayo

Nº de muestra	L ₀ (mm)	S ₀ (mm ²)	L ₀ real (mm)	L _c (mm)	V _c (mm/min)
1	58,76	108,16	58,75	195	2,925
2	58,29	106,45	58,35	187	2,805
3	58,84	108,47	59,10	192	2,880
4	58,17	105,98	58,16	191	2,865
5	58,41	106,86	57,98	190	2,850
6	57,32	102,91	57,63	204	3,060
7	58,34	106,61	59,33	190	2,850
8	58,15	105,93	58,16	196	2,940
9	58,67	107,84	58,67	200	3,000

Una vez colocada la probeta y determinada la velocidad de ensayo, que es introducida manualmente previamente al mismo, se realizaron los ensayos de tracción sobre las distintas muestras.

5.1.2. Control del videoextensómetro

Se coloca el videoextensómetro a una distancia de la máquina de ensayos lo suficientemente alejada de la muestra para que la imagen captada por el video incluya el espacio en el que se prevé que se vaya a romper la probeta. La distancia de la posición de la cámara a la máquina de ensayos es de, aproximadamente, 5 metros. Se enfoca

con la cámara la parte central de la probeta. Se enciende el software de control de la máquina de ensayos SCM3000 y el software de control del videoextensómetro VE-1200. Una vez encendidos, en este último se puede visualizar en la pantalla del ordenador la imagen tomada por el videoextensómetro.

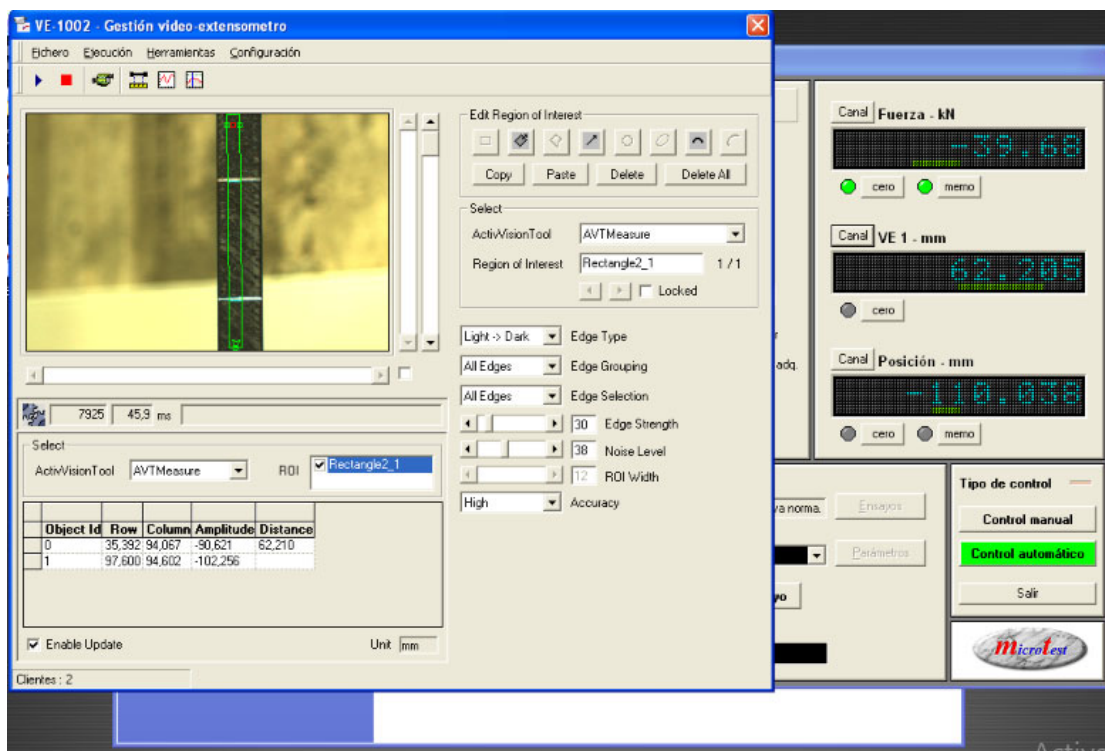


Fig. 5.1 Captura de imágenes en software VE-1200

Se ha de alejar o acercar la cámara de video a la probeta dependiendo de la región que capte la cámara, y siempre teniendo en cuenta que durante el ensayo de tracción la probeta se alargará y se deberá detectar toda la región.

Una vez colocada la cámara a una distancia idónea, se procede a realizar la calibración de la longitud de pixel en el software del videoextensómetro VE-1200. Este proceso hace que el software convierta la distancia tomada en la imagen a una longitud

real. Para ello, se selecciona en la imagen tomada por el software las marcas realizadas sobre la probeta y se introduce la longitud real entre ambas marcas. Una vez realizado este proceso, el software automáticamente calcula la longitud del pixel de la imagen en relación con la longitud real y convierte la longitud tomada entre distintos puntos seleccionados.

Se toma una región de interés centrada en la zona de la probeta que se quiere estudiar, de manera que el software tome datos de la sección de la probeta y no de la imagen de alrededor para evitar que confunda las marcas con el fondo de color más claro.

Una vez determinada la región de interés, se regulan los niveles de detección de la imagen, ajustando el porcentaje de claridad y ruido detectados.

En la interface del panel de control del software SMC3000 se abre el ensayo a realizar. En este caso, se carga la secuencia de ensayos generada y se introducen los datos calculados previamente para el ensayo con cada probeta (velocidad de ensayo).

Se obtienen los resultados tanto en forma de gráfica F-AL como en datos numéricos. En cada uno de los ensayos queda grabado en cada punto en el que se toman datos; tiempo, posición entre mordazas, posición videoextensómetro, fuerza aplicada. Los datos se toman cada 0,1 segundos. Posteriormente, estos resultados pueden ser volcados en un fichero Excel o en .pdf para ser tratados.

Una vez realizado cada ensayo, se genera un archivo con los datos del mismo en el que se guardan los siguientes datos obtenidos: Fuerza (kN), tiempo (s), posición de las mordazas (mm), longitud de videoextensómetro (mm).

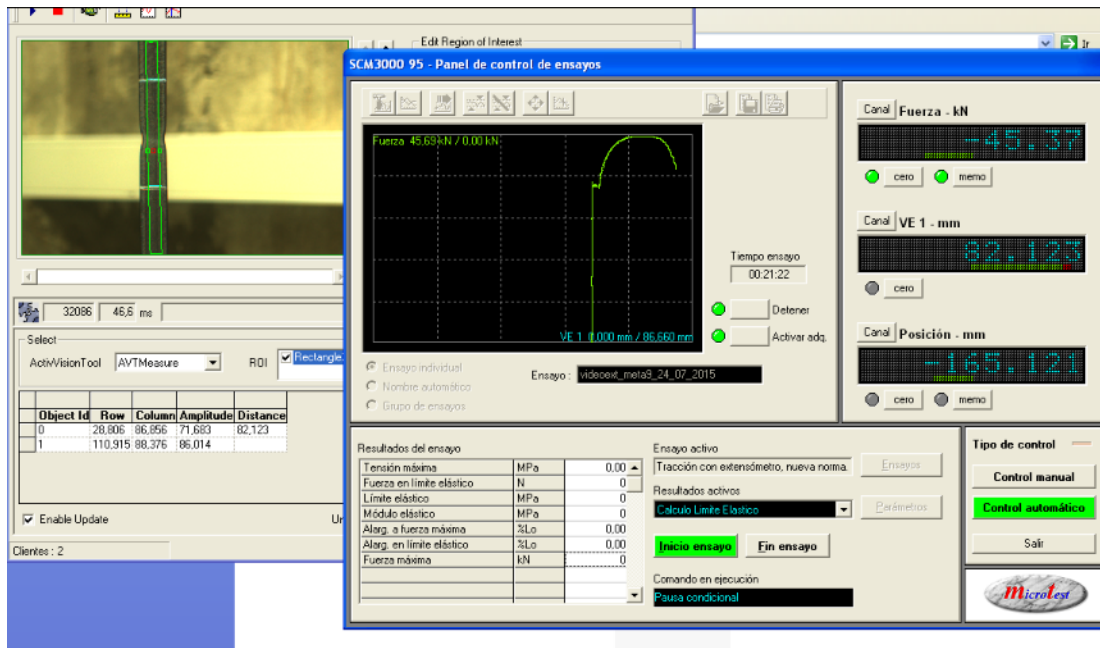


Fig. 5.2 Panel de control del software SCM3000 – gráfica durante el ensayo

5.1.3. Resultados de ensayos

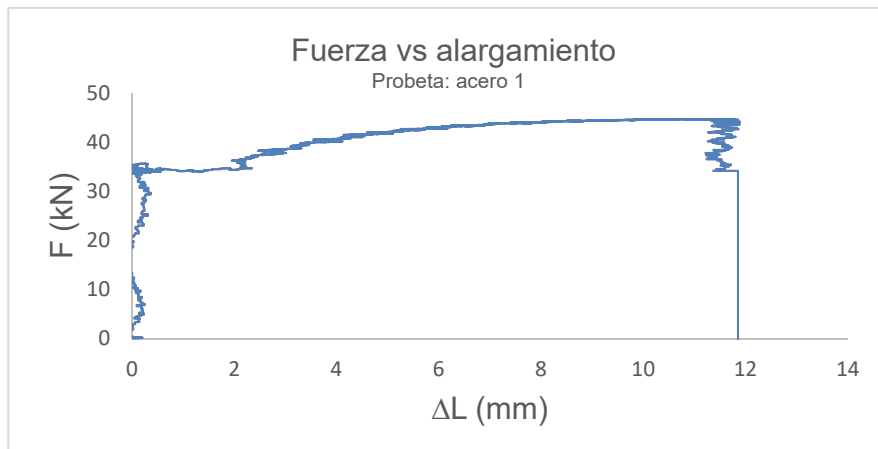
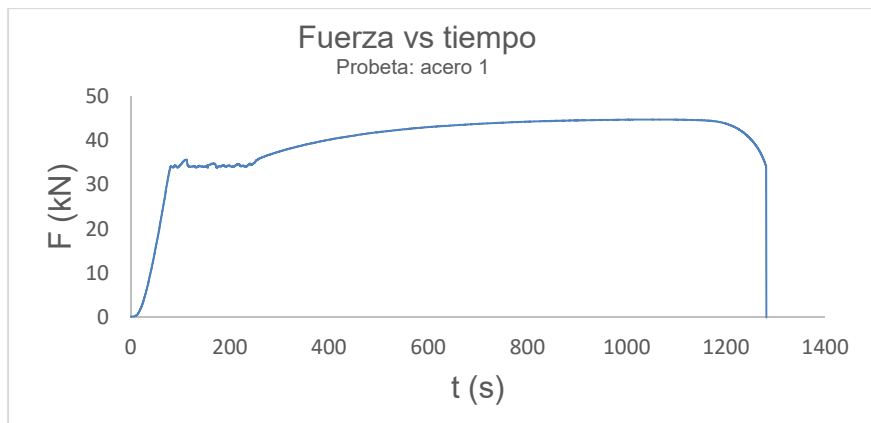
A partir de los datos obtenidos durante el ensayo y registrados por el software de captura de datos, se obtienen en función del tiempo de adquisición de datos, el alargamiento y la fuerza. A partir de estos datos, a continuación, se muestran los resultados de cada una de las probetas, expresados en gráficas de Fuerza vs. Tiempo, Fuerza vs. Alargamiento y Tensión vs. deformación. Adicionalmente, y a partir de los datos obtenidos, se calculan el límite elástico del material, el límite superior de cedencia y el límite inferior de cedencia. Para realizar dichos cálculos, se ha tomado de referencia la norma UNE-EN ISO 6892-1.

PROBETA 1

Fecha de ensayo: 14/07/2015

Sección inicial de probeta S_0 : 108,16 mm²

Velocidad de ensayo: 2,925 mm/min



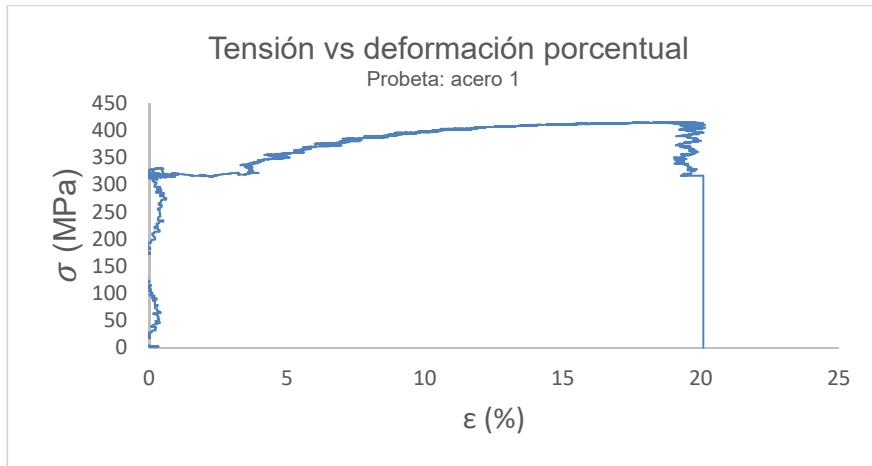


Tabla de resultados:

Tiempo de ensayo	21' 21,2"
ΔL_{rotura} (mm)	11,85
A_t Extensión porcentual a la rotura - ϵ_{Rotura} (%)	20,08
σ_{Max} (MPa)	414,29
σ_{Rotura} (MPa)	316,66
R_{eH} Límite superior cedencia (MPa)	316,5
R_{eL} Límite inferior cedencia (MPa)	312,9
R_p Límite elástico (MPa)	320,26

PROBETA 2

Fecha de ensayo: 14/07/2015

Sección inicial de probeta S_0 : 106,45 mm²

Velocidad de ensayo: 2,805 mm/min

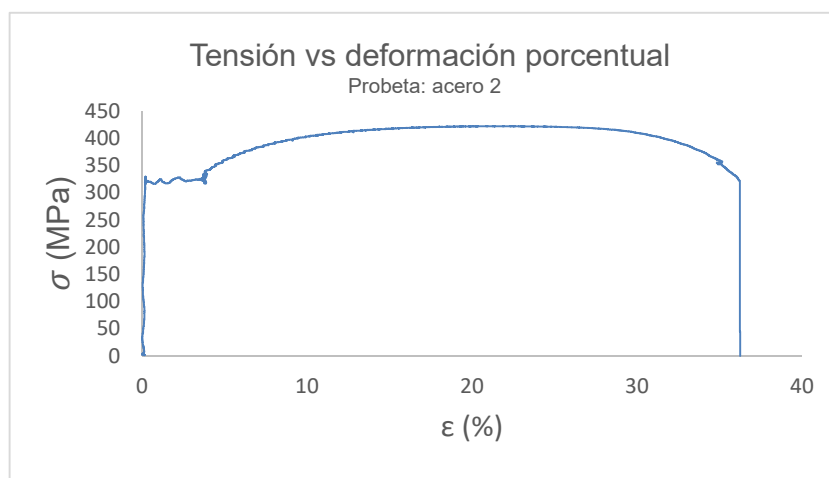
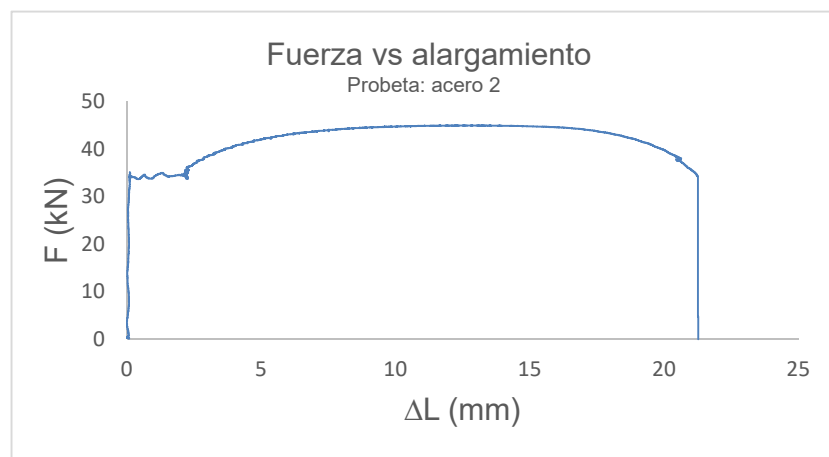
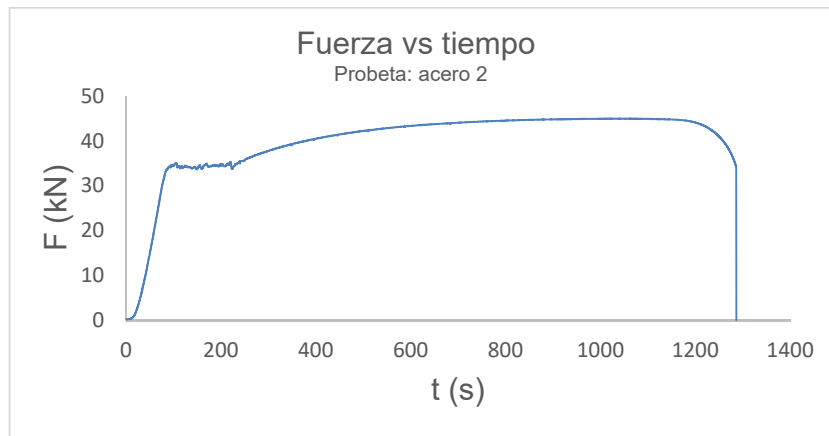


