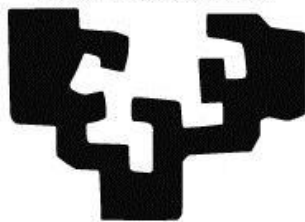


eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

**Universidad** del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea

Facultad de Ciencias Químicas/Kimika Zientzien Fakultatea

*Grado en Química*

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Simulación de ensayos mecánicos mediante software testXpert II

Autor/a: Unai Clemente Idoate

Dirigido por: Pedro M Remiro y Nora Aranburu

San Sebastián, septiembre de 2017



## RESUMEN

El presente trabajo se centra en el estudio del software testXpert II, y en su aplicación para la docencia de asignaturas del área de conocimiento de Ciencia de los Materiales. Este software simula o recrea ensayos mecánicos reales, pero sin el uso de la máquina de ensayos. Dispone de un listado de materiales para ensayar limitado, por lo que, gran parte del trabajo se basa en el aumento de esta biblioteca de materiales.

Después del estudio detallado del programa, se han conseguido elaborar una serie de guías tanto para conocer el funcionamiento y manejo del programa, como para la importación de nuevos materiales a la biblioteca de testXpert II. Con dichas guías, se pretende facilitar el manejo de este programa a futuros usuarios, y también que estos sepan incluir otros materiales nuevos al software, sin la ayuda de un tutor o una persona.

Los materiales nuevos que se han incluido han sido moldeados por inyección y posteriormente se han ensayado a tracción en una máquina universal de ensayos mecánicos Instron 5569, disponible en el laboratorio. Los resultados y curvas obtenidas se revisaron, para después exportarlas al software siguiendo una serie de pasos, los cuales se detallan en la guía anteriormente citada.

Por otra parte, por medio de la Enseñanza Asistida por Ordenador (EAO), se pretende utilizar testXpert II como software educativo para el aprendizaje y adquisición de contenidos relacionados con los ensayos de tracción por parte de los alumnos. Para ello, se ha analizado el efecto de tres parámetros en las propiedades mecánicas de algunos polímeros. Los tres efectos estudiados son los de la temperatura, velocidad de deformación y cristalinidad del material. Basadas en la interactividad y en el autoaprendizaje, se han redactado tres guiones de prácticas para el aula analizando dichos efectos. Además, se han creado tres guiones para el profesor donde se muestra cómo llevar a cabo las prácticas y discutir los resultados de estas.

## **ABSTRACT**

The present work focuses on the study of software testXpert II, and on its use for teaching subjects related to the field of Materials Science. This software simulates or recreates actual mechanical tests, but without the use of the testing machine. It has a limited list of materials to be tested, reason why, much of the work is focused on the increase of this library of materials.

After the detailed study of the program, a series of guides have been developed to know the operation and management of the program, as well as to import new materials into the testXpert II library. With these guides, it is intended to facilitate the management of this program to future users, and also that they know how to include other new materials to the software, without the help of a tutor or a person.

New materials that have been included have been injection molded and have subsequently been tensile tested in the Instron 5569 machine. The results and curves obtained are reviewed, and then exported to the software following a series of steps, which are detailed in the aforementioned guide.

On the other hand, through Computer Assisted Teaching (EAO), it is intended to use testXpert II as educational software for learning and acquiring content related to traction tests by students. For this purpose, the effect of three parameters on the mechanical properties of some polymers have been analyzed. The three effects studied are those of the temperature, rate of deformation and crystallinity of the material. Based on interactivity and self-learning, three practices have been created for the classroom, analyzing these effects. In addition, three scripts for the teacher have been written showing how to carry out the practices and how to discuss the results of these.

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. PARTE EXPERIMENTAL .....	5
2.1. Materiales .....	5
2.1.1. Materiales ensayados con anterioridad.....	5
2.1.2. Nuevos materiales ensayados .....	7
2.2. Técnicas de procesado .....	8
2.2.1. Acondicionamiento de los materiales.....	8
2.2.2. Moldeo por inyección.....	9
2.2.3. Materiales procesados .....	9
2.3. Ensayos de tracción.....	13
2.4. Traspaso de resultados al software testXpert II.....	15
2.5. TestXpert II (Zwick&Roell) .....	21
2.6. Realización de los ensayos para las prácticas propuestas .....	22
3. RESULTADOS .....	27
3.1. Repetitividad y reproducibilidad de los ensayos.....	27
3.2. Funcionamiento del programa .....	29
3.3. Guiones de Prácticas para el alumnado .....	38
3.3.1. Efecto de la velocidad de deformación.....	39
3.3.2. Efecto de la temperatura de ensayo .....	43
3.3.3. Efecto de la cristalinidad.....	45
3.4. Guiones de Prácticas para el profesorado .....	47

3.4.1. Efecto de la velocidad de deformación.....	49
3.4.2. Efecto de la temperatura de ensayo .....	59
3.4.3. Efecto de la cristalinidad.....	69
4. CONCLUSIONES.....	73
5. BIBLIOGRAFÍA.....	75



## 1. INTRODUCCIÓN

La Enseñanza Asistida por Ordenador (EAO) nació en los años 60 en los Estados Unidos, heredando directamente los métodos de trabajo de la Enseñanza Programada propuestos y desarrollados por el psicólogo norteamericano Skinner a finales de los años 50. Poco después aparece un tipo de uso de los ordenadores para la enseñanza basado en la concepción psicogenética del proceso de aprendizaje. Apoyado inicialmente en las ideas de Jean Piaget, se identifica más con el tipo de programas de simulación, entornos abiertos de aprendizaje, etc. [1].

El elevado coste de los equipos (hardware) y la escasez de materiales adecuados (software) hizo que sólo fuera posible en algunas instituciones educativas. La comercialización a gran escala de ordenadores multimedia durante los últimos años ha posibilitado que cambiase radicalmente la situación y cada vez menos familias carecen de uno. Los avances técnicos han posibilitado el desarrollo de programas educativos muy completos en los que, más allá de un texto con imágenes, se obtiene pleno aprovechamiento de las posibilidades multimedia: secuencias animadas de imágenes y vídeo, sonidos y música, etc. Los enseñantes, que históricamente y por costumbre han sido los dueños de la formación, hoy día ven puesto en duda su papel y disminuir su prestigio cada vez más. Está a punto de producirse un cambio de papeles en la formación; el profesor deja de ser el dueño para convertirse en el animador. Aunque la EAO no quiere sustituir al profesor, ya que el profesor debe supervisar su buen uso [1-3].

La utilización inicial de la idea de EAO como utilización de rutinas o de programas de tipo tutorial se ha quedado corta. Dentro de la educación se han ido haciendo y documentando muchas experiencias con otro tipo de materiales a lo largo de los últimos años (herramientas, aplicaciones, etc.) y el panorama se ha enriquecido notablemente: simulaciones, proceso de textos, gestores de bases de datos, gráficos, programas de diseño gráfico, hojas de cálculo, juegos educativos... [4]

La EAO es una metodología que posibilita y facilita la adquisición de unos contenidos de formación a través de un programa de ordenador. Ofrece indudables ventajas en el campo de la formación. Como hemos dicho anteriormente, puede facilitar



la adquisición de unos contenidos a través de un programa de ordenador, de tal forma que el alumno es el receptor de esos contenidos, y el programa de ordenador sustituye al formador en sus funciones de transmitir conocimientos, aportar ejemplos-ejercicios prácticos y controlar el aprendizaje de los alumnos y proporcionarles una información inmediata sobre los resultados. Basada en la interactividad y en el autoaprendizaje, es para muchos una solución eficaz para superar los problemas de la distancia, la adecuación a las necesidades de los alumnos y a las limitaciones de tiempo [5,6].

Un claro exponente de la EAO está en las universidades a distancia, que desde un primer momento han incorporado el ordenador (Internet, materiales multimedia, videoconferencias, etc.) a su instrumental tecnológico ya tradicional (radio, televisión, casete, etc.), configurando así campus universitarios virtuales, como la UNED o las propias aulas virtuales de la UPV/EHU [5,7].

En cuanto al campo de la química, la modalidad más usada de la EAO es la simulación. En estos casos, se emplea la computadora para presentar una escena dinámica. Generalmente esta escena es hecha mediante animación gráfica, a colores y con sonidos, pero no necesariamente. Lo importante de una simulación es el tratar de representar un fenómeno real y dinámico. La simulación permite por ejemplo adquirir la habilidad o aprender las reglas para manipular un fenómeno, mecanismo o dispositivo dinámico y complejo. Dicha modalidad es empleada para ensayar en la computadora experimentos o ensayos de laboratorios de química [2,3].

La aplicación de la tecnología en los mundos de la investigación y de la docencia es un hecho, si además es viable recrear los ensayos físicos en un mundo virtual, ello conllevaría la desaparición de la maquinaria física, lo que sería un ahorro muy importante a nivel económico, dado que un programa no requiere de un gran mantenimiento, y el riesgo para los usuarios de dichas instalaciones ya sea tanto a nivel laboral como a nivel educacional disminuiría a cero [8].

Dada la gran expansión de la tecnología en estos campos, hay muchas herramientas o software que recrean la simulación de ensayos. Se ha procedido a una búsqueda exhaustiva de los programas al alcance de la mayoría de usuarios en entornos industriales o académicos y estos son los más usados en simulación de ensayos: Siemens

PLM NX 8, Ansys Workbench 14.5, Catia V5 R21, MSC Patran, LS-DYNA PrePost, Ansys, Impetus Afea Solver. Existen otros que se necesita una licencia y un gasto económico elevado para su uso [9].

Con respecto al uso de la EAO en el campo de la Ciencia de Materiales, no hay muchos softwares disponibles. Gracias a la subvención del programa de adquisición de infraestructura docente, se adquirió hace cuatro años el software de ensayos virtuales testXpert II, que permite la simulación de ensayos mecánicos realizados en una máquina universal de ensayos mecánicos. Sin embargo, hasta el momento, no se ha utilizado para la docencia en asignaturas del programa de Grado en Química, como la Ciencia de los Materiales, debido a que su funcionamiento requiere de un aprendizaje previo, que es bastante laborioso, y a que la biblioteca de materiales que incorpora es escasa, especialmente de materiales poliméricos.