Tabla de resultados:

Tiempo de ensayo	21' 26,5"
ΔL_{rotura} (mm)	21,66
At Extensión porcentual a la rotura - ϵ_{Rotura} (%)	36,24
σ Max (MPa)	414,29
σ Rotura (MPa)	321,94
ReH Límite superior cedencia (MPa)	329,64
ReL Límite inferior cedencia (MPa)	316,58
Rp Límite elástico (MPa)	325,31

PROBETA 3

Fecha de ensayo: 16/07/2015

Sección inicial de probeta S_0 : 108,47 mm²

Velocidad de ensayo: 2,880 mm/min

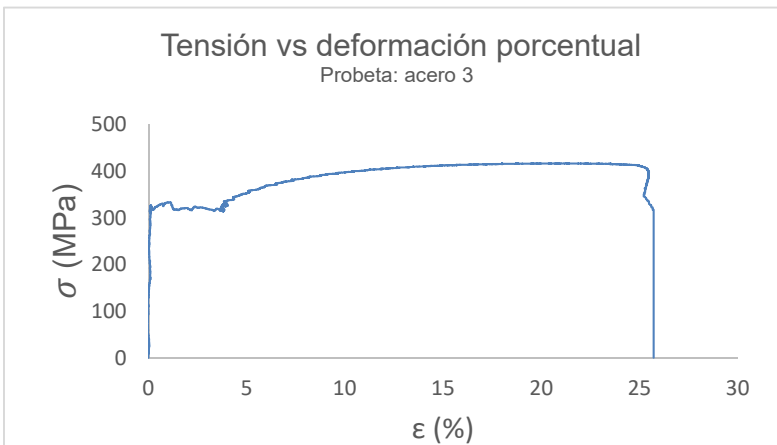
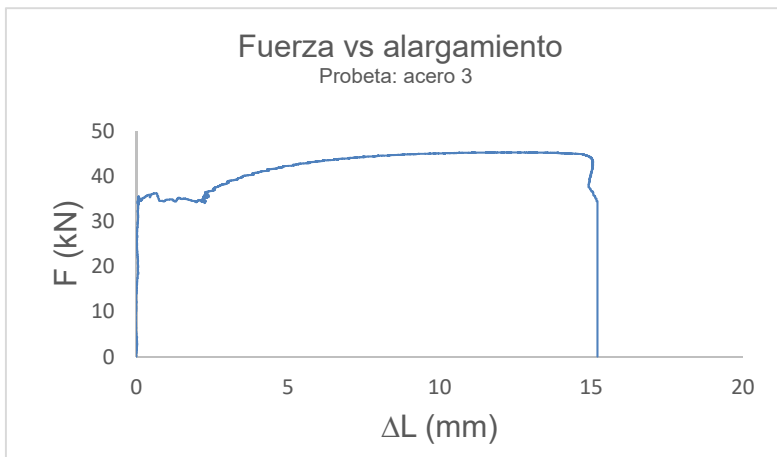
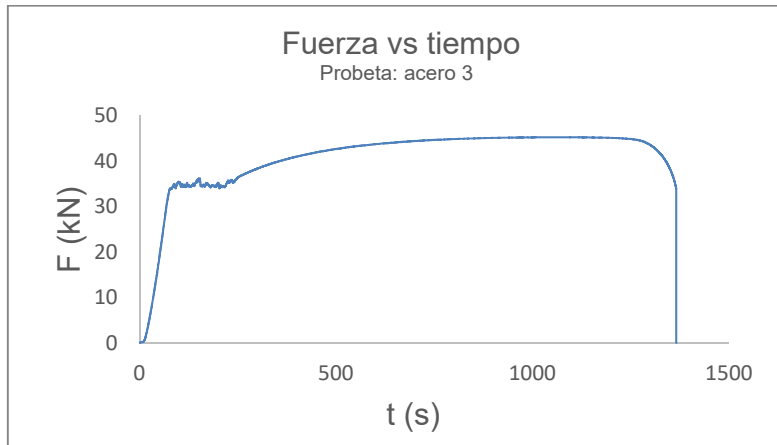


Tabla de resultados:

Tiempo de ensayo	22' 45,7"
ΔL_{rotura} (mm)	15,20
At Extensión porcentual a la rotura - ϵ_{Rotura} (%)	25,72
σ Max (MPa)	417,11
σ Rotura (MPa)	313,84
ReH Límite superior cedencia (MPa)	333,95
ReL Límite inferior cedencia (MPa)	317,08
Rp Límite elástico (MPa)	333,33

PROBETA 4

Fecha de ensayo: 22/07/2015

Sección inicial de probeta S_0 : 105,98 mm²

Velocidad de ensayo: 2,865 mm/min

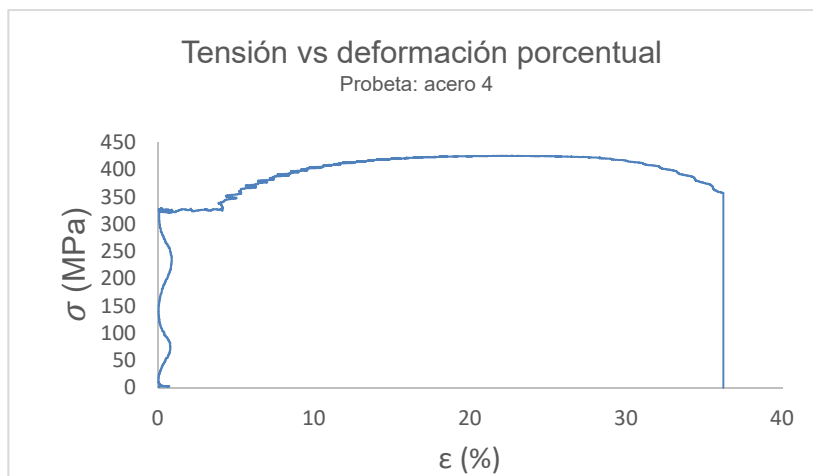
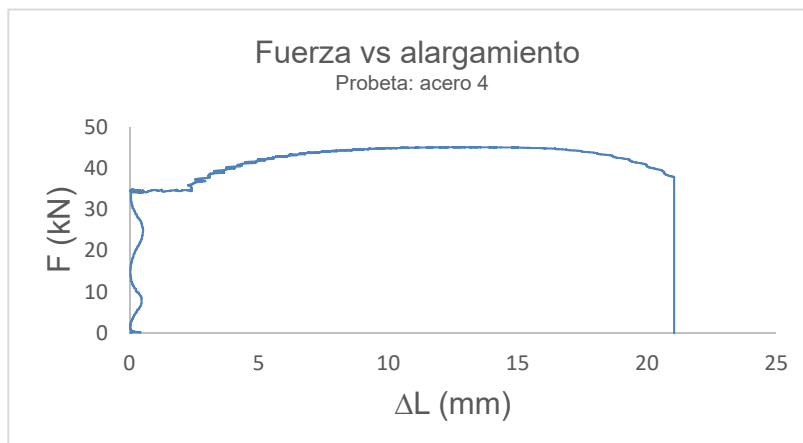
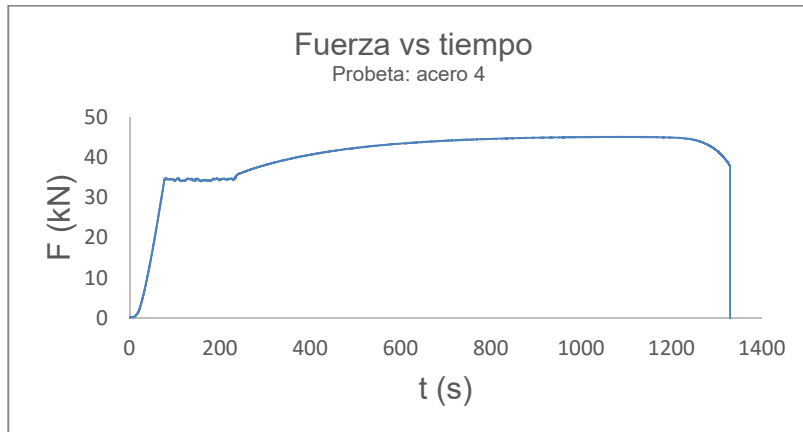


Tabla de resultados:

Tiempo de ensayo	22' 9,6"
ΔL_{rotura} (mm)	21,05
A _t Extensión porcentual a la rotura - ϵ_{Rotura} (%)	36,23
σ Max (MPa)	425,65
σ Rotura (MPa)	357,52
R _{eH} Límite superior cedencia (MPa)	328,55
R _{eL} Límite inferior cedencia (MPa)	321,85
R _p Límite elástico (MPa)	322,70

PROBETA 5

Fecha de ensayo: 22/07/2015

Sección inicial de probeta S_0 : 106,86 mm²

Velocidad de ensayo: 2,850 mm/min

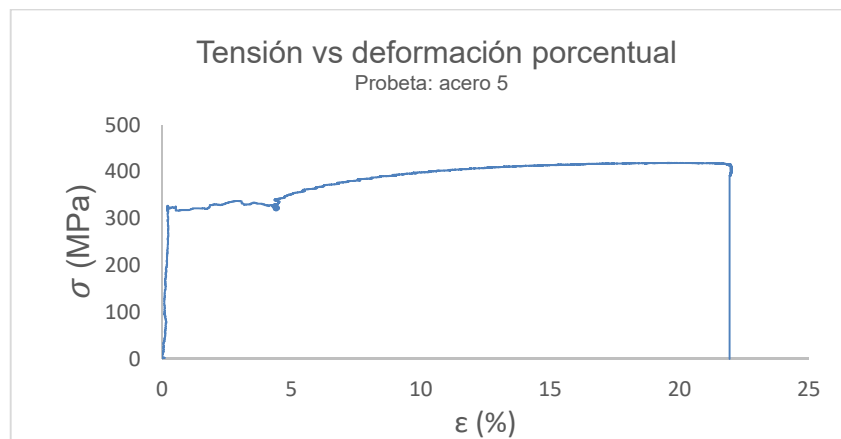
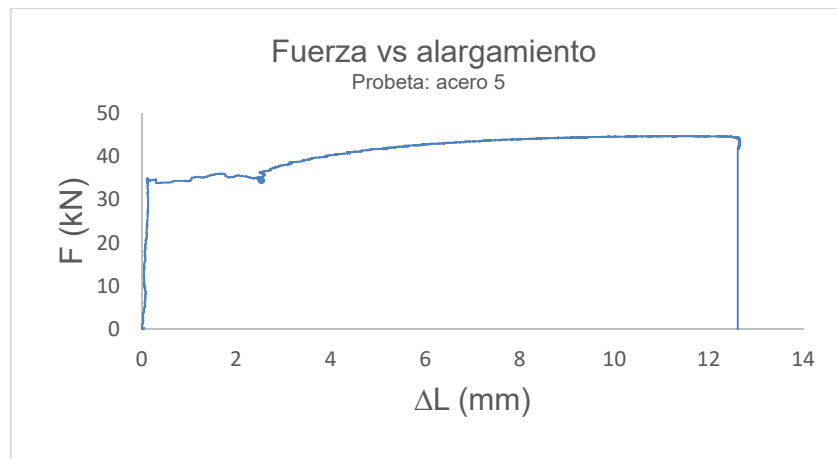
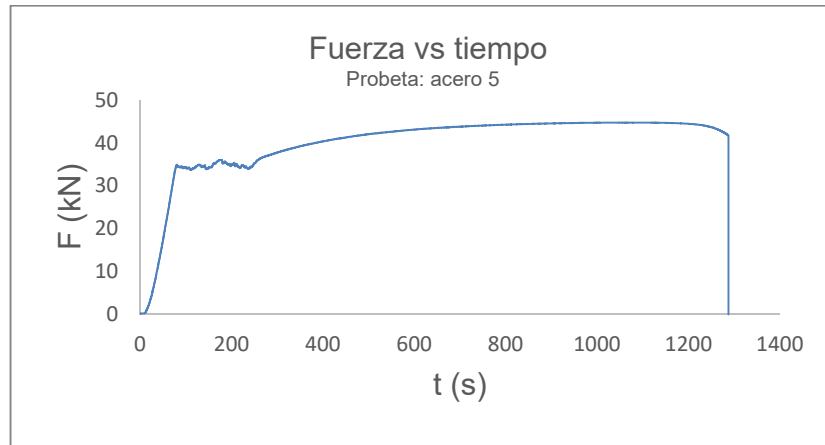


Tabla de resultados:

Tiempo de ensayo	21' 27,2"
ΔL_{rotura} (mm)	12,61
A_t Extensión porcentual a la rotura - ϵ_{Rotura} (%)	21,93
σ_{Max} (MPa)	418,68
σ_{Rotura} (MPa)	390,69
R_{eH} Límite superior cedencia (MPa)	326,59
R_{eL} Límite inferior cedencia (MPa)	315,27
R_p Límite elástico (MPa)	321,26

PROBETA 6

Fecha de ensayo: 23/07/2015

Sección inicial de probeta S_0 : 102,91mm²

Velocidad de ensayo: 3,060 mm/min

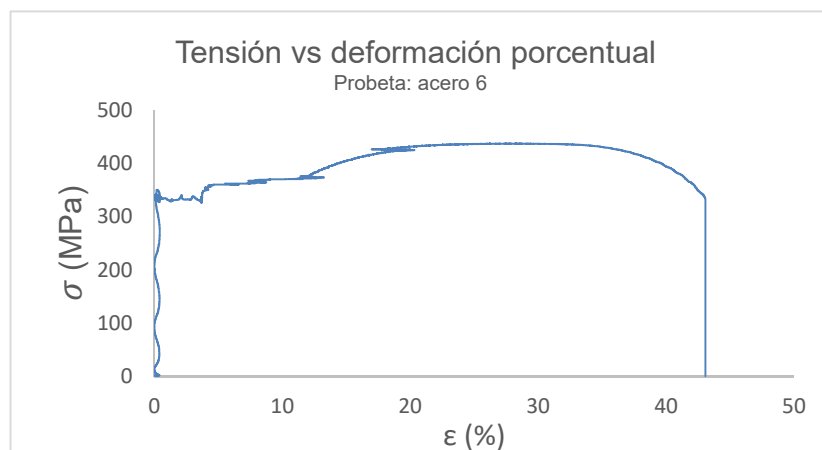
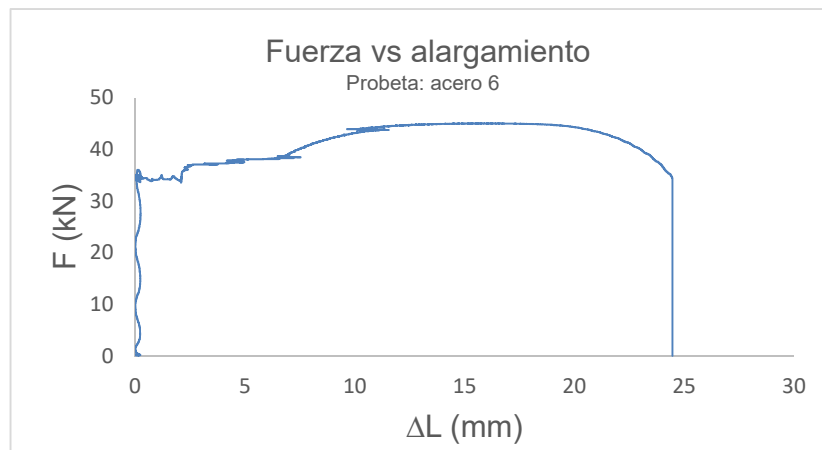
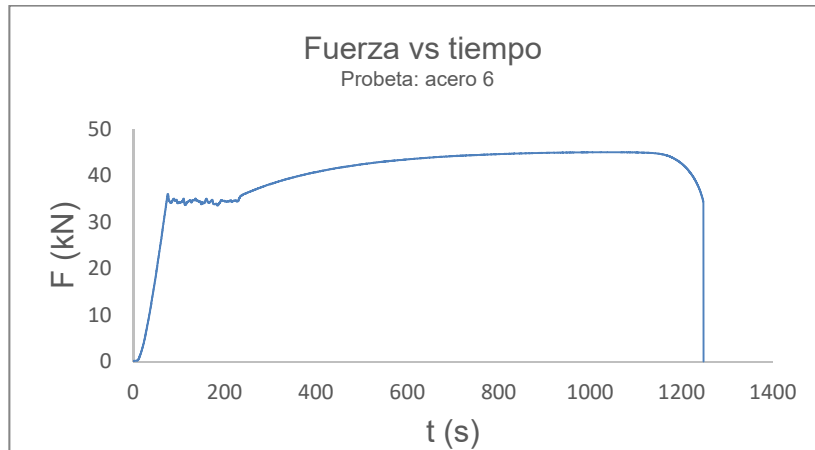


Tabla de resultados:

Tiempo de ensayo	20' 47,9"
ΔL_{rotura} (mm)	24,45
A _t Extensión porcentual a la rotura - ϵ_{Rotura} (%)	43,06
σ Max (MPa)	437,47
σ Rotura (MPa)	334,46
R _{eH} Límite superior cedencia (MPa)	350,30
R _{eL} Límite inferior cedencia (MPa)	327,28
R _p Límite elástico (MPa)	331,94

PROBETA 7

Fecha de ensayo: 23/07/2015

Sección inicial de probeta S_0 : 106,61mm²

Velocidad de ensayo: 2,850 mm/min

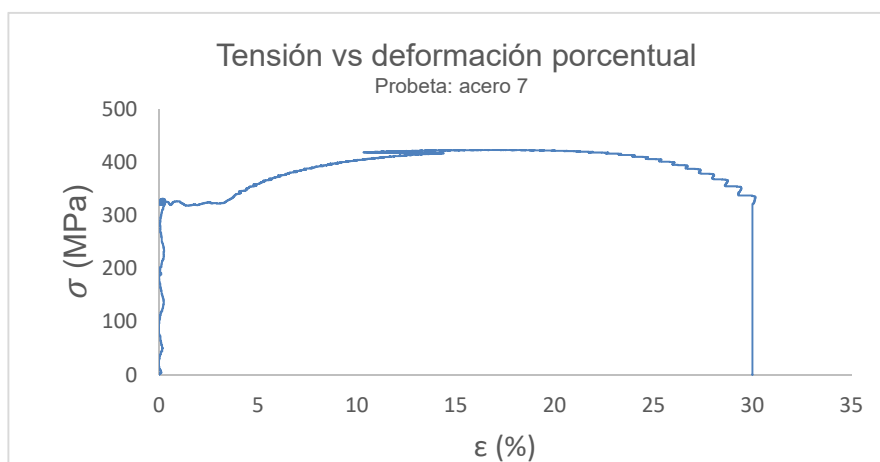
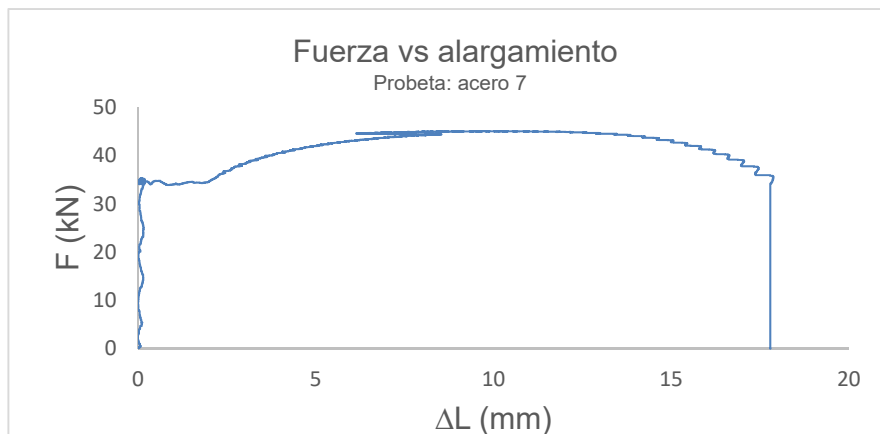
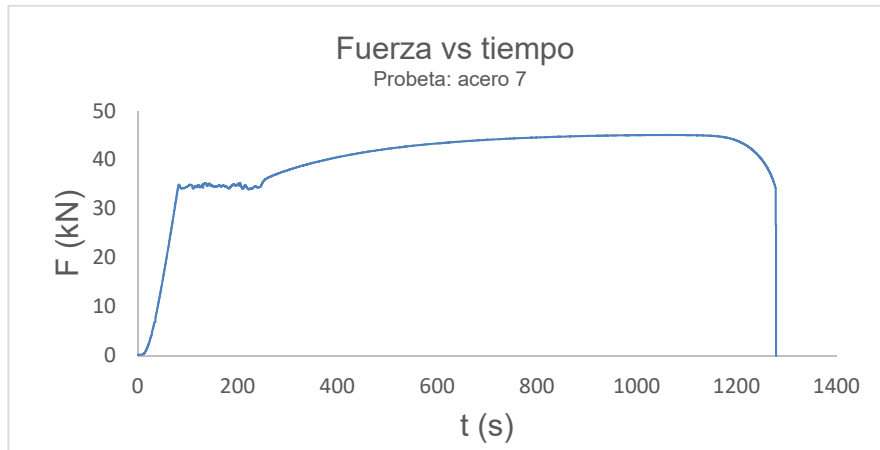


Tabla de resultados:

Tiempo de ensayo	21' 48,9"
ΔL_{rotura} (mm)	17,98
A_t Extensión porcentual a la rotura - ϵ_{Rotura} (%)	29,98
σ_{Max} (MPa)	423,05
σ_{Rotura} (MPa)	321,28
R_{eH} Límite superior cedencia (MPa)	327,85
R_{eL} Límite inferior cedencia (MPa)	320,34
R_p Límite elástico (MPa)	324,09

PROBETA 8

Fecha de ensayo: 23/07/2015

Sección inicial de probeta S0: 105,93mm²

Velocidad de ensayo: 2,940 mm/min

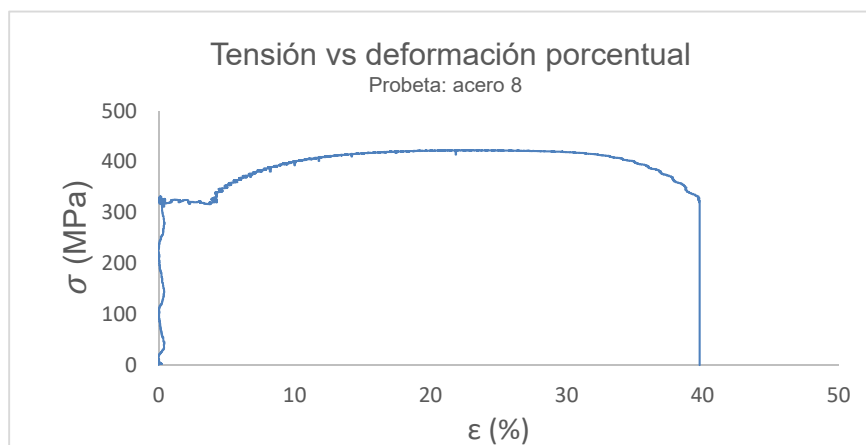
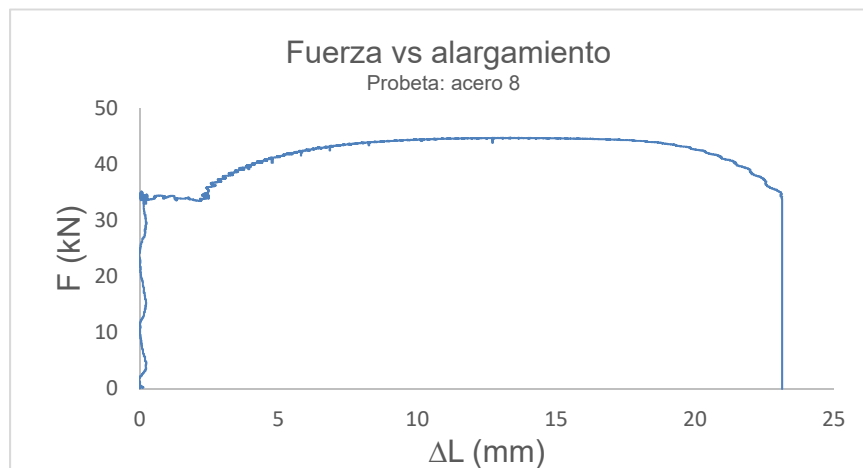
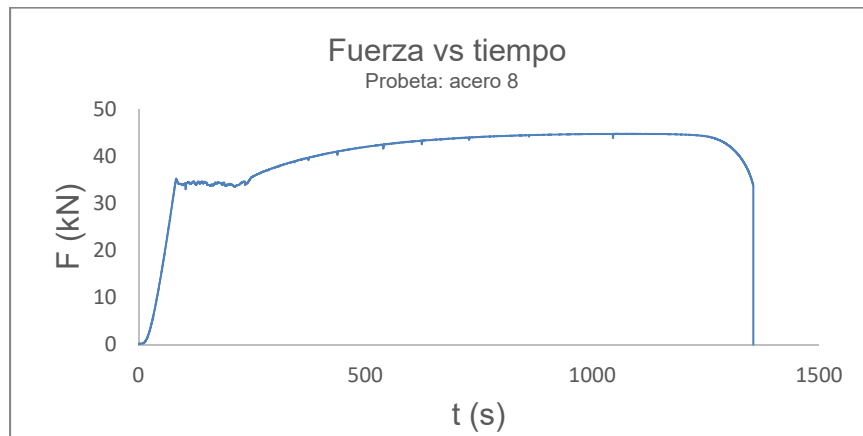


Tabla de resultados:

Tiempo de ensayo	22' 35,1"
ΔL_{rotura} (mm)	23,13
A_t Extensión porcentual a la rotura - ϵ_{Rotura} (%)	39,76
σ Max (MPa)	422,54
σ Rotura (MPa)	319,92
R_{eH} Límite superior cedencia (MPa)	332,48
R_{eL} Límite inferior cedencia (MPa)	311,53
R_p Límite elástico (MPa)	325,12

PROBETA 9

Fecha de ensayo: 24/07/2015

Sección inicial de probeta S0: 107,84 mm²

Velocidad de ensayo: 3,000 mm/min

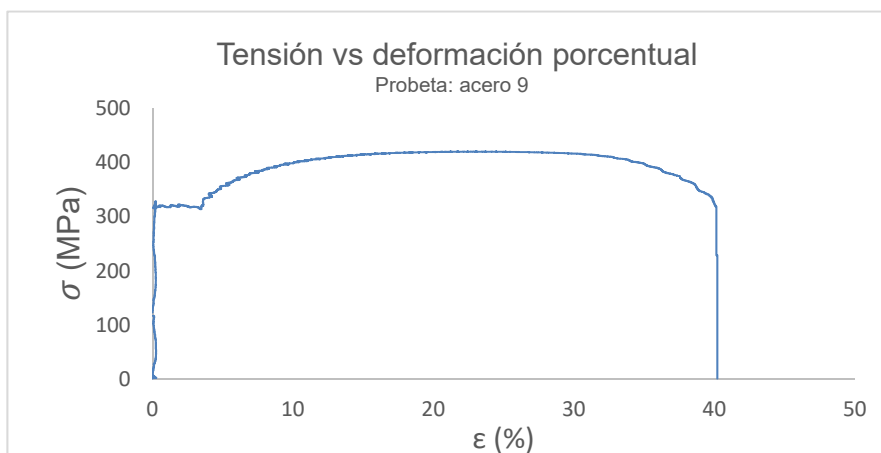
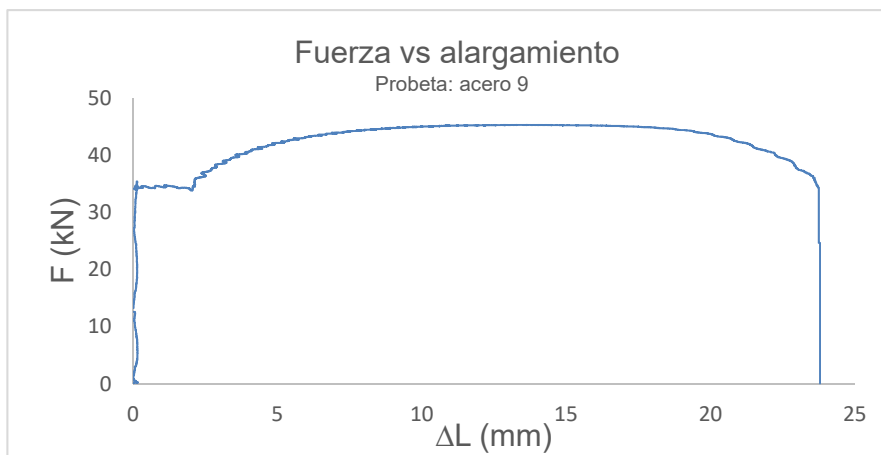
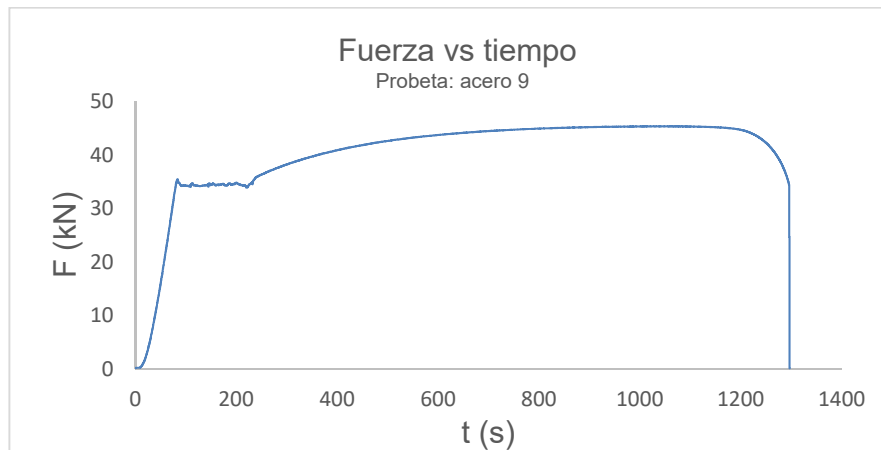


Tabla de resultados:

Tiempo de ensayo	21' 37,0"
ΔL_{rotura} (mm)	23,79
At Extensión porcentual a la rotura - ϵ_{rotura} (%)	40,20
σ_{Max} (MPa)	420,45
σ_{Rotura} (MPa)	318,95
ReH Límite superior cedencia (MPa)	328,59
ReL Límite inferior cedencia (MPa)	316,63
Rp Límite elástico (MPa)	319,78

5.1.4. Tratamiento de datos

Tras la realización del ensayo, se registró la medida de la longitud final entre las marcas. Para ello, se unen las dos partes de la probeta que han quedado seccionadas y se realiza la medida con un pie de rey.