Por tanto, nuestra principal labor es la de conocer y aprender el funcionamiento correcto del programa, para posteriormente explicarlo para que este pueda usarse en el aula. Para empezar, se exploró el programa y se observó que la cantidad de materiales era muy limitada, ya que en la lista de materiales solo aparecían metales y algún que otro polímero. El software se compró para poder utilizarlo académicamente y para ello, era necesaria la incrementación de la base de datos. El aumento de la biblioteca de materiales, por tanto, es uno de los objetivos de este trabajo. Los materiales que se incorporarán al listado serán únicamente polímeros.

Como se ha dicho anteriormente, el fin de este programa o software es utilizarlo en el aula para el aprendizaje y adquisición de contenidos de formación de los alumnos, específicamente de los ensayos mecánicos. Por eso, otro objetivo de este trabajo es elaborar unos guiones de prácticas y así, utilizar el programa testXpert II en el aula, y de este modo, que el estudiante aprenda la teoría de los ensayos de tracción y como utilizar la máquina de una manera virtual para posteriormente realizar los ensayos reales. Se pretende elaborar una metodología, con instrucciones fáciles de seguir para que tanto el profesor, como los estudiantes, puedan manejar desde el primer momento el software, sin perderse en sus múltiples opciones que dificulten su manejo, y se puedan centrar en el estudio del comportamiento mecánico de los materiales. Para eso, se ha

creado un fichero donde se explica la manera para poder manejar el programa correctamente. Este fichero debería leerlo cualquiera que utilice el programa por primera vez.

De acuerdo con lo anterior, los objetivos de este trabajo son: por una parte, el aprendizaje del manejo del software testXpert II, y por otra, el aumento de la biblioteca de materiales de dicho programa, así como el estudio del comportamiento de los materiales que se incorporan. Otro de los objetivos es la redacción de 3 prácticas para el estudiante que permitan el estudio del efecto de la velocidad, temperatura y cristalinidad en el comportamiento mecánico del material.

La memoria se ha dividido en 5 partes. Tras esta introducción, en la parte experimental se describen los materiales y técnicas de procesado utilizadas, los ensayos mecánicos realizados, así como el software testXpert II y el procedimiento para la incorporación de nuevos materiales a la biblioteca del software. Posteriormente, en el apartado de resultados se muestra una guía con instrucciones para el manejo del software. Además, se proporcionan unas prácticas para la docencia, en las cuales se analiza el efecto de algunos parámetros (temperatura, velocidad y cristalinidad) en los ensayos de tracción y así, utilizar el software en el aula de una manera útil. Se finaliza con las conclusiones más relevantes y un listado de las referencias bibliográficas consultadas.

## **2. PARTE EXPERIMENTAL**

Como ya se ha comentado en el capítulo anterior, el software de simulación testXpert II viene con una biblioteca de materiales limitados. Aumentar la colección de materiales es el principal objetivo de este trabajo. En este capítulo se detallan los nuevos materiales que se han incorporado a la base de datos, así como los métodos de procesado y las técnicas de ensayo utilizadas.

### **2.1. Materiales**

Los nuevos materiales que han sido incluidos en el software, todos ellos polímeros, se han conseguido de diferentes fuentes.

Por una parte, se aprovecharon los materiales que se habían ensayado con anterioridad y cuyos resultados estaban almacenados en el disco duro de la máquina de tracción de nuestro laboratorio.

Por otra parte, otros nuevos materiales que se incluyeron fueron moldeados por inyección para obtener probetas de tracción que fueran posteriormente ensayadas específicamente para este fin.

Con esto se pretende tener una amplia colección de materiales poliméricos de características y comportamientos mecánicos diferentes (amorfo, semicristalino, cauchos...).

#### **2.1.1 Materiales ensayados con anterioridad**

Para el ahorro de coste y de tiempo de trabajo, con el consentimiento de los autores, se aprovecharon los resultados de ensayos de tracción de materiales procesados y ensayados con anterioridad por otras personas en nuestros laboratorios.

Todos los parámetros con los que se habían hecho los ensayos, tales como velocidad del ensayo o dimensiones de las probetas, fueron revisados para poderlos incluir correctamente en la base de datos de testXpert II. También se buscó información complementaria como el fabricante, la marca y grado de cada material.

En la siguiente tabla se muestra el listado de los materiales que se encontraron e incorporaron a la biblioteca del programa.

*Tabla 1. Materiales incorporados provenientes de ensayos previos*

<b>Material</b>	<b>Grado</b>	<b>Fabricante</b>
Polibutilén adipato tereftalato (PBAT)	Ecoflex F Blend C1200	Basf
Poliestireno de alto impacto (HIPS)	Styron 485	Trinseo
Poliamida 4,10 (PA410)	EcoPaxx Q150-D	DSM
Poliamida 6 (PA6)	Durethan B30S	Lanxess
Poliamida 6,6 (PA66)	Zytel 101 LNC10	Dupont
PA 6,6 reforzada con fibra de vidrio (30%)	Zytel 70G30HSLR	Dupont
Poliamida 12 (PA12)	Rilsan AMNO T2D	Arkema
Polibutilén tereftalato (PBT)	Valox 31S	Sabic
Polietilenimina (PEI)	Ultem 1000	General Electric
Polietilén tereftalato (PET)	Novapet CR	Brilen SA
Polipropileno (PP)	Isplen PP070 G2M	Repsol YPF

Poliestireno (PS)	Styrolution PS 116L	Ineos
Poliuretano termoplástico (TPU)	Pearblond ECO D590	Muguinsa

### 2.1.2. Nuevos materiales ensayados

Con el fin de aumentar aún más la colección de materiales de la base de datos, se eligieron, de entre los disponibles en el laboratorio, aquellos polímeros con comportamientos mecánicos característicos. Estos materiales fueron procesados para obtener probetas con las que realizar los ensayos de tracción.

En la siguiente tabla se detallan los nuevos materiales incluidos en la biblioteca del programa, con sus respectivas marcas y grados.

*Tabla 2. Nuevos materiales incorporados a la base de datos*

<b>Material</b>	<b>Grado</b>	<b>Fabricante</b>
Acrilonitrilo-co-butadieno-co-estireno (ABS)	Magnum 8434	Trinseo
Polietileno de baja densidad (LDPE)	19N430	Ineos
Poliamino-éter (PAE)	Blox XU 19040-02	Dow Plastics
Policarbonato de bisfenol-A (PC)	Tarflon Iv1900R	Idemitsu Petrochemicals

Poliácido láctico (PLA)	Ingeo 3052D	Natureworks
Polimetil metacrilato (PMMA)	Altuglas V825T	Arkema

## 2.2 Técnicas de procesado

Los distintos materiales se moldearon por inyección para obtener probetas con las que hacer ensayos de tracción. Dependiendo del polímero, fue necesario un secado previo. A continuación, se describen los procedimientos empleados.

### 2.2.1. Acondicionamiento del material

Los materiales poliméricos presentan distintas capacidades de absorción de humedad ambiental. El nivel de absorción depende fundamentalmente del tipo de material, especialmente de su estructura química y de las condiciones ambientales (temperatura, humedad relativa...). La presencia de humedad en el polímero puede dar a lugar a defectos estéticos o funcionales en los productos durante el procesado en fundido e incluso a la degradación hidrolítica del material, por ejemplo, en polímeros de condensación [10]. Por este motivo, hay que procesar el material con un nivel de humedad suficientemente bajo. Para ello, el polímero se somete a un tratamiento de secado previo a los procesos de moldeo.

El secado de los polímeros higroscópicos se realizó en una estufa de aire forzado Selecta. Cada material higroscópico requiere una temperatura y tiempo diferente de secado, que se indica en la tabla 3. Con polímeros de baja Tg se emplearon temperaturas más bajas y tiempo de secado mayores, para evitar el reblandecimiento del polímero en la estufa.

*Tabla 3. Condiciones de secado utilizadas*

<b>Material</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Tiempo</b>
ABS	90°C	2 h
PAE	80°C	6 h
PC	90°C	2 h
PLA	90°C	2 h
PMMA	90°C	4 h

### **2.2.2. Moldeo por inyección**

Después del secado, en su caso, los diferentes materiales son moldeados por inyección para conseguir probetas de tracción Tipo IV acordes a la norma ASTM D-638. Para ello, se utilizó la inyectora Battenfeld BA 230E provista del molde adecuado. Está equipada con un tornillo de plastificación alternativo de 18 mm de diámetro, cuya relación L/D es de 17,8. La fuerza máxima de cierre de la inyectora es de 23 toneladas. El molde dispone de una cavidad para probetas de tracción y otra de impacto. De estas dos probetas solo se utilizará la de tracción.

Las condiciones de inyección son diferentes dependiendo del material y, por tanto, se detallarán uno a uno los diferentes polímeros con sus respectivas condiciones de moldeo y sus características principales, según indican los fabricantes.

### **2.2.3. Materiales procesados**

A continuación, se muestran los materiales poliméricos que han sido procesados por inyección, con sus respectivas características principales.



### *POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD*

El polietileno de baja densidad o LDPE se produce por medio de una polimerización por radicales libres, que es un proceso de polimerización a altas presiones y a altas temperaturas.

El polietileno de baja densidad es un termoplástico comercial, semicristalino, translúcido y más bien blanquecino, flexible, liviano, impermeable, inerte, no tóxico, tenaz, con poca estabilidad dimensional, pero fácil procesamiento y de bajo coste. Además, posee excelentes propiedades eléctricas pero una resistencia a las temperaturas débil. Su resistencia química también es muy buena, tiene buena dureza y es resistente al impacto en bajas temperaturas.

El LDPE utilizado es el 19N430 y ha sido fabricado por Ineos. El 19N430 tiene una excelente flexibilidad y buena transparencia para ser procesado por inyección. Tiene una temperatura de fusión de 109°C. El módulo elástico y tensión de fluencia son de 170 y 9 MPa respectivamente y su deformación puede llegar hasta el 550% de su largura inicial. Para la obtención de las probetas, fue inyectado a una temperatura de 200°C.

### *POLICARBONATO DE BISFENOL-A*

El policarbonato de bisfenol-A es un termoplástico fácil de trabajar, moldear y termoformar, y es utilizado ampliamente en la actualidad, aunque su uso se está cuestionando recientemente en algunas aplicaciones por la posible presencia de restos de bisfenol-A que pueden causar problemas fisiológicos, no del todo demostrados [11].

Este termoplástico empieza a ser muy común tanto en los hogares como en la industria o en la arquitectura por sus tres principales cualidades: gran resistencia a los impactos, a la temperatura, así como a su transparencia. El policarbonato se usa en una gran variedad de campos: industria alimenticia, arquitectura, agricultura, juguetes, electrónica, automoción, maquinaria...

El grado utilizado es Tarflon Iv 1900R, el cual es suministrado por Idemitsu Petrochemical. Tiene una temperatura de transición vítrea cercana a 150°C, por lo que

fue procesado a 265°C. En cuanto a las propiedades mecánicas, su resistencia a la tracción es alrededor de 60 MPa.

#### *POLI (ACRILONITRILLO-CO-BUTADIENO-CO-ESTIRENO)*

El poli (acrilonitrilo-co-butadieno-co-estireno) o ABS es un copolímero obtenido de la polimerización del estireno y acrilonitrilo en la presencia del polibutadieno, resultado de la combinación de los tres monómeros, originando un plástico que se presenta en una gran variedad de grados dependiendo de las proporciones utilizadas de cada uno y del método de fabricación.

Es un termoplástico duro y resistente a los impactos, muy utilizado en automoción y otros usos tanto industriales como domésticos. Es un plástico de ingeniería termoplástico amorfo.

En este caso, el ABS utilizado es del grado Magnum 8434 y esta proporcionado por el fabricante Trinseo. De acuerdo con la hoja de especificaciones del fabricante, Magnum 8434 es una resina que reúne alto brillo y resistencia media a las altas temperaturas. En cuanto a los beneficios que tiene respecto a otros ABS, es la estabilidad térmica que tiene durante una amplia gama de temperaturas de proceso, lo que da mayor libertad para el diseño de diferentes piezas.

Su temperatura de transición vítrea,  $T_g$ , es aproximadamente de 105°C. Dado que el ABS es un polímero multifásico, esta  $T_g$  correspondería a la matriz. El fabricante no especifica la  $T_g$  de la fase cauchosa, pero recomienda procesar este material a 260°C.

#### *POLIMETILMETACRILATO*

El PMMA es un polímero termoplástico altamente transparente que se obtiene de la polimerización del monómero metilmetacrilato, por vía radical.

A veces se le denomina vidrio acrílico. A veces se utiliza como alternativa al policarbonato si se necesita mayor transparencia, resistencia UV o a los rasguños y si las altas propiedades contra impactos no son cruciales para la aplicación.

El polimetacrilato de metilo PMMA Altuglas, el cual es usado en este trabajo, es un termoplástico amorfo, a menudo usado como alternativa más ligera y resistente a las roturas que el vidrio. Presenta una alta rigidez y dureza. Tiene una Tg de 105°C y fue inyectado a 230°C.

Gracias a las propiedades mencionadas permiten al PMMA ser el polímero preferido de muchas aplicaciones en los sectores de la automoción, iluminación, construcción, cosmética y medicina.

### *POLI (L-LACTIDA)*

El ácido poliláctico (PLA) es un polímero biodegradable derivado del ácido láctico. Es una resina termoplástica altamente versátil, que se obtiene a partir de recursos renovables. Este polímero tiene muchas características equivalentes e incluso mejores que muchos otros polímeros derivados del petróleo, lo que hace que sea eficaz para una gran variedad de usos.

En cuanto a sus características, la poli (L-lactida) es un polímero inodoro. Es claro y brillante como el poliestireno. Resistente a la humedad y a la grasa. Tiene características de barrera del sabor y del olor. El módulo de elasticidad del PLA es comparable al polietileno. Pero es más hidrofílico que el polietileno, tiene una densidad más baja. Su inflamabilidad es baja. El PLA se puede formular para ser rígido o flexible y puede ser copolimerizado con otros materiales.

El PLA usado en este trabajo es el 2003D, proporcionado por NatureWorks. Se procesa fácilmente y está diseñado específicamente para su uso en envases de alimentos frescos. Ingeo 2003D es un grado transparente y de alto peso molecular, por lo tanto, es amorfo. Su Tg es de aproximadamente 55°C y fue inyectado a 180°C. El PLA tiene los enantiómeros D y L, el 2003D, mayormente está compuesto por isómeros L (96%) [12].

## *POLI (AMINO-ÉTER)*

Las resinas de poli (amino-éter) constituyen una familia de polímeros de reciente desarrollo que se obtienen mediante la reacción entre una amina y un diglicidil éter aromático.

Son importantes principalmente por sus buenas propiedades barrera frente a los gases, propiedades que varían ligeramente en función del tipo de amina y éter empleado. Sus aplicaciones más inmediatas aparecen relacionadas con la industria del envasado de alimentos y bebidas debido a sus excelentes propiedades frente a los gases.

En concreto, la resina empleada en este trabajo es suministrada por Dow Plastics bajo la denominación Blox XU 19040.02. Es un polímero amorfo, y por tanto completamente transparente, de color ligeramente anaranjado, que exhibe una elevada tenacidad, rigidez y claridad óptica, además de una excelente adhesión a gran cantidad de sustratos. Esta resina presenta una buena estabilidad en fundido a temperaturas de hasta 240°C, y es fácilmente procesada mediante métodos como el moldeo de inyección como en nuestro caso, donde fue inyectada a 235°C.

### **2.3. Ensayos de tracción**

Los ensayos de tracción han sido una de las partes fundamentales de este trabajo por varios motivos. Dado que uno de los objetivos del trabajo es la alimentación de la base de datos del software, para ello, es necesario hacer los correspondientes ensayos de cada material a incluir. Por otra parte, gracias a estos ensayos, es posible analizar las propiedades mecánicas de los materiales para poder compararlos entre ellos, además de poder analizar diferentes efectos, como la temperatura y velocidad de ensayo, por ejemplo.

El ensayo de tracción se basa en estirar una probeta a una velocidad de alargamiento constante hasta la rotura de la misma, midiendo simultáneamente la fuerza necesaria y el alargamiento producido. Se trata de ensayos relativamente cortos (10-15 minutos) en los que el efecto del tiempo está poco representado. La curva

experimental, fuerza-alargamiento, puede convertirse fácilmente en una curva tensión-deformación nominal a través de las siguientes relaciones:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \qquad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

donde F es la fuerza aplicada,  $A_0$  la sección inicial de la probeta,  $\Delta l$  el alargamiento provocado en la probeta y  $l_0$  la longitud inicial de la misma.

Los ensayos de tracción se llevaron a cabo en una máquina universal de ensayos mecánicos Instron 5569 controlada por un ordenador que se encarga de la introducción de los parámetros del ensayo, y la adquisición y registro de los resultados. Se ensayaron seis o siete probetas por cada material, moldeadas según la norma ASTM D638, a fin de obtener un promedio de resultados.

La distancia inicial entre mordazas fue 64 mm, y la velocidad de desplazamiento del puente 10 mm/min. La temperatura de ensayo fue de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ . Estos parámetros se utilizaron en todas las probetas ensayadas, excepto al analizar los efectos de temperatura y velocidad de deformación. La célula de carga siempre fue la misma, 5 kN.

Para cada probeta, se midieron tanto la anchura como el espesor de la zona central con ayuda de un calibre digital para calcular las tensiones nominales. La medida del alargamiento se realizó a través de la separación entre las mordazas. No se usó el extensómetro, dada la dificultad de exportar los datos con extensómetros al programa testXpert II.

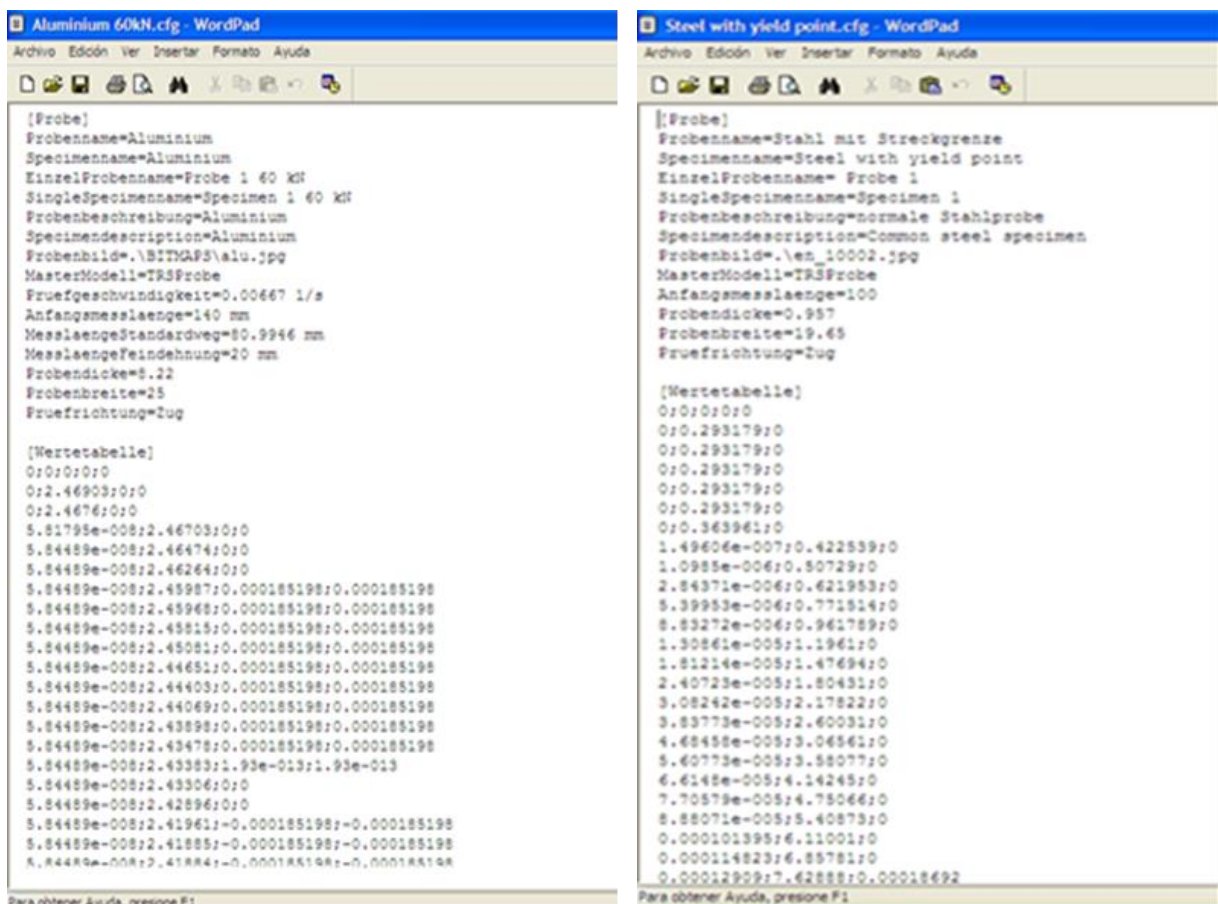
Durante los ensayos, la máquina registra la curva fuerza-alargamiento, de la cual se obtiene la curva tensión-deformación. A partir de esta última, se obtienen los resultados deseados para el análisis de las propiedades mecánicas de cada material.