En la siguiente tabla, se muestran las medidas tomadas y se realiza el cálculo del alargamiento real de la probeta (medido con el pie de rey), teniendo en cuenta la longitud inicial y final de la misma medida manualmente. Este dato se compara con el alargamiento del videoextensómetro, medido a partir del software de procesamiento de datos de la cámara, obteniendo el error porcentual de la medida de alargamiento del videoextensómetro con respecto a la medida de alargamiento medido manualmente.

Tabla 2. Cálculo del error de alargamiento real vs. videoextensómetro

Nº probeta	ΔL videoext. (mm)	L_0 medida manual (mm)	L_f medida manual (mm)	ΔL medida manual (mm)	Error (%)
1	11,85	58,75	70,34	11,59	2,243
2	21,66	58,35	81,12	22,77	4,875
3	15,20	59,10	74,89	15,79	3,737
4	21,05	58,16	80,75	22,59	6,817
5	12,61	57,98	70,58	12,6	0,079
6	24,45	57,63	79,58	22,69	7,757
7	17,98	59,33	78,59	19,26	6,646
8	23,13	58,16	81,34	23,18	0,216
9	23,79	58,67	84,11	25,44	6,486

5.2. Ensayos con cuerdas

5.2.1. Preparación de probetas.

Se utilizaron para realizar estos ensayos dos tamaños de cuerdas blancas con marcas de colores. Los datos teóricos de las cuerdas ensayadas son los siguientes:

Tabla 3. Datos de las cuerdas a ensayar

Tipo de cuerda	Nº de referencia	Kg soporte teóricos (impacto directo – caída)
1 (fina)	6	280
2 (ancha)	10	1040

Según la normativa UNE-EN ISO 2307:2011 Cuerdas de fibra. Determinación de ciertas propiedades físicas y mecánicas, se diseñó previamente la secuencia de ensayo, descrita en el capítulo anterior.

Como se comentó, previamente al ensayo se ha de determinar la tensión de referencia, valor obtenido de la tabla A.1 de la norma UNE-EN ISO 2307:2011. Este valor se obtiene a partir del nº de referencia de la cuerda.

Adicionalmente, será necesario conocer la fuerza de rotura real de la cuerda. Para ello, se realizó el test de tracción hasta rotura simple sobre tres probetas de cada tipo de cuerda, a la misma velocidad a la que es realizado el test de tracción según UNE-EN ISO 2307, $V = 250 \pm 50$ mm/min. Puesto que durante el test de rotura se producen caídas de tensión debido a la rotura de fibras de la cuerda, se consideró una caída de tensión de, al menos, un 25% de la tensión para considerar la rotura de la cuerda.

Los valores de fuerza máxima medios obtenidos en los ensayos de rotura y la tensión de referencia fueron los siguiente en cada uno de los casos:

Tabla 4. Fuerza de rotura y tensión de referencia

Tipo de cuerda	Frotura* (kN)	Tensión referencia (kN)
1 (fina)	2,81	0,045
2 (ancha)	5,43	0,125

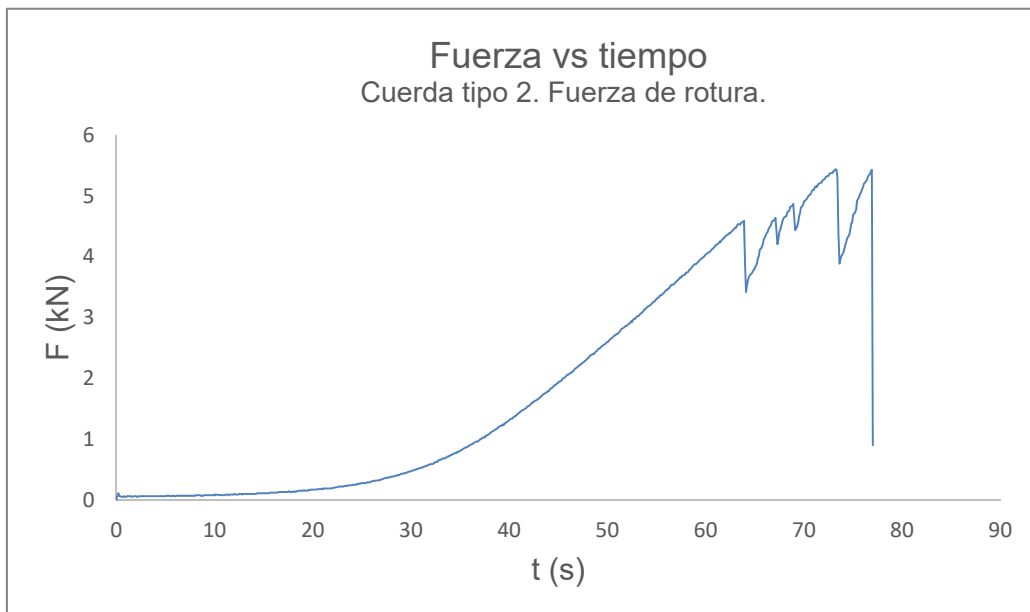


Fig. 5.3 Ejemplo de gráfica de ensayo de la fuerza de rotura de una cuerda

Una vez obtenidos estos valores, se realiza la preparación de las probetas, realizando las marcas descritas en la norma para el test de tracción (explicadas en el punto 4.1.2) y se lleva a cabo el ensayo siguiendo los pasos descritos a continuación:

- Se realizan las marcas “r” en la parte de la cuerda colocada a la altura del centro de círculo de la mordaza. La distancia entre estas marcas es L_u .
- Se realizan las marcas W-W separadas de una distancia l_0 .
- Aplicando la tensión de referencia, se mide l_2 = distancia entre W-W.
- Después se aplica una carga alternante de tres ciclos entre la tensión de referencia y el 50% de la fuerza de rotura, y cuando acaba, se mide l_3 = distancia entre W-W con $F=50\%$ fuerza de rotura.

Al finalizar el ensayo, se registra el alargamiento porcentual $E = \frac{(l_3-l_2)}{l_2} \cdot 100$ (%).

Preparación de probetas. Ensayo real

Realizando los primeros ensayos, no se consiguió la ruptura en las cuerdas finas (tipo 1) debido a la alta deformación de estas. La longitud de la máquina de ensayos disponible no era suficiente para que las cuerdas llegasen a romperse. Debido a ello, se decidió realizar el ensayo con cuerdas tipo 1 utilizando una longitud efectiva $L_u=200$ mm. Para el caso de cuerdas tipo 2, la longitud efectiva fue de $L_u=400$ mm.

En ambos casos se realizó el test con una longitud inicial de la zona de medida de $l_0=50$ mm, cuyas marcas quedaron centradas con respecto a L_u .

Debido al color de las cuerdas, para realizar las marcas de la longitud inicial, se utilizó un roturador negro mate, realizando la marca a través de todo el eje transversal de la cuerda.

5.2.2. Control del videoextensómetro

Una vez realizada la marca, se coloca la cuerda de modo que las marcas “r-r” situadas a una distancia L_u queden situadas a la altura del centro de la mordaza.



Fig. 5.4 Marcas “r”.



Fig. 5.5. Colocación de probeta en máquina de ensayo.

Posteriormente, y para cada uno de los ensayos, se coloca el videoextensómetro a una distancia de la máquina de ensayos que permita enfocar la zona central de la probeta donde se monitorea la medida entre marcas “W-W”. Se enciende el software de control de la máquina de ensayos SCM3000 y el software de control del videoextensómetro VE-1200. A través de este último, se puede visualizar en la pantalla del ordenador la imagen tomada por el videoextensómetro.



Fig. 5.6. Situación de cámara - videoextensómetro

Se ha de alejar o acercar la cámara de video a la probeta dependiendo de la región que capte la cámara, y siempre teniendo en cuenta que durante el ensayo de tracción la probeta se alargará y deberá de detectar una región suficientemente amplia para captar todo el proceso (localización de las marcas “w” hasta el final del ensayo).

Una vez colocada la cámara a la distancia idónea, se procede a realizar la calibración de la longitud de píxel en el software del videoextensómetro VE-1200. Este proceso hace que el software convierta la distancia tomada en la imagen a la longitud real. Para ello, se selecciona en la imagen tomada por el software las marcas realizadas sobre la probeta y se introduce la longitud real entre ambas marcas. Una vez realizado este proceso, el software automáticamente calcula la longitud del píxel de la imagen en relación con la longitud real y convierte la longitud tomada entre distintos puntos.

Se toma una región de interés centrada en la zona de la probeta que se quiere estudiar, de manera que el software tome datos de la sección de la probeta y no de la imagen de alrededor para evitar que confunda las marcas con el resto de la imagen.

Una vez determinada la región de interés, se regulan los niveles de detección de la imagen, ajustando el porcentaje de claridad y ruido detectados.

En la interfaz del panel de control del software SMC3000 se carga la secuencia de ensayos generada y se introducen los datos calculados previamente para el ensayo con cada probeta (velocidad de ensayo, tensión de referencia).

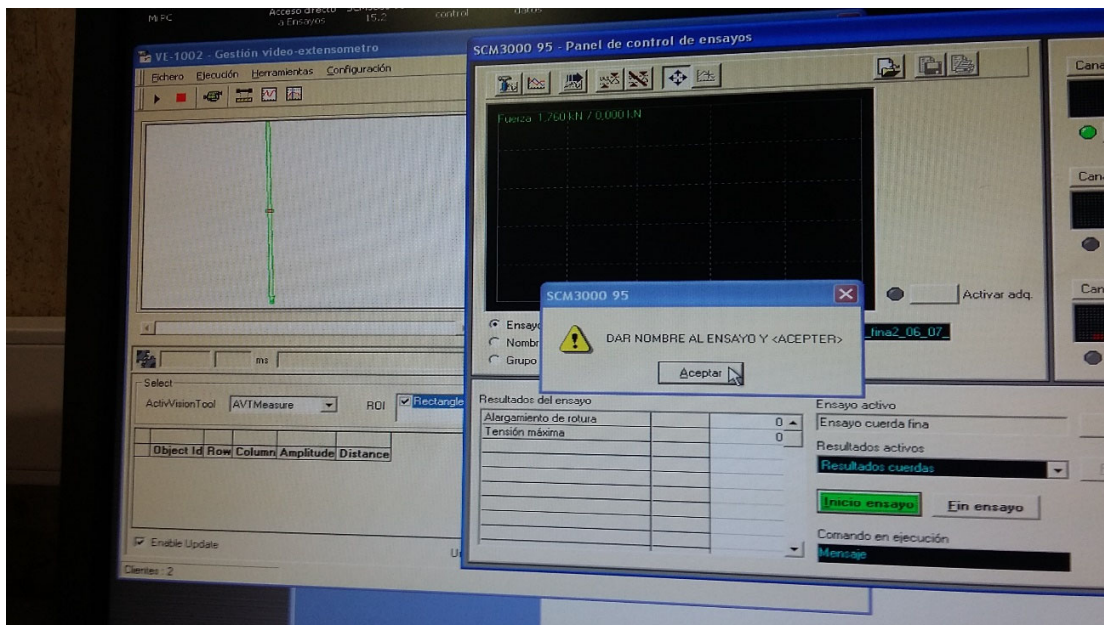


Fig. 5.6. Pantalla del software de captura de datos antes de realizar el ensayo

Se obtienen los resultados en forma de gráfica Fuerza vs. tiempo y Fuerza vs. alargamiento, y se obtiene un report con los valores numéricos de Fuerza (kN), tiempo (s), posición de las mordazas (mm) y alargamiento (mm). Los datos se toman cada 0,1

segundos. Posteriormente, estos resultados pueden ser volcados en un fichero Excel o en .pdf para ser tratados.