Las curvas de tensión-deformación obtenidas tienen que ser traspasadas al software de ensayos virtuales y así, aumentar su base de datos. En el siguiente apartado, se explica cómo se hizo este proceso.

## 2.4. Traspaso de los resultados de ensayos al software testXpert II

En este apartado se explica cómo se traspasaron los resultados y curvas obtenidas de los ensayos de tracción realizados en la Instron 5569, al software testXpert II. En este proceso son varias cosas las que hay que tener en cuenta.

Para empezar, había que saber en qué formato tenían que estar los ficheros de los ensayos que se querían incluir en el software. Para ello, se comprobaron los materiales que ya estaban incluidos y se estudiaron detalladamente para saber en qué estructura había que poner cada archivo. Se escogieron distintos tipos de ficheros y se estudiaron detalladamente para saber que era cada parámetro, puesto que todo estaba en alemán. Se observa que todos los archivos tienen una cabecera y debajo, sus respectivos resultados. He aquí dos ejemplos de los ficheros encontrados.



Lo primero que se hizo fue traducir la cabecera. Todos los archivos tenían la suya, y en ella, se detallan las condiciones del ensayo (material, nº de probeta, tipo de ensayo,

velocidad de ensayo, dimensiones de la probeta), parámetros que hay que incluir para que los datos sean correctos. Así quedaría la traducción de la cabecera.

```

Aluminium 60kN.cfg - WordPad
Archivo Edición Ver Insertar Formato Ayuda
[Probe]
Probename=Aluminium
Specimenname=Aluminium
EinzelProbename=Probe 1 60 kN
SingleSpecimenname=Specimen 1 60 kN
Probenbeschreibung=Aluminium
Specimendescription=Aluminium
Probenbild=.\BITMAPS\alu.jpg
MasterModell=TR3Probe
Pruefgeschwindigkeit=0.00667 1/s
Anfangsmesslaenge=140 mm
MesslaengeFeindehnung=20 mm
Proben Dicke=8.22
Probenbreite=25
Pruefrichtung=Zug
[Wertetabelle]
(Muestra)
Nombre de la probeta
Nombre del espécimen
Nombre de la muestra único
Nombre del espécimen único
Descripción de la muestra
Descripción del espécimen
Imagen de la muestra
Modelo maestro (tipo de ensayo)
Velocidad de prueba
Distancia inicial
Longitud del extensómetro
Espesor de la muestra
Anchura de la muestra
Dirección del ensayo
[Tabla de valores]

```

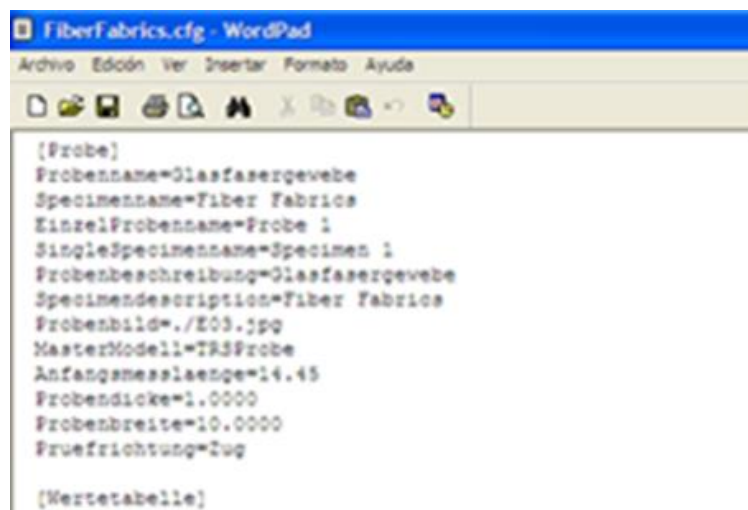
Debajo de la cabecera, aparecen los resultados del ensayo. Dependiendo del archivo, estos resultados presentaban diferentes columnas. Algunos tenían 4 columnas separadas por comas, como se puede ver en las imágenes anteriores. Otros solamente 2 columnas, como se puede apreciar en la siguiente imagen.

```

FiberFabrics.cfg - WordPad
Archivo Edición Ver Insertar Formato Ayuda
[Probe]
Probename=Glasfasergevebe
Specimenname=Fiber Fabrics
EinzelProbename=Probe 1
SingleSpecimenname=Specimen 1
Probenbeschreibung=Glasfasergevebe
Specimendescription=Fiber Fabrics
Probenbild=.\E05.jpg
MasterModell=TR3Probe
Anfangsmesslaenge=14.45
Proben Dicke=1.0000
Probenbreite=10.0000
Pruefrichtung=Zug
[Wertetabelle]
0;0
0;0.0208463
0;0.0208463
0;0.0208463
0;0.0208463
0;0.0208463
0.000354564;0.0215933
0.000630055;0.0215933
0.00141859;0.0232325
0.00249907;0.0233031
0.00362974;0.0274439
0.00476441;0.0274524
0.00589902;0.029456
0.00703375;0.0314086
0.00816841;0.0333007
0.00930308;0.0353774
0.0104377;0.0373502
0.0115724;0.0391733
0.0125418;0.0412729
0.0137112;0.0412781
0.0138459;0.0432509
0.0149806;0.045088
0.0161152;0.0470788
0.0172499;0.0490799
0.0183846;0.052274
Para obtener Ayuda, presione F1

```

Los diferentes tipos de archivos correspondían aparentemente a distintos tipos de ensayo (tracción, compresión, flexión...). Mediante prueba/error, se estudió el significado de cada columna y después de unas comprobaciones, se averiguó que los ensayos de 4 columnas correspondían a ensayos que usaban extensómetro. Como se ha dicho anteriormente, en este trabajo no se usó el extensómetro y, por tanto, solo utilizaremos resultados de 2 columnas. Se analizó cómo y en qué orden había que incluir las 2 columnas de resultados, es decir, si los datos eran tensión-deformación o fuerza-alargamiento. Después de unas cuantas pruebas, se comprobó que había que incluirlos en tensión-deformación con las unidades de MPa y %, respectivamente. La primera columna correspondía a los resultados de la deformación, y la de la derecha a los de tensión. De entre todos los ensayos incluidos en la base de datos original del software, se localizó el ensayo que más se pareciese a los nuestros, es decir, ensayo de tracción sin extensómetro y resultados de 2 columnas. El formato de su cabecera, excluyendo los valores de resultados, se utilizó para el traspaso de nuestros ensayos, como posteriormente esta explicado. En la siguiente imagen aparece el elegido, y que se usará como plantilla para importar ensayos a la biblioteca.



```
[Probe]
Probename=Glasfasergevebe
Specimennamen=Fiber Fabrics
EinzelProbennamen=Probe 1
SingleSpecimennamen=Specimen 1
Probenbeschreibung=Glasfasergevebe
Specimendescription=Fiber Fabrics
Probenbild=./E03.jpg
MasterModell=TR3Probe
Anfangsmesslaenge=14.45
Proben Dicke=1.0000
Probenbreite=10.0000
Pruefrichtung=Zug

[Wertetabelle]
---
```

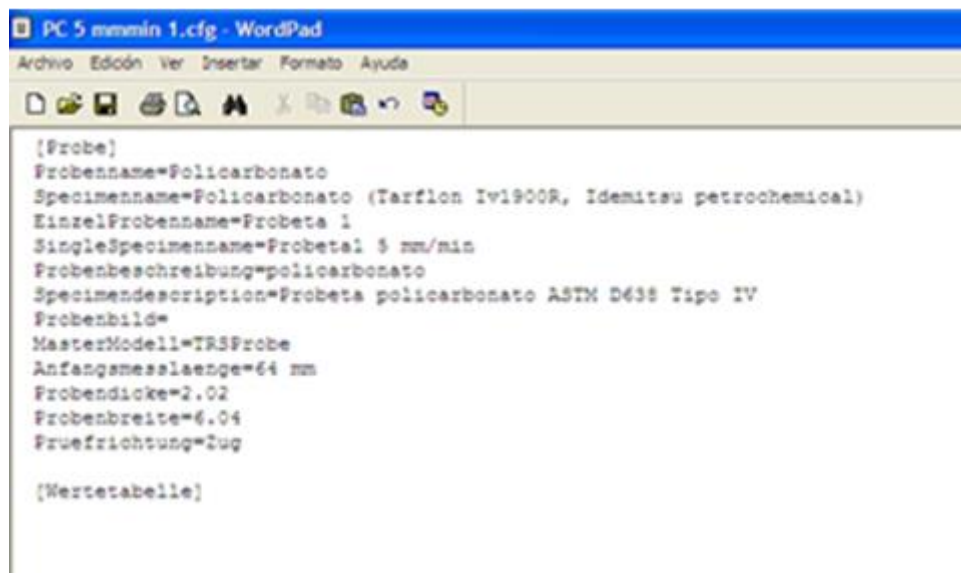
A continuación, después de comprobar el formato de los archivos a traspasar al software, se crearon métodos en la Instron del laboratorio, que proporcionasen los resultados de los ensayos realizados en el formato correcto para que el traspaso de resultados fuese lo más rápido y sencillo posible. Para la cabecera, se debía presentar la velocidad de ensayo y las dimensiones de la probeta. Para los datos de la curva, los



valores tenían que ser los de tensión-deformación (MPa-%), y no la fuerza-alargamiento como se hace normalmente.