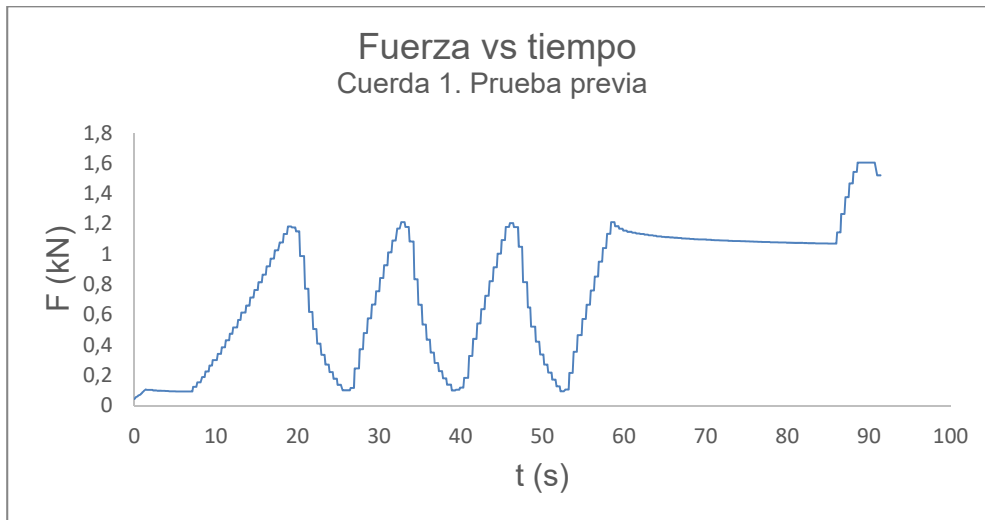


Fig. 5.7 Ejemplo de gráfica fuerza vs. tiempo del ensayo sobre cuerdas

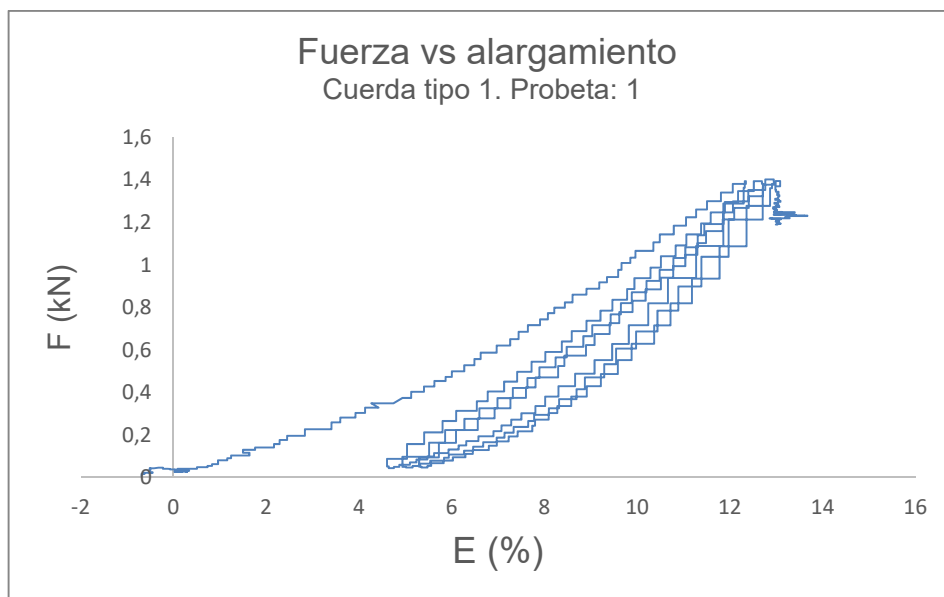


Fig. 5.8 Ejemplo de gráfica fuerza vs. alargamiento del ensayo sobre cuerdas

5.2.3. Resultados de ensayos

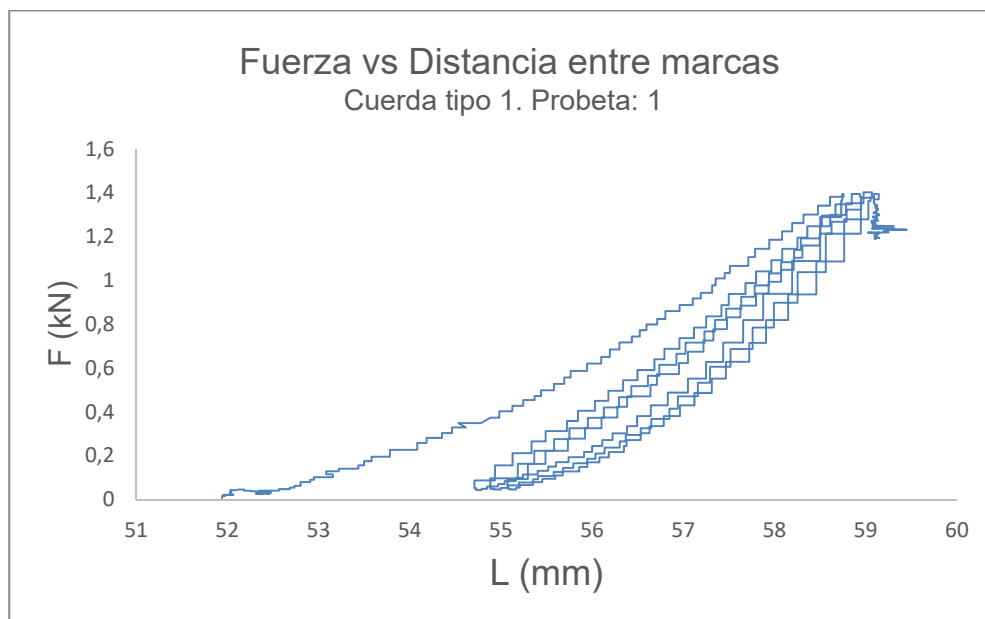
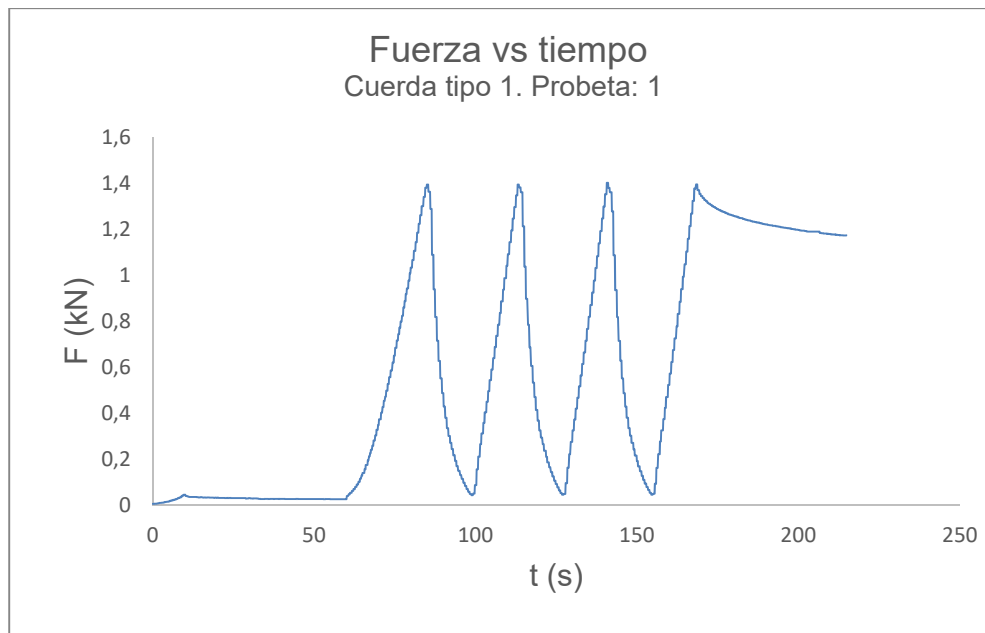
A partir de los datos obtenidos durante el ensayo y registrados por el software de captura de datos, se obtienen en función del tiempo de adquisición de datos, el alargamiento y la fuerza. A partir de estos datos, a continuación se muestran los resultados de cada una de las probetas ensayadas, expresados en gráficas de Fuerza vs. Tiempo, Fuerza vs Distancia entre marcas (evolución de l_0) y Fuerza vs. Alargamiento (expresado como $E = \frac{(L-l_2)}{l_2} \cdot 100$ (%)). También se expresa el resultado numérico de las longitudes medidas por el videoextensómetro y el alargamiento $E = \frac{(l_3-l_2)}{l_2} \cdot 100$ (%).

PROBETAS TIPO 1

PROBETA 1

Fecha de ensayo: 06/07/2015

Velocidad de ensayo: 250 mm/min



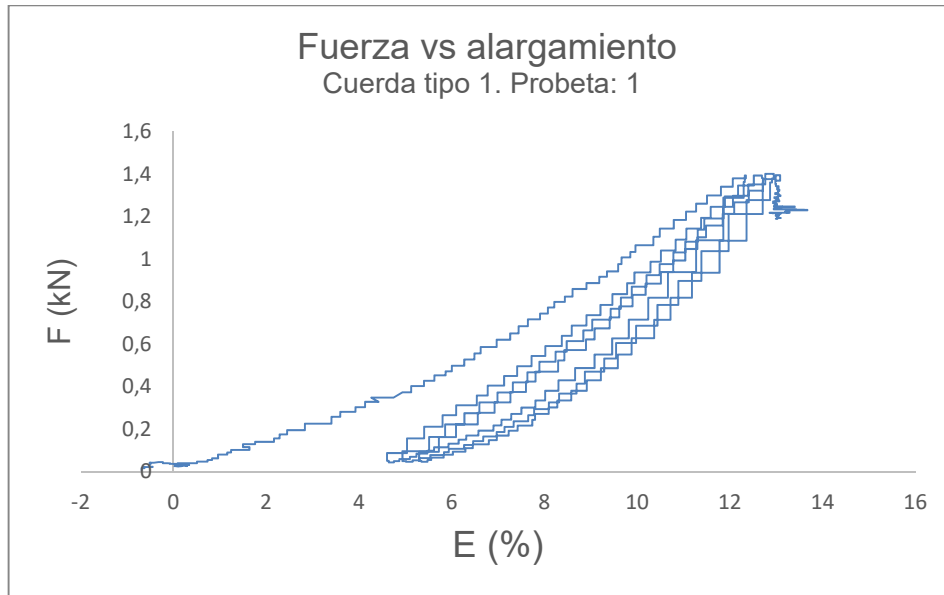


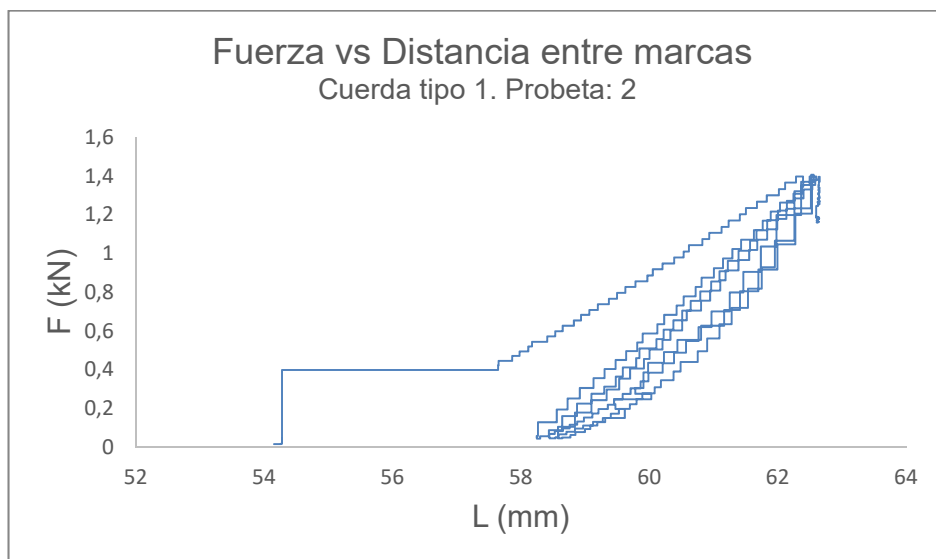
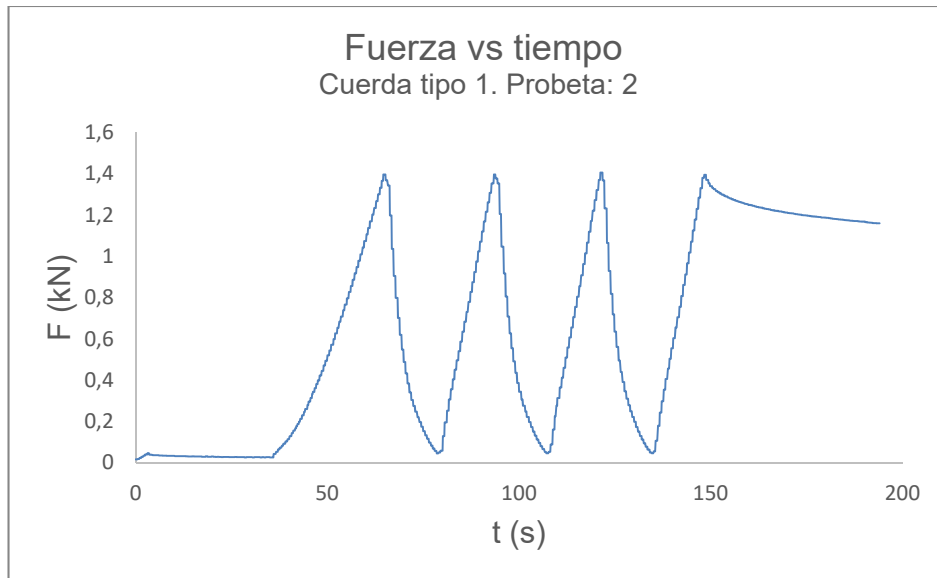
Tabla de resultados:

L0 (mm)	51,940
L2 (mm)	52,312
L3 (mm)	59,093
$E = \frac{(l3-l2)}{l2} \cdot 100 (\%)$	12,989

PROBETA 2

Fecha de ensayo: 16/07/2015

Velocidad de ensayo: 250 mm/min



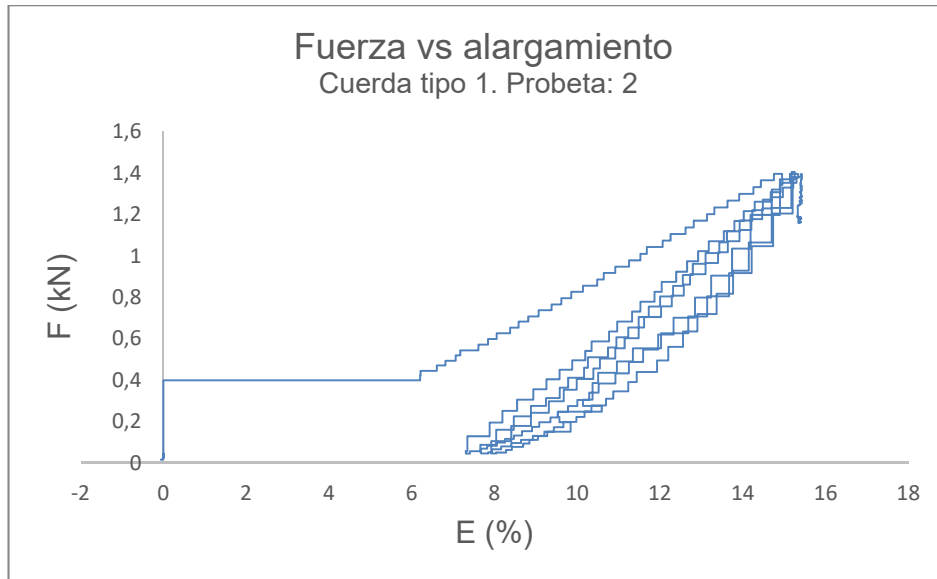


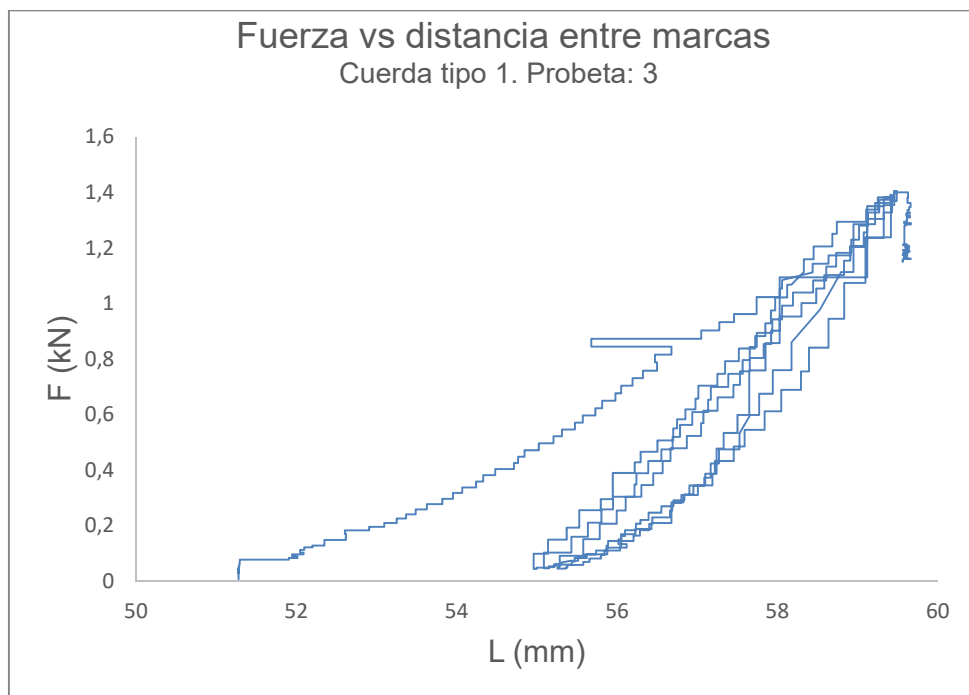
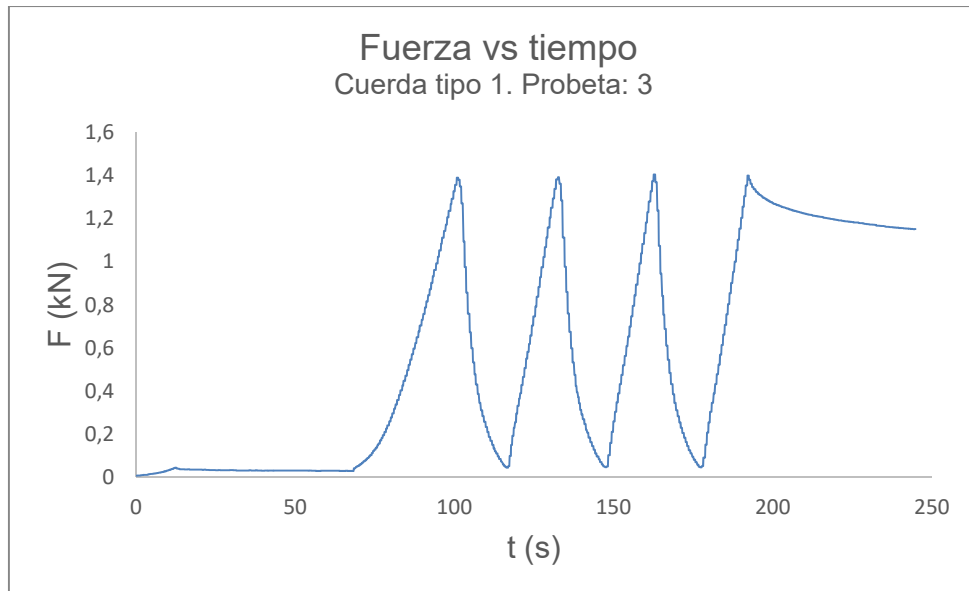
Tabla de resultados:

L0 (mm)	54,155
L2 (mm)	54,279
L3 (mm)	62,616
$E = \frac{(l3-l2)}{l2} \cdot 100 (\%)$	15,360

PROBETA 3

Fecha de ensayo: 20/07/2015

Velocidad de ensayo: 250 mm/min



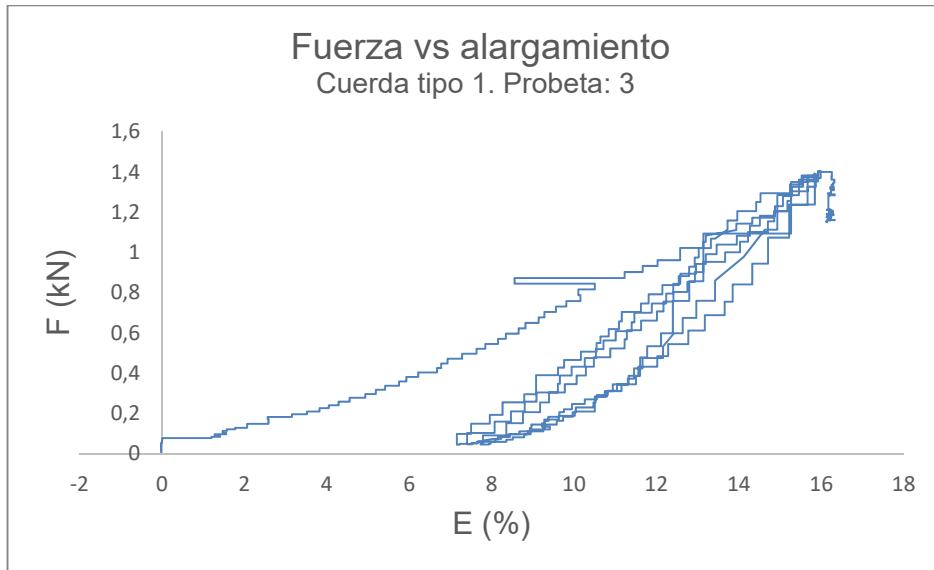


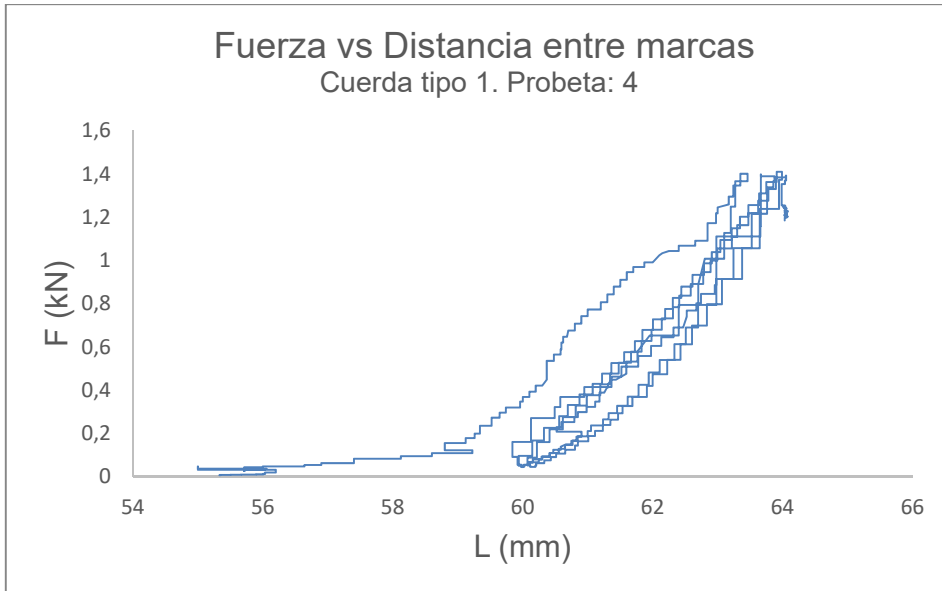
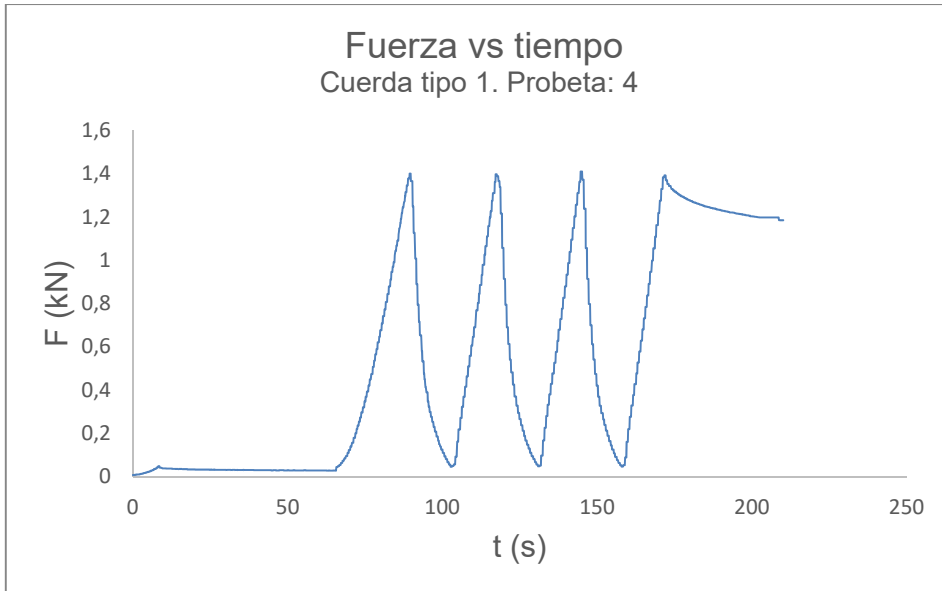
Tabla de resultados:

L0 (mm)	51,227
L2 (mm)	51,290
L3 (mm)	59,561
$E = \frac{(l3-l2)}{l2} \cdot 100 (\%)$	16,126

PROBETA 4

Fecha de ensayo: 20/07/2015

Velocidad de ensayo: 250 mm/min



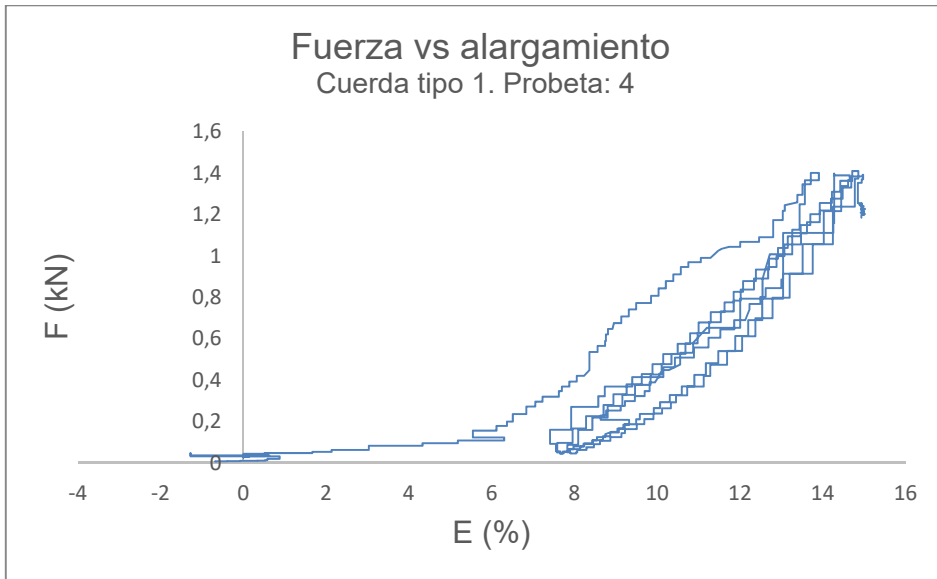


Tabla de resultados:

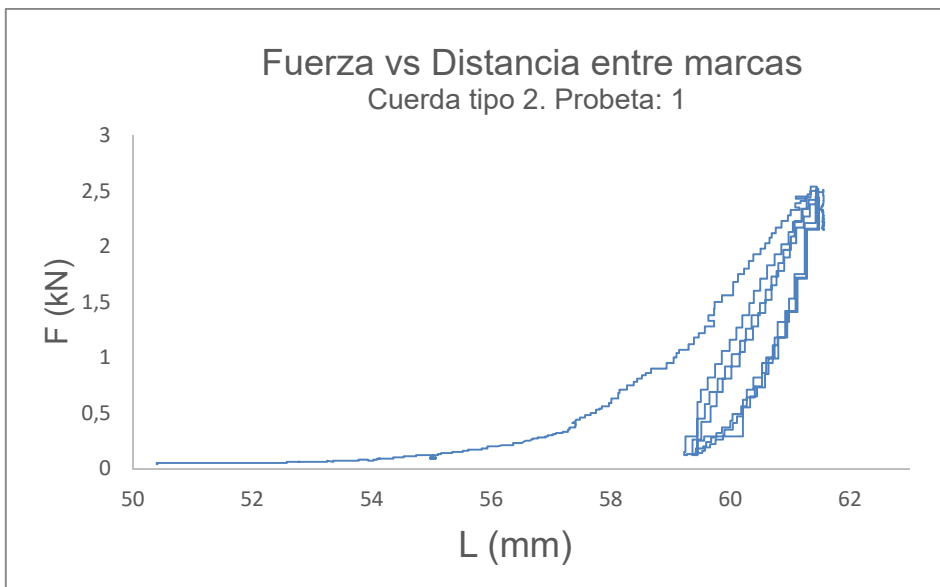
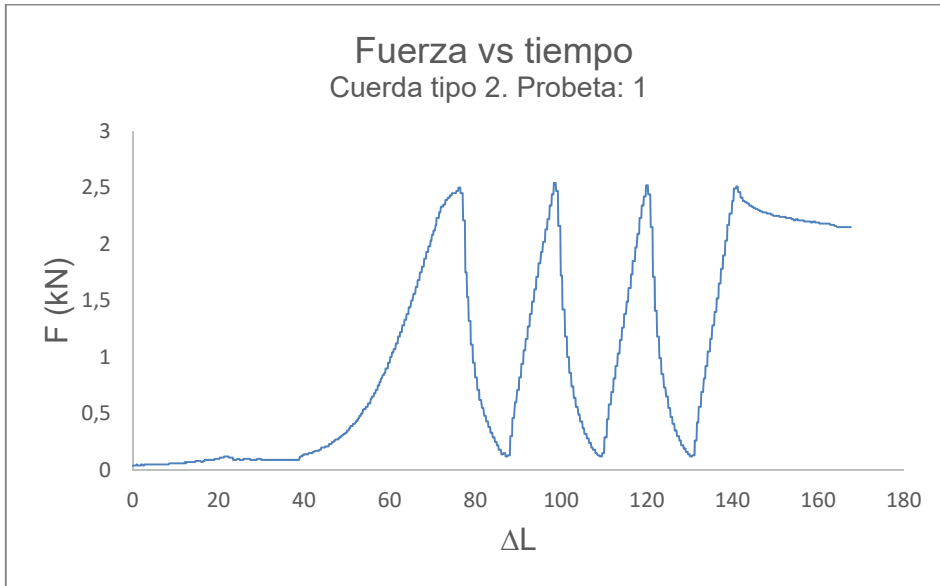
L0 (mm)	55,331
L2 (mm)	55,713
L3 (mm)	64,066
$E = \frac{(l3-l2)}{l2} \cdot 100 (\%)$	14,993

PROBETAS TIPO 2

PROBETA 1

Fecha de ensayo: 20/07/2015

Velocidad de ensayo: 250 mm/min



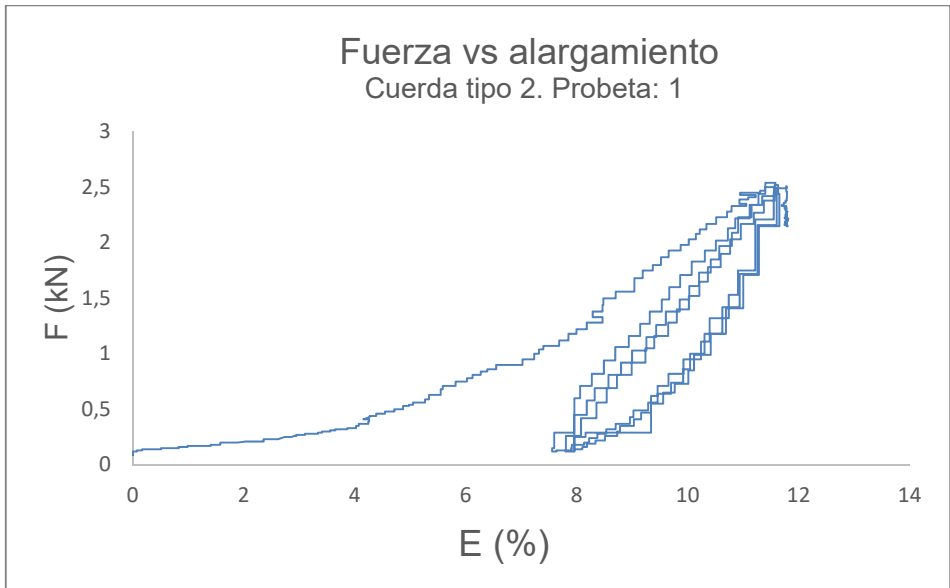


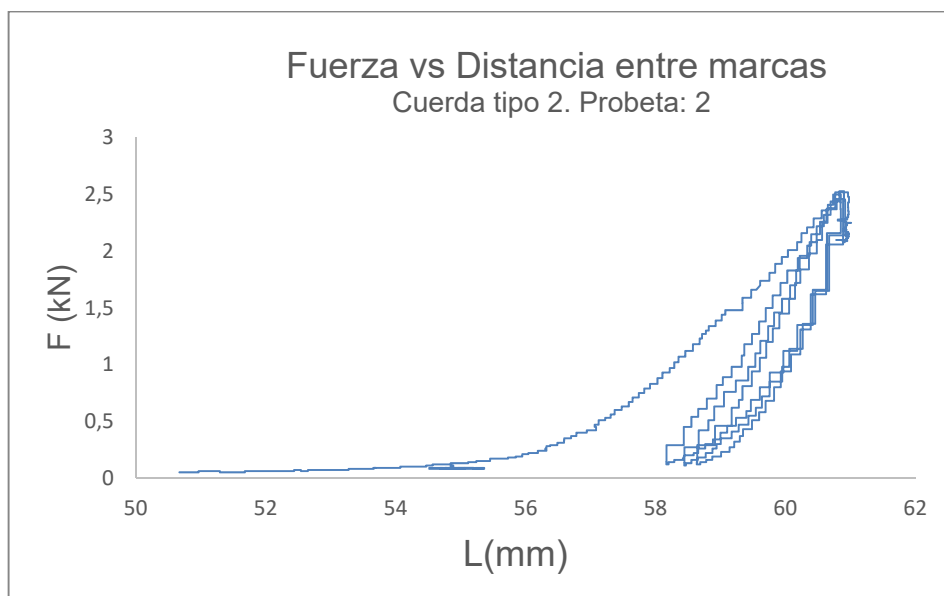
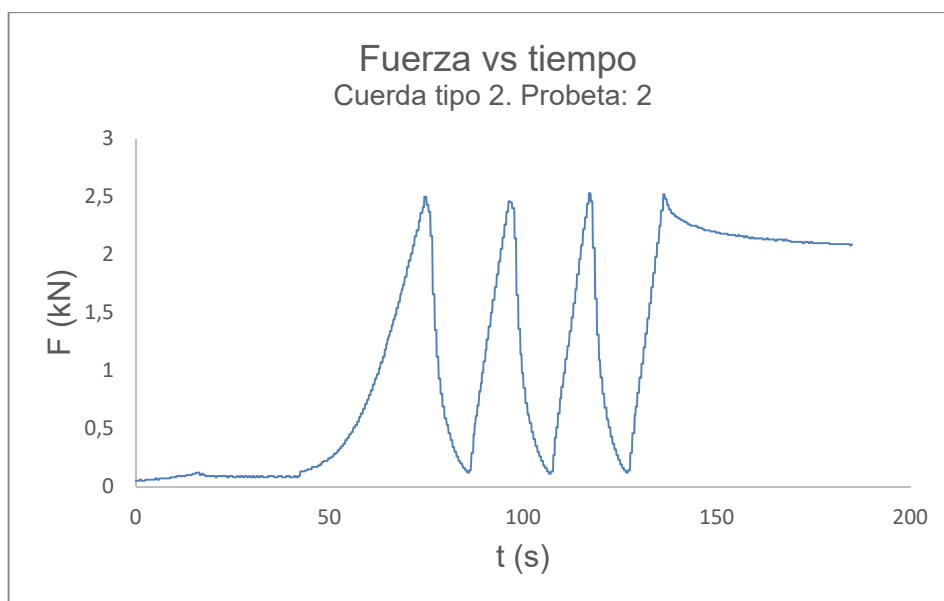
Tabla de resultados:

L0 (mm)	50,413
L2 (mm)	55,066
L3 (mm)	61,551
$E = \frac{(l3-l2)}{l2} \cdot 100 (\%)$	11,777

PROBETA 2

Fecha de ensayo: 20/07/2015

Velocidad de ensayo: 250 mm/min



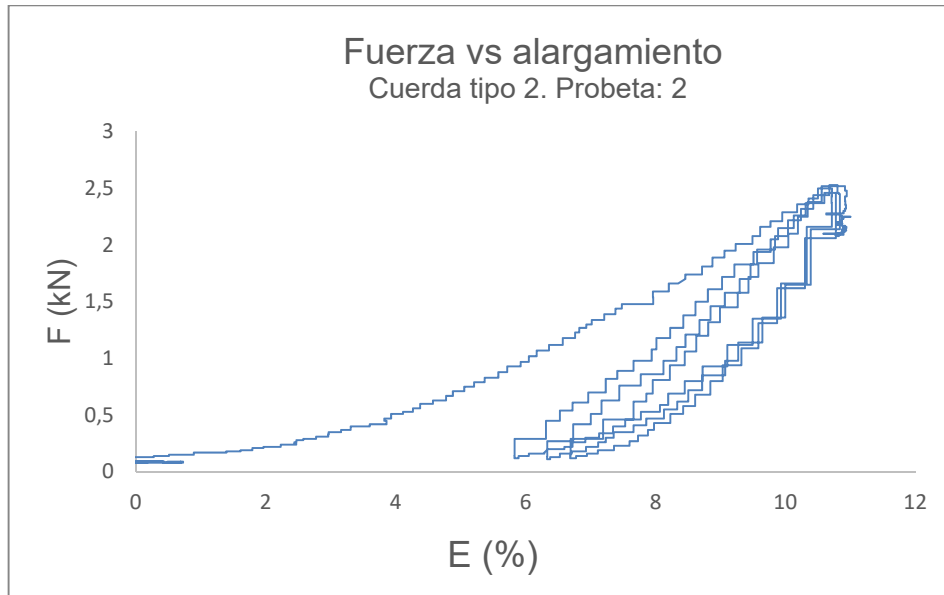


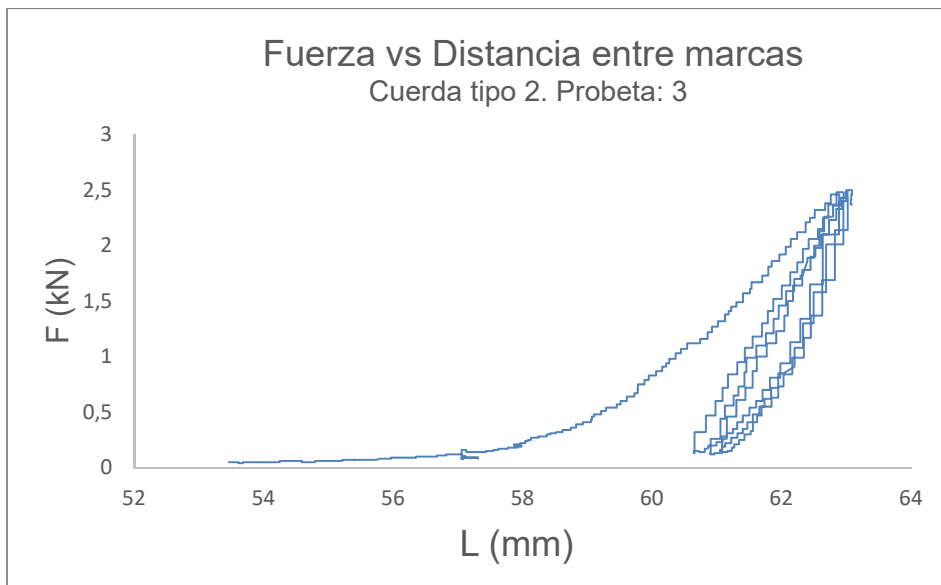
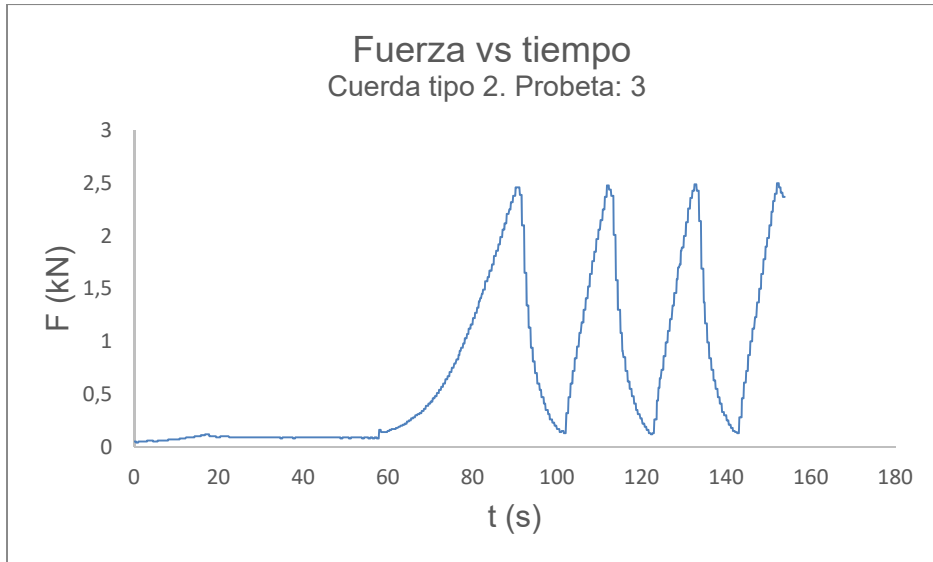
Tabla de resultados:

L0 (mm)	50,671
L2 (mm)	54,962
L3 (mm)	60,948
$E = \frac{(l3-l2)}{l2} \cdot 100 (\%)$	10,891

PROBETA 3

Fecha de ensayo: 22/07/2015

Velocidad de ensayo: 250 mm/min



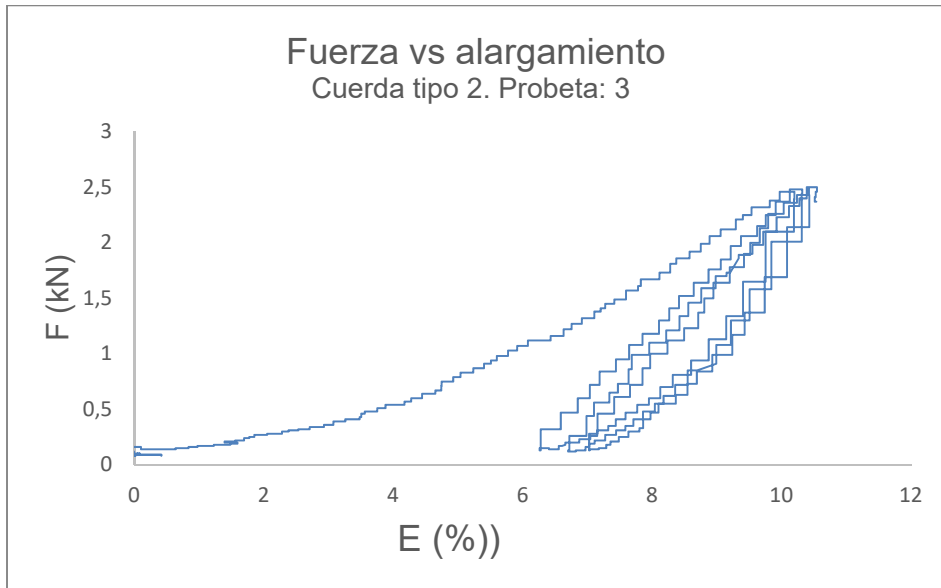


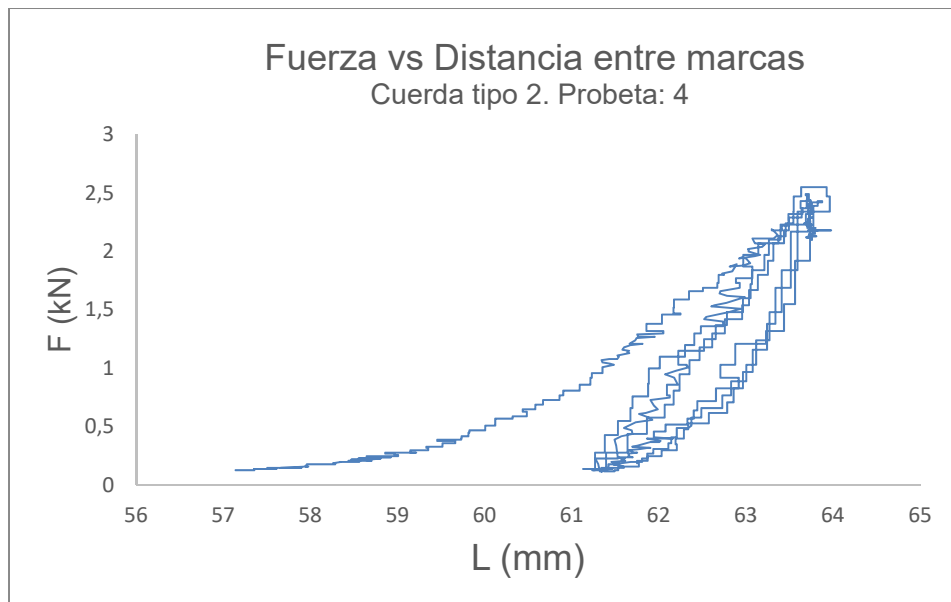
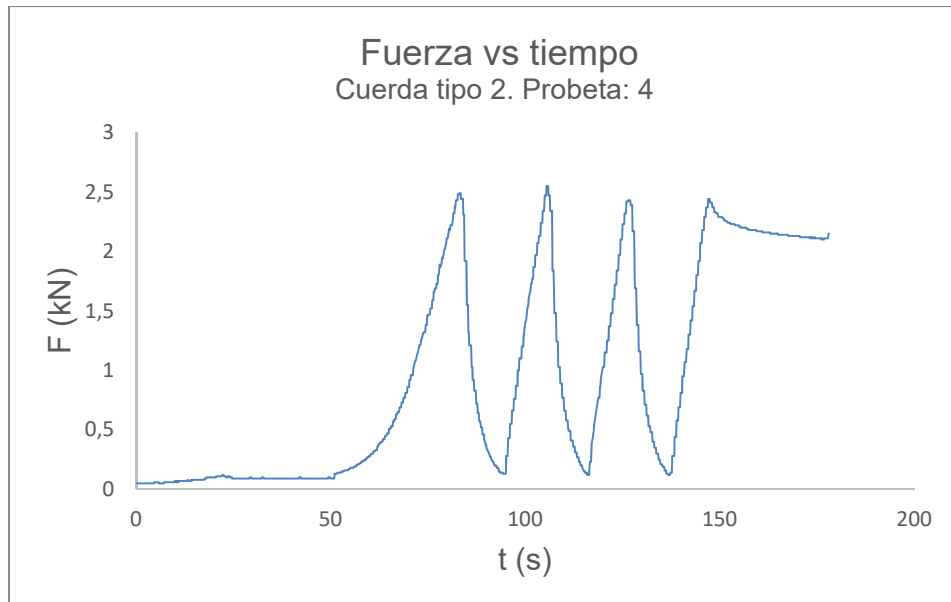
Tabla de resultados:

L0 (mm)	53,463
L2 (mm)	57,071
L3 (mm)	63,077
$E = \frac{(l3-l2)}{l2} \cdot 100 (\%)$	10,526

PROBETA 4

Fecha de ensayo: 22/07/2015

Velocidad de ensayo: 250 mm/min



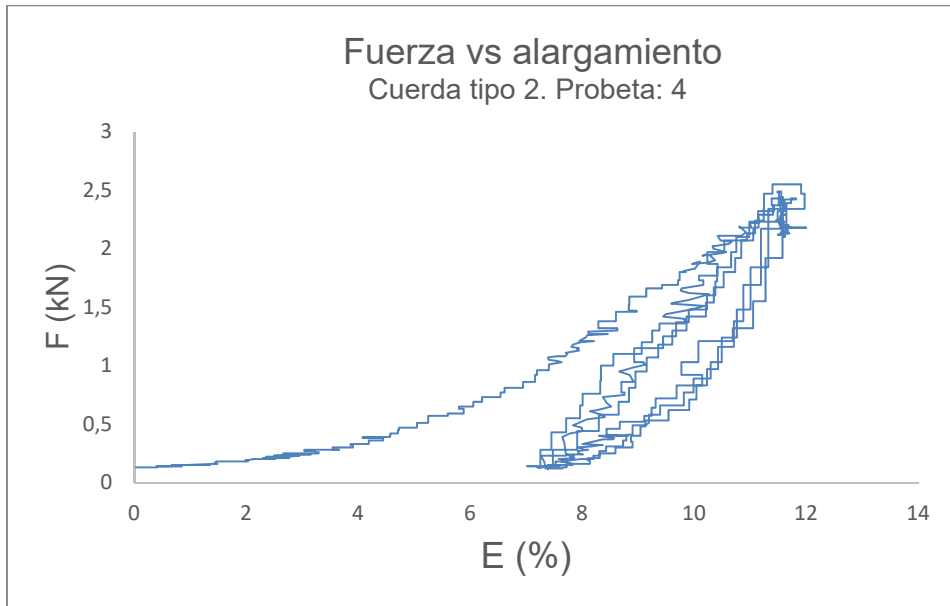


Tabla de resultados:

L0 (mm)	51,739
L2 (mm)	57,126
L3 (mm)	63,978
$E = \frac{(l3-l2)}{l2} \cdot 100 (\%)$	12,001

5.2.4. Tratamiento de datos

Durante la realización del ensayo, se registraron manualmente las medidas l_2 y l_3 con un pie de rey.

En la siguiente tabla, se muestra la comparativa del alargamiento porcentual E a partir de los datos del videoextensómetro, medido a partir del software de procesamiento de datos de la cámara, y de los datos de la medida manual. Se calcula el error porcentual de la medida de alargamiento del videoextensómetro con respecto a la medida de alargamiento real (medida manual).

Tabla. Cálculo del error de alargamiento real vs. videoextensómetro

Nº probeta	E videoext. (%)	E medida manual (%)	Error (%)
Cuerdas tipo 1			
1	12,989	11,5	12,95
2	15,360	16,40	6,34
3	16,126	17,58	8,27
4	14,993	14,27	5,07
Cuerdas tipo 2			
1	11,777	12,57	6,31
2	10,891	11,87	8,25
3	10,526	10,224	2,95
4	12,001	13,18	8,95

6. Discusión de los resultados

Durante la realización de los ensayos, se pudo constatar en ocasiones la falta de precisión de la medida obtenida con el videoextensómetro de la distancia entre marcas realizadas sobre la probeta.

Los errores en las medidas de alargamiento entre los datos obtenidos por el videoextensómetro y los datos medidos manualmente con un pie de rey muestran un error menor de un 8% en el caso de las probetas metálicas y menor de un 13% en el caso de las cuerdas.

Se detecta que los resultados de la medida de alargamiento con videoextensómetro pueden fluctúan, de modo que al aumentar la fuerza aplicada se detecta en ocasiones una disminución del alargamiento. Esto es debido a la mala calidad de la imagen (baja resolución de la cámara) y a la distancia de colocación de la cámara con respecto a la probeta. Estas fluctuaciones pueden verse reflejadas en las tablas de resultados, como se muestra en la figura 6.1.