Por otra parte, el formato del fichero de los resultados de los ensayos hechos por la Instron no era el mismo que el que había que incluir en el software. En la Instron, los resultados o curvas obtenidas estaban en formato de Excel (.csv). En cambio, los ficheros incluidos en el programa estaban en CFGFile (.cfg), formato que es específico del testXpert II. Por tanto, para cada probeta a incluir, hubo que realizar una serie de pasos para el traspaso adecuado.

Imaginemos que queremos incluir en la biblioteca 6 probetas de policarbonato. Primero, se selecciona el fichero anteriormente elegido como plantilla para el traspaso de nuestros resultados y se adecúa con los parámetros correspondientes para el material a incluir. Es decir, se cambia la cabecera con los parámetros adecuados para estas nuevas probetas a incluir (nombre del material, número de probeta, dimensiones...) y se crea un archivo referencia sin las columnas de resultados, que quedaría de la siguiente manera.



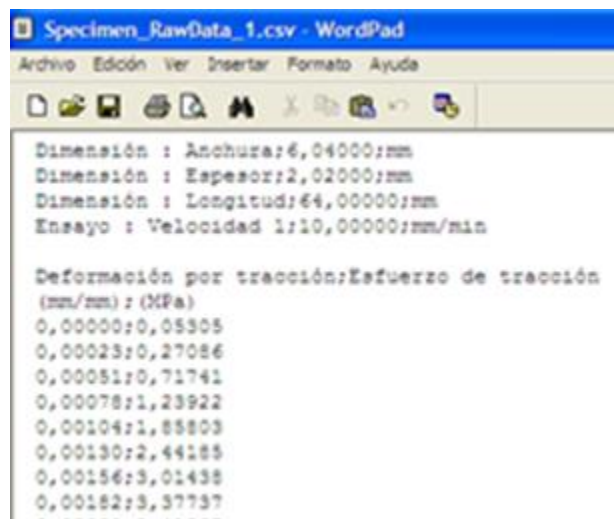
```
[Probe]
Probename=Policarbonato
Specimensname=Policarbonato (Tarflon Iv1900R, Idemitsu petrochemical)
EinzelProbename=Probeta 1
SingleSpecimensname=Probeta1 5 mm/min
Probenbeschreibung=policarbonato
Specimensdescription=Probeta policarbonato ASTM D638 Tipo IV
Probenbild=
MasterModell=TRSProbe
Anfangsmesslaenge=64 mm
Probedicke=2.02
Probenbreite=6.04
Pruefrichtung=Zug

[Wertetabelle]
```

Este archivo referencia se duplica las veces que haga falta, dependiendo de las probetas que haya para incluir. Es decir, si queremos incluir 6 probetas de policarbonato, se harán 6 copias del archivo referencia. En el encabezamiento de cada archivo de estos, en la cuarta fila se cambiará el número de probeta y, en la undécima y duodécima,

espesor y anchura, respectivamente. Por tanto, los 6 archivos ya no son iguales. Cada uno de ellos corresponderá a la probeta correspondiente.

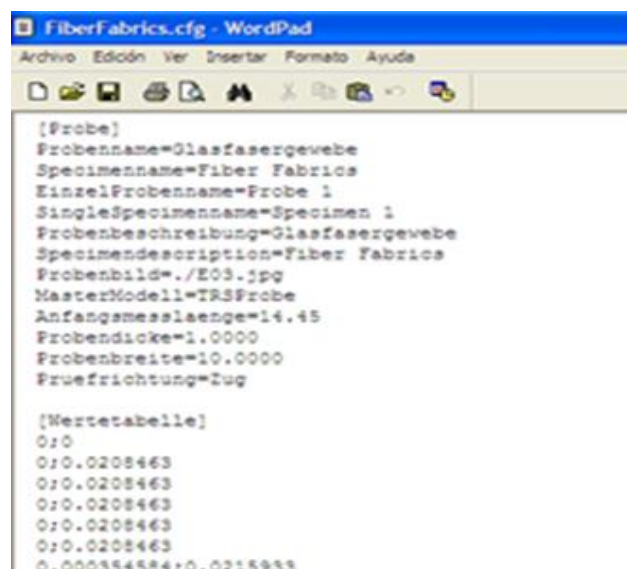
Para acabar, solo quedaría incluir las columnas de los resultados de tensión-deformación de manera adecuada. El archivo Excel con los resultados se abre con el WordPad y se observa que el separador decimal utilizado es la coma. En cambio, si abrimos con el WordPad los archivos ya incluidos en el software, se observa que los decimales se separan por puntos. Se comprobó que si incluíamos un material con los decimales separados por comas el ensayo no se realizaba y el programa no hacía la lectura correcta de los datos. Por tanto, es imprescindible sustituir el separador coma por el separador punto. En la primera imagen (obtenida por la Instron) se observa que los decimales se separan por comas. En la de abajo (material que está incluido en el software) se separan por puntos.



```
Specimen_RawData_1.csv - WordPad
Archivo Edición Ver Insertar Formato Ayuda

Dimensión : Anchura:6,04000:mm
Dimensión : Espesor:2,02000:mm
Dimensión : Longitud:64,00000:mm
Ensayo : Velocidad 1:10,00000:mm/min

Deformación por tracción:Esfuerzo de tracción
(mm/mm) : (MPa)
0,00000:0,05305
0,00023:0,27086
0,00051:0,71741
0,00078:1,23922
0,00104:1,85803
0,00130:2,44185
0,00156:3,01438
0,00182:3,37737
.....
```

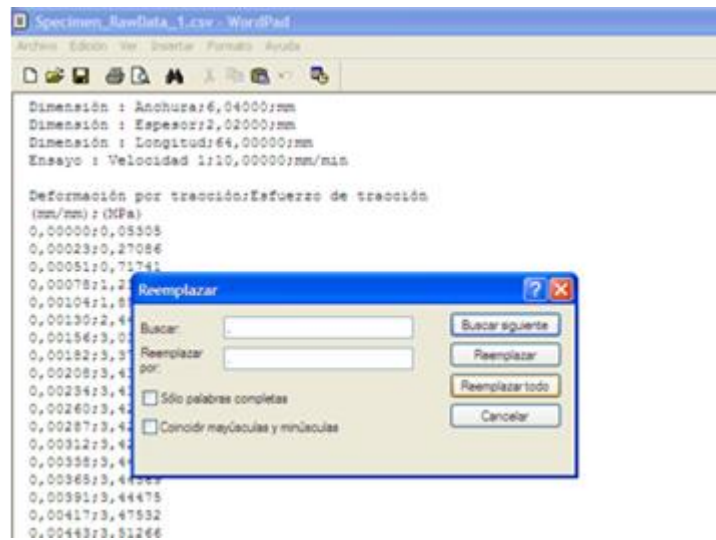


```
FiberFabrics.cfg - WordPad
Archivo Edición Ver Insertar Formato Ayuda

[Probe]
Probenname=Glasfasergeebe
Specimensname=Fiber Fabrics
EinzelProbenname=Probe 1
SingleSpecimensname=Specimen 1
Probenbeschreibung=Glasfasergeebe
Specimensdescription=Fiber Fabrics
Probenbild=./E03.jpg
MasterModell=TRSProbe
Anfangsmesslaenge=14.45
Proben Dicke=1.0000
Probenbreite=10.0000
Pruefrichtung=Zug

[Wertetabelle]
0:0
0:0.0208463
0:0.0208463
0:0.0208463
0:0.0208463
0:0.0208463
0.000354584:0.0215933
```

Por tanto, para copiar los resultados del archivo Excel al creado por nosotros, esto habrá que tenerlo en cuenta. Para empezar, se abren los dos archivos con el WordPad, tanto el (.csv) como el (.cfg). En el archivo con los resultados (.csv), exportado de Instron, se copian las dos columnas a la vez. Nos vamos al archivo (.cfg), del testXpert II, y debajo de “[Wertetabelle]”, traducido al castellano “tabla de valores”, se pega lo copiado. Ahora solo quedaría reemplazar las comas que separan los decimales por puntos. Para este paso, habrá que clicar en la parte superior donde pone “Edición→Reemplazar” y decirle que queremos reemplazar comas por puntos, para acabar clicando en “reemplazar todo”. A continuación, se muestra la ventana con lo anteriormente explicado.



Una vez que se hayan realizado todos los pasos, tendremos el archivo con la correspondiente cabecera y sus resultados de ensayos correctamente aplicados. Por tanto, estará listo para ser incluido al software. Para este último paso, habrá que saber en carpeta del programa habrá que incluirlo. Cuando se hayan traspasado los archivos a la carpeta, aparecerán en el listado de materiales de la máquina virtual. Esta sería la dirección donde se incluyen los materiales con el formato CFGFile (.cfg):

[C:\Zwick\testXpert II\simtc\CFG].

A continuación, se muestra un resumen del traspaso de resultados de un material ensayado en la Instron al software testXpert II.

- 1) Se crea el método en la Instron para que la curva que se obtenga sea tensión-deformación.
- 2) Ya con el ordenador, se abre un archivo de un material ya incluido en el software y se cambia la cabecera según el nuevo el material, y este archivo referencia, se copia tantas veces como probetas haya.
- 3) Probeta a probeta, vamos copiando los resultados de tensión-deformación del archivo obtenido por la Instron al creado por nosotros (archivo referencia).
- 4) Se reemplazan las comas por puntos, para que luego el software pueda leer correctamente los resultados.
- 5) Incluir el fichero o archivo .cfg en el directorio [C:\Zwick\testXpert II\simtc\CFG].

## **2.5. TestXpert II (Zwick & Roell)**

TestXpert II es un software para el ensayo de materiales, que se ejecuta sobre Microsoft Windows. Es un programa que realiza ensayos tanto de tracción, flexión, compresión u otros de una manera virtual con la biblioteca de materiales que tiene incluida.

El software está dividido en dos partes, el programa (testXpert II V3.5) y la máquina (Virtual Testing Machine testControl V3.5), al igual que en una máquina de ensayos real. La máquina virtual simula el comportamiento de una máquina de ensayos reales. Pero en vez de hacer el ensayo sobre una probeta real, toma los resultados tensión-deformación desde una biblioteca de ensayos realizados previamente en una máquina real.

El programa testXpert II puede ir conectado a una máquina real, o como en nuestro caso, a la máquina virtual. Su funcionamiento es idéntico en ambos casos. En la parte del programa, se controlan los parámetros de ensayo y se registran los resultados. Esto se detallará posteriormente en el apartado “funcionamiento del programa”.