Fuerza kN	LVDT_10 mm	Posición mm	VE 1 mm	VE 2 mm	Tiempo s
26,16	0,001	101,490	0,092	0,000	68,5
26,16	0,001	101,490	0,092	0,000	68,6
26,47	0,000	101,515	0,092	0,000	68,7
26,47	0,000	101,515	0,089	0,000	69,0
26,47	0,000	101,515	0,089	0,000	69,1
26,79	0,000	101,540	0,089	0,000	69,2
26,79	0,000	101,540	0,135	0,000	69,4
26,79	0,000	101,540	0,135	0,000	69,5
26,79	0,000	101,540	0,135	0,000	69,6
27,10	0,001	101,564	0,135	0,000	69,7
27,10	0,001	101,564	0,177	0,000	70,0
27,10	0,001	101,564	0,177	0,000	70,1
27,44	0,000	101,589	0,177	0,000	70,2
27,44	0,000	101,589	0,185	0,000	70,4
27,44	0,000	101,589	0,185	0,000	70,5
27,44	0,000	101,589	0,185	0,000	70,6
27,77	0,001	101,615	0,185	0,000	70,7
27,77	0,001	101,615	0,201	0,000	71,0
27,77	0,001	101,615	0,201	0,000	71,1
28,09	0,001	101,639	0,201	0,000	71,2
28,09	0,001	101,639	0,178	0,000	71,4
28,09	0,001	101,639	0,178	0,000	71,5
28,09	0,001	101,639	0,178	0,000	71,6
28,41	0,000	101,664	0,178	0,000	71,7
28,41	0,000	101,664	0,221	0,000	72,0
28,41	0,000	101,664	0,221	0,000	72,1
28,73	0,001	101,689	0,221	0,000	72,2
28,73	0,001	101,689	0,203	0,000	72,4
28,73	0,001	101,689	0,203	0,000	72,5

Fig.6.1. Ejemplo tabla de resultados del programa SMC 3000.

Adicionalmente, se puede observar un efecto de gráfica escalonada, con saltos en entre los puntos, debido a la frecuencia de la toma de datos y al desfase entre los datos obtenidos por la máquina de ensayos (Fuerza aplicada) en comparación con la medida del videoextensómetro (longitud y alargamiento). Esta última tiene un ligero desfase con respecto a la primera, debido a que el software de captura de imágenes precisa de tiempo para el procesamiento de la imagen. Este efecto es más pronunciado en el caso del test de tracción con cuerdas, donde se produce un aumento de la deformación alto en un intervalo de tiempo bajo (alta velocidad de deformación).

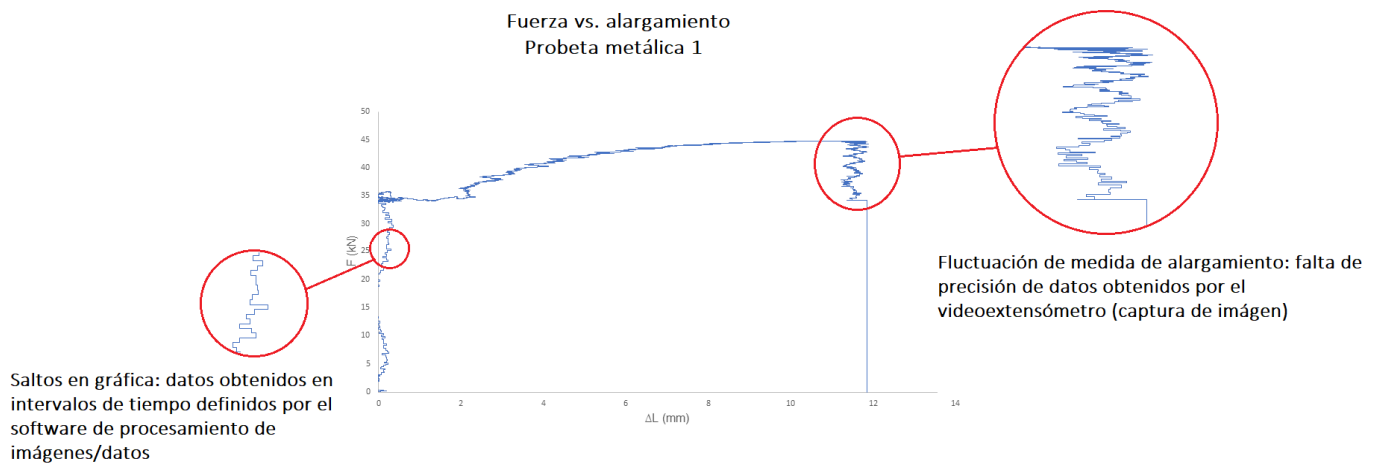


Fig.6.2. Ejemplo de gráfica del test de tracción con una probeta metálica.

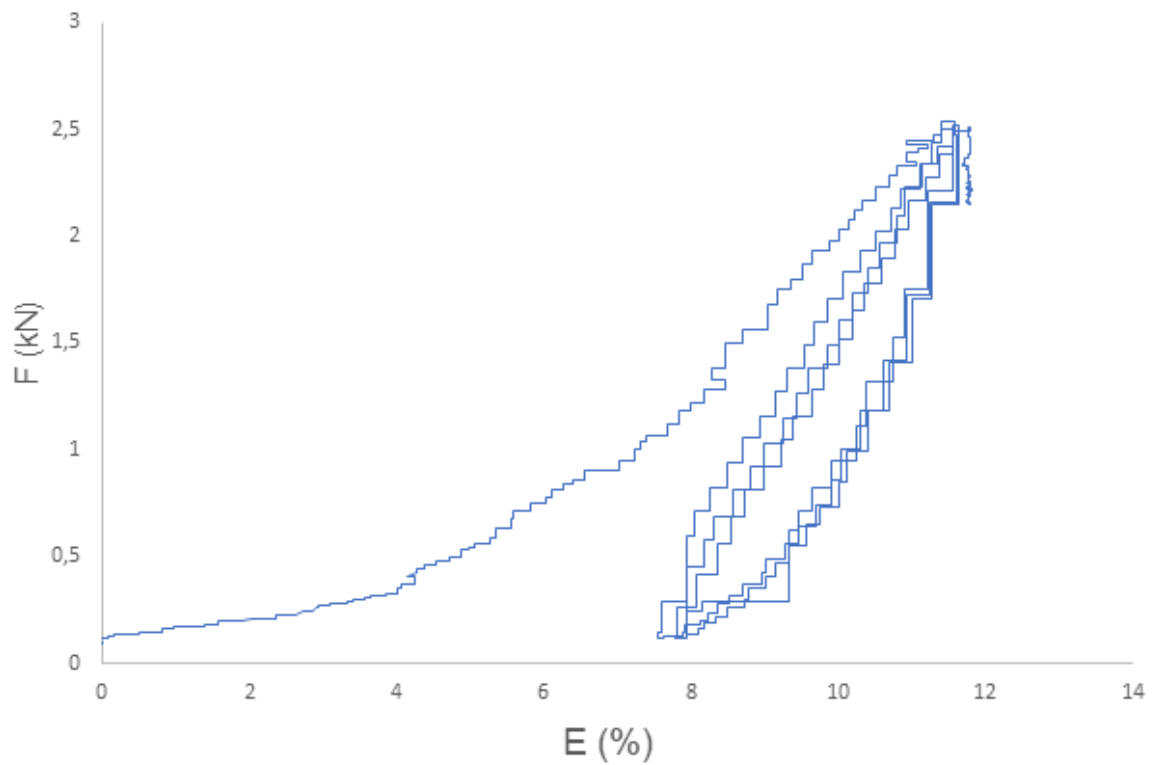


Fig.6.3. Ejemplo de gráfica del test de tracción con una probeta de cuerda de fibra.

Puntualmente, el software de reconocimiento y procesamiento de la imagen puede confundir las marcas realizadas sobre la probeta, de modo que detecte otros puntos de la imagen capturada como si fuese una de las marcas y devolviendo un dato erróneo de longitud entre marcas. Este fenómeno ocurre, principalmente, si el contraste entre las marcas y la probeta no es muy alto o si se realiza un mal ajuste inicial de la imagen en el software VE-1002. Cuanto mayor sea la longitud de interés abarcada existirán más posibilidades de que se produzca este efecto.

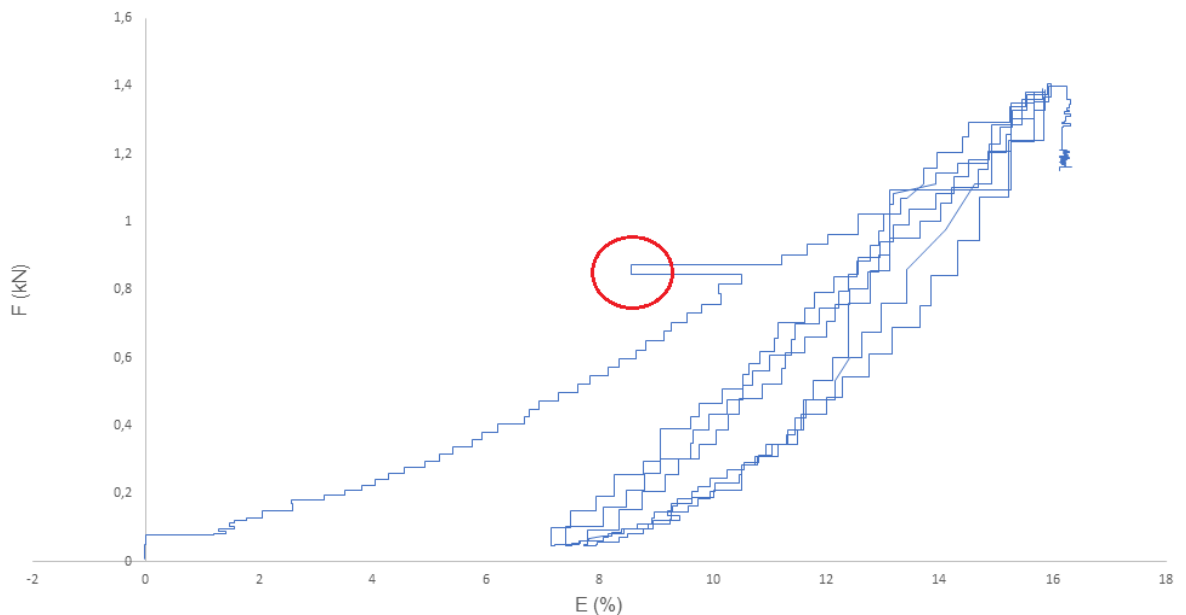


Fig.6.4. Ejemplo de dato incorrecto (salto) debido a un error de identificación de las marcas.

Este tipo de datos son fácilmente identificables puesto que suelen producir saltos en las gráficas relacionadas con las longitudes entre marcas medidas por el videoextensómetro.

7. Conclusiones

El método de medida de deformación a partir de la videoextensometría reporta muchas ventajas a la hora de realizar el análisis de deformaciones. Principalmente, es un método que no interfiere con el material durante los ensayos a realizar. Esto es necesario para materiales como las cuerdas en las que, durante los ensayos de tracción de las mismas, se producen deformaciones y roturas en los cabos, que hacen bastante inadecuado el uso de un extensómetro de contacto.

Este método no sería solo óptimo para materiales cuya medida de deformaciones no fuese posible con un extensómetro de contacto. En mayor o menor medida, el uso de un extensómetro de contacto interfiere con el material durante el test, alterando su comportamiento al colocarlo sobre el mismo, por lo que un extensómetro de “no contacto” sería una alternativa interesante.

Sin embargo, se ha de estudiar por otro lado otros factores, como la precisión de la medida obtenida con el extensómetro a utilizar. Un videoextensómetro con una cámara de baja resolución y un software de procesamiento de datos lento provocará que los resultados sean más inexactos, como se ha podido comprobar en los ensayos documentados en este trabajo.

Por tanto, se concluye que la videoextensometría es una buena alternativa al uso de extensómetros convencionales para la medida de deformaciones de diversos materiales. Como en el caso de los extensómetros de contacto, es importante evaluar la calidad del aparato (en este caso, la óptica de la cámara y

la capacidad de procesamiento del software de imágenes) para el uso óptimo del mismo.

8. Trabajos futuros

A partir de este trabajo, sería interesante continuar el estudio de la videoextensometría realizando ensayos de tracción o compresión sobre otro tipo de materiales y realizar a su vez una comparativa de los resultados obtenidos con extensómetros convencionales.

En el caso de materiales flexibles, como pueden ser materiales plásticos deformables o telas, este tipo de extensometría sería muy útil para el estudio de las deformaciones de estos al ser sometidos a tracción, puesto que se considera que un extensómetro de contacto no sería adecuado para este tipo de probetas.

Adicionalmente, se podría realizar un estudio sobre otros extensómetros de no contacto, como es el caso de los extensómetros laser, cuyo uso en la industria y la investigación es cada vez más extendido y comparar los resultados con los obtenidos en este trabajo.

9. Bibliografía

Aula Tecnología. *Materiales*. Recuperado de http://www.aulatecnologia.com/BACHILLERATO/1_bg/APUNTES/materiales/propiedadesmateriales.html

AENOR. UNE-EN ISO 2307:2011 *Cuerdas de fibra. Determinación de ciertas propiedades físicas y mecánicas*.

AENOR. UNE-EN ISO 6892-1 2010: *Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente*.

ASTM International. ASTM E83-10a *Standard Practice for Verification and Classification of Extensometer Systems*.

CÁCERES ALVARADO, Jose Miguel. *Ensayos mecánicos II: Tracción*. Boletín de prácticas de Ciencia y tecnología de materiales. Universidad de la Laguna, La laguna.

Celda de carga (s.f.) En Wikipedia. Recuperado el 09 de febrero de 2017 de <https://es.wikipedia.org/wiki?curid=3567765>

CLAROS CLAROS, Rolando Ferney; GALLEGO BOTERO, Paula Andrea. *Diseño mecánico de una máquina universal de ensayos para polímeros*. Universidad tecnológica de Pereira, Pereira. 2007.

CORZ RODRIGUES, Alfonso; GARCÍA SÁNCHEZ, F. *Extensometrías y fotoelasticidad*. Volumen 14 de Manuales. Universidad de Málaga.

Ensayo de tracción (s.f.). En Wikipedia. Recuperado el 09 de febrero de 2017 de https://es.m.wikipedia.org/wiki/Ensayo_de_tracci%C3%B3n

Extensometría. (s.f.). En Wikipedia. Recuperado el 09 de febrero de 2017 de <https://es.wikipedia.org/wiki/Extensometr%C3%ADa>

Ingeniería real. *Máquinas de tensión y comprensión en ingeniería*. Recuperado de <https://ingenieriareal.com/tipos-de-maquinas-universales-de-tension-y-compresion/>

HBM Company. *¿Cómo funcionan las galgas extensométricas ópticas?*. HBM. Recuperado de <https://www.hbm.com/es/6827/articulo-como-funciona-una-galga-extensometrica-optica/>

MICROTEST. *Máquinas de ensayo electromecánicas EM2*. Manual de uso. Microtest.

MICROTEST. *SMC3000 95. Software de control y adquisición de datos para ensayos estáticos (versión 20)*. Manual de uso. Microtest, 2010

MICROTEST. *VE-1200. Software de gestión para video extensómetro*. Manual de uso. Microtest, 2006

MCKEIGHAN, Peter C. En: *Nontraditional Methods of Sensing Stress, Strain, and Damage in Materials and Structures*. ASTM International, 2001.

NUÑEZ, C. Et. Al. *Comportamiento mecánico de los materiales*. Vol. II. *Ensayos mecánicos - Ensayos no destructivos*. 2ª Ed. Universitat Barcelona, 2013.

SHARPE, William N. *Springer handbook of experimental solid mechanics*. New York Springer Science Business media, 2008.

VIVEIROS, Meregith, Lin, ZC. *Comparison of a video extensometer over a clip-on extensometer and crosshead motion as a strain measurement technique for testing ninitol specimens*, 2008.

TOWSE, Adam et al. "Non-contacting extensometer with high resolution" En: MCKEIGHAN, Peter C. F.P. (ed). *Nontraditional methods of sensing stress, strain, and damage in materials and structures*. ASTM International, 2001. p. 36-50.