En la siguiente tabla se muestra una comparación de los apartados del software testXpert II y la máquina de tracción Instron que hay en el laboratorio.

Tabla 4. Comparación entre testXpert II y Instron 5569

	<b>TestXpert II</b>	<b>Instron 5569</b>
<b>Programa</b>	testXpert II V3.5	Bluehill 2
<b>Máquina</b>	Virtual Testing Machine testControl V3.5	Instron 5569

En general, el software es una máquina de ensayos virtual. Al igual que cuando se hacen ensayos en la máquina real, hay que escoger un método, en el que se especifican las condiciones del ensayo tales como tipo de ensayo, velocidad de ensayo, célula de carga usada, geometría de las probetas... Además, da la opción de elegir cómo y cuáles quieres que sean los resultados que calcule.

Resumiendo, el funcionamiento es sencillo, 1) se carga el método de ensayo que se desea, 2) se elige el material a ensayar, 3) se introducen las dimensiones de la probeta, 4) se sujeta la probeta con las mordazas y 5) comienza el ensayo. Al acabar, se obtiene la curva tensión-deformación y los resultados para el posterior análisis de ellos. Todos los detalles del funcionamiento del software se explican en el apartado “funcionamiento del programa”.

## **2.6. Realización de los ensayos para las prácticas propuestas**

Como se ha dicho anteriormente, se han propuesto tres prácticas para la docencia de asignaturas del área de Ciencia de los Materiales en las que se analiza el efecto de tres parámetros diferentes en los ensayos de tracción. Estos efectos son los de la velocidad, temperatura y cristalinidad del material. A continuación, se detalla cómo se han realizado los diferentes ensayos para comprobar estos efectos. En el apartado de resultados se muestran los guiones para el profesor y para el alumnado de las prácticas propuestas.

## *EFFECTO DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACION*

En este apartado se ha estudiado la influencia que tiene la velocidad de deformación en el comportamiento y las propiedades mecánicas de un material, en nuestro caso, del policarbonato. Para ello, se ha procesado el policarbonato por inyección y así, conseguir varias probetas iguales y ensayarlas a diferentes velocidades.

Se han elegido cuatro velocidades distintas, dentro del intervalo permitido por la máquina, con suficiente margen entre ellas para poder ver correctamente el efecto de la velocidad en las propiedades. Las velocidades han sido las siguientes: 0,5; 5; 50 y 200 mm/min y en cada una de ellas se han ensayado 3 probetas. A continuación, para cada velocidad, se creó un método de ensayo en la Instron y luego, se hicieron los ensayos. A partir de aquí, se analizan los resultados.

Para empezar, se verifica la reproducibilidad y repetibilidad de los resultados en cada velocidad, conforme se ha explicado en el apartado anterior. Se comprobó que las curvas fuesen razonablemente parecidas, y que ninguna de ellas se saliese del resultado esperado.

Después, tras verificar la correcta repetitividad y reproducibilidad de los resultados, pasamos a analizar la influencia de la velocidad del ensayo para un mismo material. Para ello, se escogió una curva representativa de cada velocidad y posteriormente se introdujeron en un mismo grafico para poder compararlas. Este análisis esta realizado en el guion de la práctica del profesor en el apartado de resultados.

## *EFFECTO DE LA TEMPERATURA*

En el estudio de la influencia de la temperatura en los ensayos de tracción, al igual que en el de la velocidad, el material a ensayar ha sido el policarbonato. Se ha procesado el policarbonato para conseguir probetas ASTM D638 tipo IV.

Para poder analizar el efecto de la temperatura, teniendo en cuenta que el policarbonato es un polímero amorfo, se eligieron 5 temperaturas diferentes por debajo

de la Tg (152°C) y fueron estas: 22 (temperatura ambiente), 70, 120, 140 y 148°C. En cada una de las temperaturas se ensayaron 4 probetas.

Para programar la temperatura de ensayo se utilizó una cámara climática proporcionada por la misma máquina de ensayos Instron 5569.

En este apartado, es muy importante que la probeta a ensayar este bien termoestabilizada a la temperatura de ensayo. Por tanto, antes de cada ensayo, las probetas fueron introducidas durante 15-20 minutos en la cámara para que fuesen aclimatándose. Aun así, entre ensayo y ensayo, la cámara requería abrirse para poder sujetar la siguiente probeta. Por consiguiente, se necesitaba un espacio de tiempo de aclimatación para cada probeta después de que la cámara fuese abierta. Este espacio de tiempo fue de 20-30 minutos dependiendo de la temperatura. En cuanto a lo demás, los ensayos se ejecutaron igual que los ensayos sin cámara climática.

### *EFECTO DE LA CRISTALINIDAD*

En este apartado se estudia la influencia que tiene la cristalinidad en los ensayos de tracción. El material que se ha utilizado en esta práctica es un polímero semicristalino, la poliamida 6,6 o nylon 6,6.

Para poder estudiar el efecto, algunas probetas de nylon 6,6 han sido calentadas a una temperatura superior a su Tg para conseguir una mayor cristalinidad y posteriormente, poder compararla con la de las probetas con la cristalinidad inicial. Para ello, se escogieron 5 probetas y se metieron en la estufa durante 1 hora a una temperatura de 80 °C.

La cristalinidad de las muestras se midió por DSC. Es una técnica que, mediante barridos realizados a velocidad constante de calentamiento, permite determinar las propiedades térmicas más importantes de los materiales poliméricos, como la Tg y la Tm. Asimismo, permite determinar las entalpías implicadas en los procesos de cristalización y fusión de materiales semicristalinos.

Los análisis calorimétricos se llevaron a cabo en un calorímetro diferencial de barrido Perkin Elmer DSC-7. Cada muestra fue sometida a un barrido de calentamiento

de 30°C a 300°C a una velocidad de 20°C/min y posteriormente a un barrido de enfriamiento a la misma velocidad.

Los calores de fusión se midieron en el barrido de calentamiento, a partir de las áreas bajo los picos. La cristalinidad de cada muestra, inicial y recristalizada, se calculó asumiendo una entalpía de cristalización del nylon 6,6 100% cristalino de 226 J/g [13].

Con el nylon 6,6 inicial se logró una entalpía de 73,25 J/g y para el recristalizado 111,56 J/g. Por tanto, las muestras que tenemos tienen una cristalinidad de 32,4% y 49,3%, las cuales se han conseguido por medio de la siguiente ecuación.

$$\% \text{ cristalinidad} = \frac{\Delta H \text{ de la muestra}}{226 \text{ J/g}} \times 100\%$$

Una vez comprobada la cristalinidad de cada probeta, se ensayan a tracción para poder analizar el efecto de la cristalinidad en las propiedades mecánicas. Los ensayos se efectuaron hasta rotura con una velocidad de 10 mm/min y temperatura ambiente.





### **3. RESULTADOS**

Después de haber incluido nuevos materiales en la biblioteca del software testXpert II, se ha decidido crear guiones de prácticas para el alumnado para que el programa pueda ser usado en docencia. Antes de las prácticas, se muestra un fichero llamado “funcionamiento del programa” para la persona que vaya a usar el programa por primera vez, ya sea profesor o alumno. En éste se detallan los pasos a seguir para usar el programa de una manera sencilla.

Como se ha dicho anteriormente, se han decidido crear tres prácticas y así, poder trabajar con el programa y también, analizar el comportamiento mecánico de algún material frente a diferentes efectos en los ensayos de tracción. Estos efectos son los de la temperatura, velocidad y cristalinidad.

En cada ensayo realizado y posteriormente en las curvas obtenidas se ha analizado la repetitividad de los resultados en un mismo material. Por tanto, a continuación, se muestra como ha sido este proceso y más adelante, se detallan las practicas realizadas. Cada práctica está dividida en dos partes, la práctica para el alumno y la práctica para el profesor. En esta última aparecen los resultados de cada práctica, así como las respuestas de las posibles preguntas de los alumnos.

#### **3.1. Repetitividad y reproducibilidad de los ensayos**

Todo ensayo mecánico en su aplicación al proceso de medida de una propiedad de un material lleva con él asociada una precisión. Al ensayar distintas muestras de un mismo material, manteniendo constantes todas las condiciones de ensayo, lo más probable es que no obtengamos idénticos resultados. Esto es debido a los errores que se cometen en la preparación de probetas, en el proceso de medida, y a la propia variación de las propiedades de unas probetas a otras.

Por lo tanto, conocer a partir de la aplicación de un número finito de ensayos el verdadero valor que tiene una determinada propiedad de un material resulta prácticamente imposible. Pero podemos determinar a partir de estos resultados un intervalo en el cual tengamos una gran probabilidad de que se encuentre incluido el

valor de la propiedad que estamos evaluando. La amplitud de este intervalo es lo que nos determina la precisión del proceso de medida [14].

En nuestro caso, interesa la repetitividad, ya que está hace referencia a los procesos de medida realizados en cortos intervalos de tiempo, en un laboratorio, por un mismo operador y con un mismo equipo; exactamente como nosotros lo hemos realizado. Por una parte, se trata de analizar los resultados obtenidos y rechazar los valores aberrantes, valores que según el estadístico empleado son casos raros, excepcionales, que se salen de lo esperado.

Para analizar mejor la repetitividad existe el test de Cochran, con el cual se obtiene la desviación y valor de la repetitividad. Nosotros, en cambio, solo nos centraremos en rechazar los valores o curvas aberrantes, cuando estas se salgan de lo normal, quitando importancia al punto de rotura, ya que es normal que varíe.

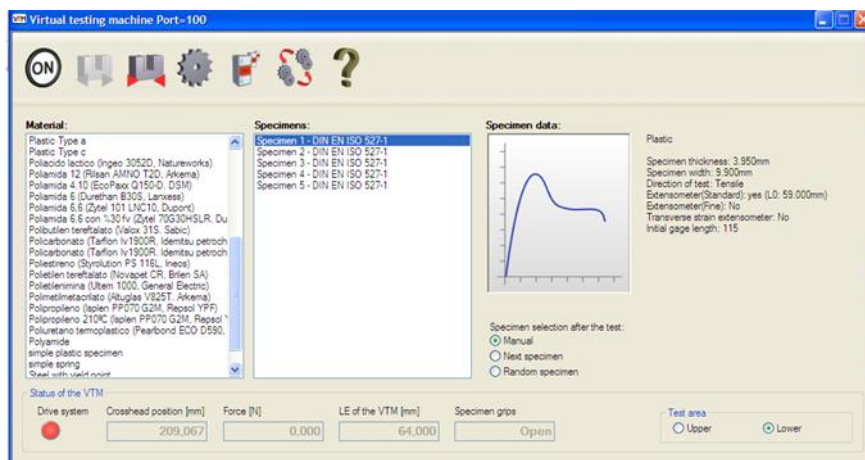
## 3.2. Funcionamiento del programa

El software está dividido en dos módulos, el programa de control de la máquina (testXpert II V3.5) y la máquina virtual (Virtual Testing Machine testControl V3.5), al igual que en una máquina de ensayos real. Seguidamente se explican cada uno de estos módulos.

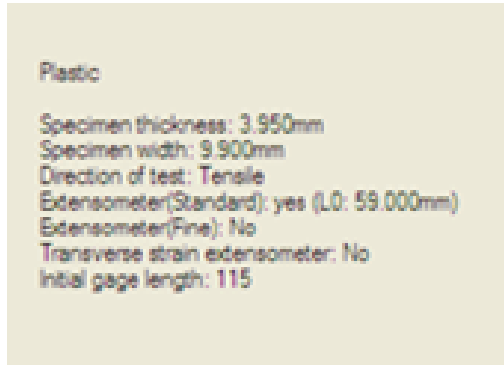
### 1) MÁQUINA VIRTUAL

La parte de la máquina es la más sencilla. Para abrir la máquina solamente habrá que clicar en el icono que pone VTM y que aparece en el escritorio. En ésta, aparece el listado de todos los materiales que es posible ensayar incluidos en la biblioteca. Dentro de cada material se detallan las diferentes probetas del mismo, con sus correspondientes detalles del ensayo, tal como el tipo de ensayo, la velocidad, el espesor, la anchura o la distancia inicial entre mordazas.

Por ejemplo, en la siguiente pantalla se muestra la página principal de la máquina virtual. El listado de la parte izquierda son todos los materiales de la biblioteca. Si se pincha en alguno de estos materiales, en el listado del centro aparecen las probetas del material seleccionado. Más a la derecha, aparece el ejemplo de curva que dará el ensayo de esa probeta. A la derecha del gráfico, aparecen los detalles de la probeta seleccionada.



En la siguiente imagen se muestra maximizada la zona donde aparecen los detalles de la probeta, ya que estos son relevantes para el ensayo y es importante saber el significado de cada parámetro para posteriormente sincronizarlo con el programa.

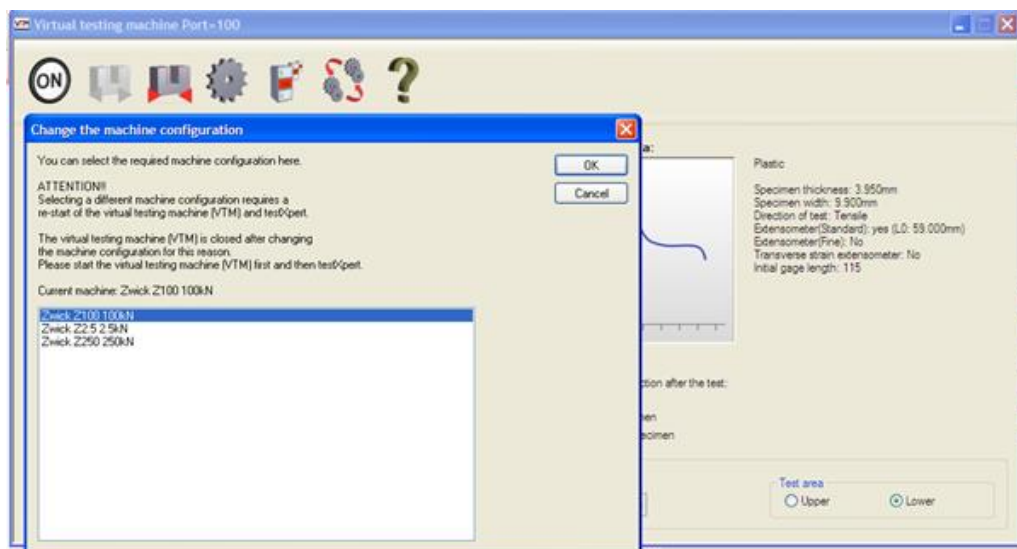


De arriba abajo:

- Espesor de la probeta
- Anchura de la probeta
- Tipo de ensayo: Tracción
- Uso de extensómetro
- Distancia inicial entre mordazas

En la imagen de arriba, cabe destacar que el extensómetro estándar es el nombre que le da el programa a la medida del alargamiento por medio de la separación entre mordazas.

En VTM testControl, también tenemos la opción de escoger entre tres células de carga diferentes (2,5 kN; 100 kN o 250 kN). Para seleccionar la célula de carga, debemos clicar en el botón que está a la izquierda del signo de interrogación y entonces nos aparecerá la ventana que se muestra a continuación.



Además, al igual que en una maquina real, podemos abrir o cerrar las mordazas para que el material este sujeto y pueda ensayarse correctamente. Estos movimientos

de las mordazas se realizan con los iconos segundo y tercero empezando por la izquierda (en la imagen anterior).

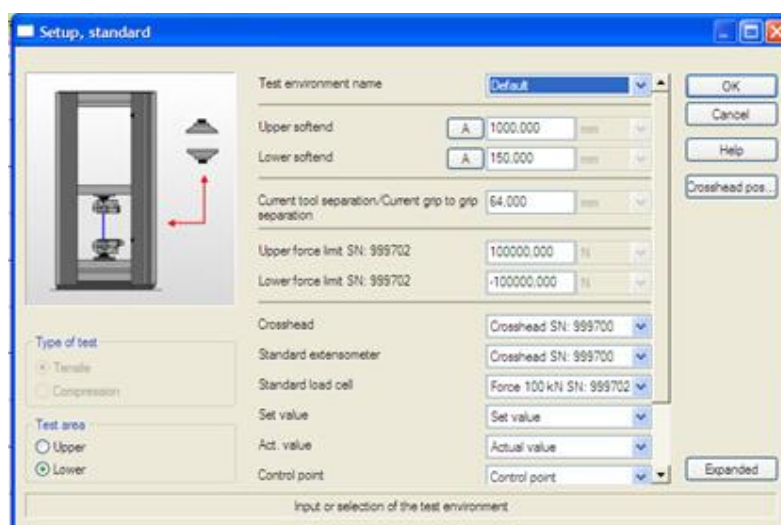
## 2) PROGRAMA DE CONTROL

Aquí se explica cómo configurar el equipo para realizar ensayos. En primer lugar, se sincroniza la máquina con el software de control y luego se ajustan los parámetros del ensayo.

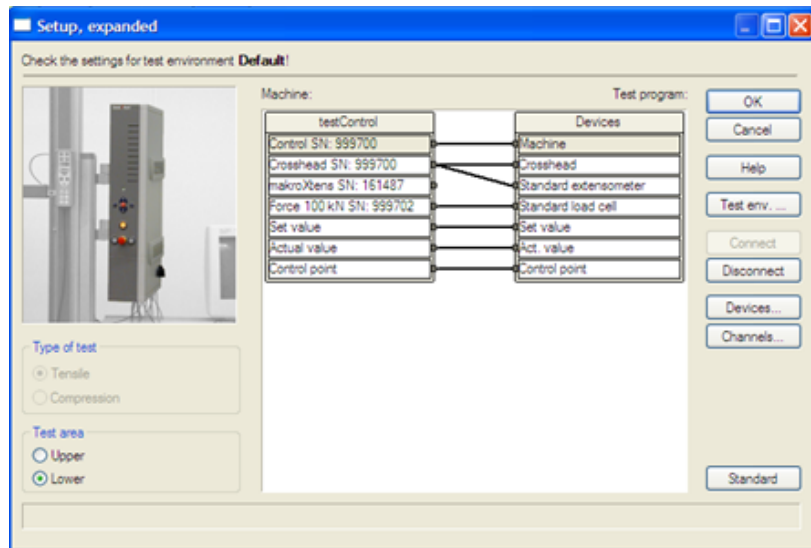
### a) SINCRONIZACIÓN DE LA MAQUINA Y EL PROGRAMA DE CONTROL

Para empezar, hay que arrancar el programa testXpert II desde el escritorio o desde programas, siempre y cuando mantengamos la máquina virtual (VTM) abierta. Para sincronizar la máquina virtual y el programa de control, habrá que decirle al programa qué célula de carga queremos utilizar, que será la misma célula de carga elegida anteriormente en la máquina virtual para realizar los ensayos.

Una vez elegida la célula de carga, se especifican otras condiciones de la máquina pulsando el icono “Machine→Setup” (en la barra de herramientas, parte superior) y aparecerá la siguiente ventana. Esas condiciones son, por ejemplo, el límite máximo o mínimo de recorrido para cada mordaza, la separación entre ambas, el uso del extensómetro, etc.



En esa misma pestaña, en el modo “expanded”, encontramos la correlación entre dispositivos de la máquina y el programa. Para que el software funcione correctamente, estos tienen que estar unidos de la siguiente manera.



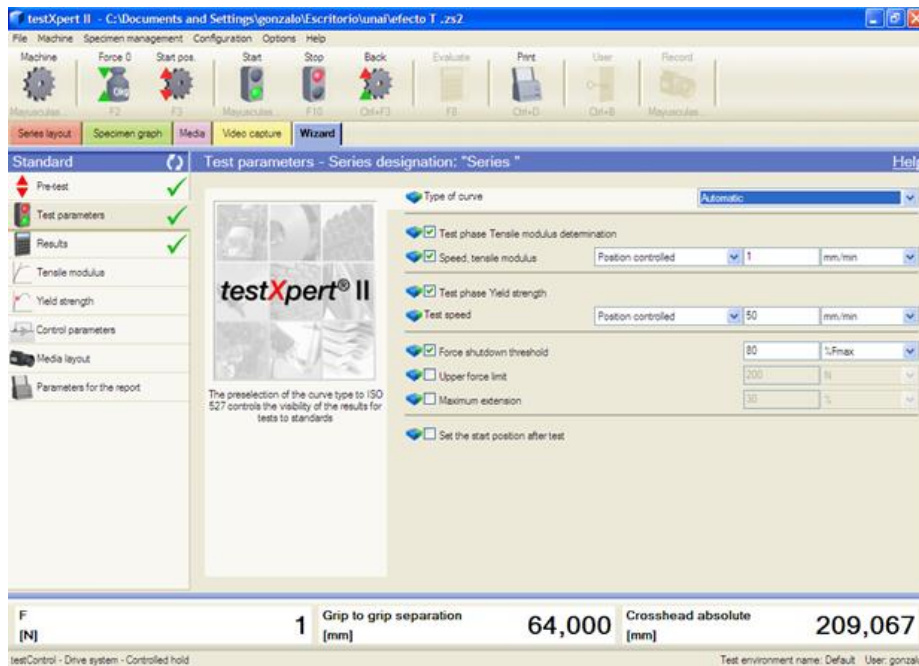
## b) CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS DE ENSAYO

Por otra parte, está el asistente (wizard), donde se encuentran diferentes apartados para concretar los parámetros más relevantes para efectuar el ensayo.

En el primer apartado “Pre-test”, se ajusta la separación entre mordazas según el tamaño de la probeta a ensayar. Asimismo, se aplica una velocidad para la vuelta de la mordaza superior a la posición inicial una vez terminado el ensayo. Debajo, está el “pre-load”, el cual es muy importante para el ensayo. En un ensayo real, al aplicar las primeras cargas, puede que la probeta no esté del todo bien alineada y, por tanto, los primeros datos sean erróneos. Por ello, se aplica el “pre-load”, escogiendo la carga más baja, a partir de la cual se comenzarán a tomar los primeros datos del ensayo, así, excluiríamos esos primeros puntos erróneos. Generalmente, esta carga suele ser de aproximadamente 5 MPa, aunque siempre hay que tener en cuenta el tipo de material y dimensiones de la probeta.

Dentro de “Test parameters”, se controla la velocidad de ensayo. La velocidad puede ser diferente para poder determinar la tensión de yield y el módulo elástico. Al

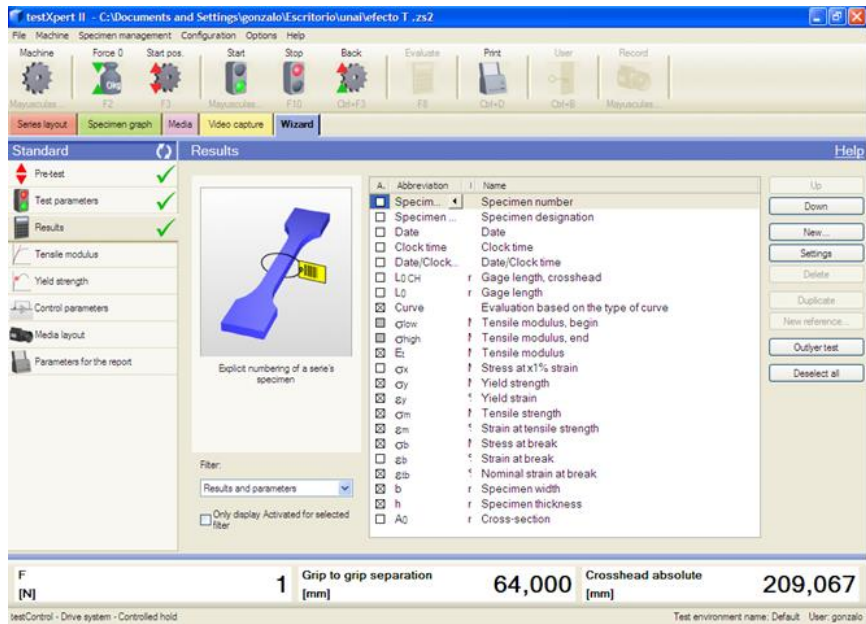
comienzo del ensayo se escoge una velocidad más lenta para poder calcular el módulo con exactitud y una vez que se haya determinado, se elige una velocidad más rápida para el resto del ensayo. Hay que tener en cuenta que, si se quiere estudiar el efecto de la velocidad en las propiedades mecánicas, la velocidad del ensayo no deberá cambiarse durante todo el ensayo. En la siguiente imagen se observa como es la pantalla “Test parameters”.



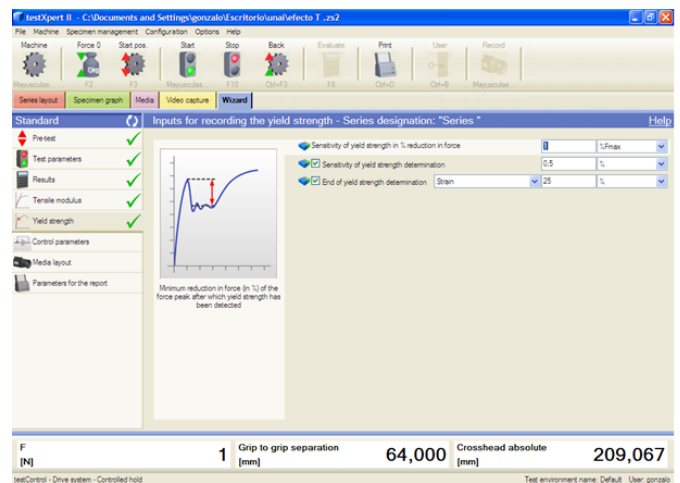
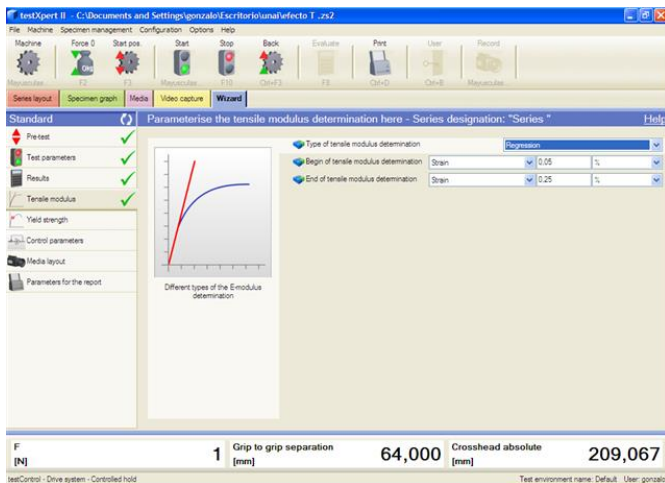
### c) CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS DE RESULTADOS

En el apartado de “Results”, como su propio nombre indica, se seleccionan los resultados que luego queremos analizar. Estos, se mostrarán en una tabla al final del ensayo. En esta ventana se marcarán los resultados que queremos que aparezcan una vez hecho el ensayo de tracción de cada probeta. A continuación, aparece la ventana correspondiente a este apartado.



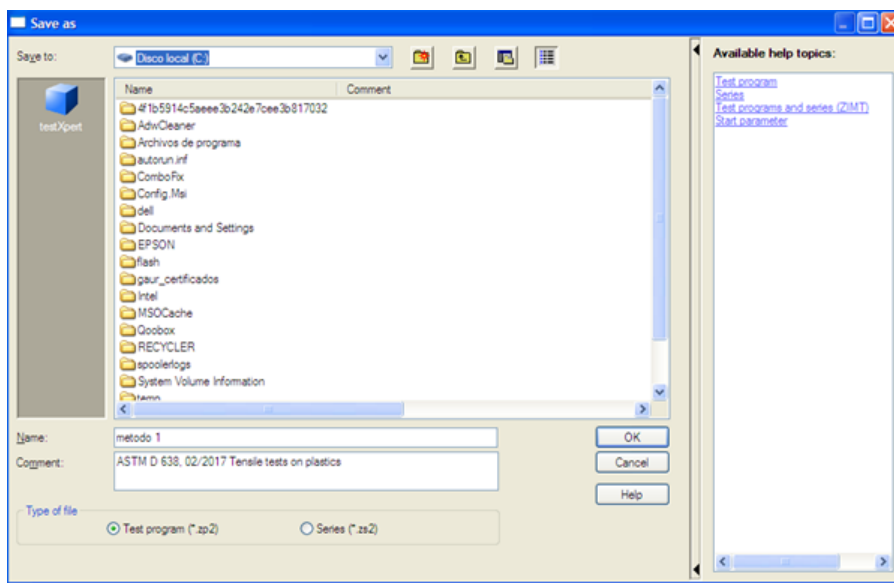


Más abajo, hay dos nuevos apartados donde escogemos el método para calcular el módulo elástico y la tensión de yield, que serían de la siguiente manera. Para el cálculo del módulo, puede hacerse por regresión o por secante. Nosotros elegimos por regresión, ya que es la manera con la que se hace habitualmente. Así calcula el módulo como la pendiente de la recta tangente a la curva tensión-deformación dentro de la zona elástica lineal, al comienzo del ensayo.



#### d) GUARDAR MÉTODO

Una vez ajustados todos los parámetros anteriores, el método está creado y solo faltaría guardarlo para poder usarlo siempre que se quiera. Para ello, pulsamos “File→Save as...” en la esquina superior izquierda. Nos aparecerá la siguiente ventana y es muy importante guardarlo en formato “Test program (\*.zp2)”, el cual está situado en la parte inferior de la ventana. Se guardará en la carpeta deseada, y tenerla localizada para posteriormente abrir el método sin problemas.



#### 3) EJECUCION DEL ENSAYO

A continuación, se muestra los pasos a seguir para realizar el ensayo de tracción.

Para empezar, se abre el método con el que queremos ensayar, el cual hayamos creado y guardado. Para abrirlo hay que clicar en “File→Open...” y abriremos el método que se vaya a utilizar, que estará localizado en la carpeta que anteriormente se haya guardado.

Después, elegimos la probeta del material que se quiera ensayar. Este paso, como se ha dicho anteriormente, se escoge en la parte de la máquina (VTM) y lo hacemos usando los botones de abrir y cerrar mordazas. Primero, hay que abrir las mordazas, luego, se selecciona el material y la probeta, fijándose en los parámetros de esta, y finalmente, hay que cerrar las mordazas.

Volviendo a la página principal del programa, en la parte superior, se observan diferentes botones para controlar el ensayo. Estos sirven para balancear la carga, regresar a la posición inicial entre mordazas, y para comenzar o parar el ensayo.

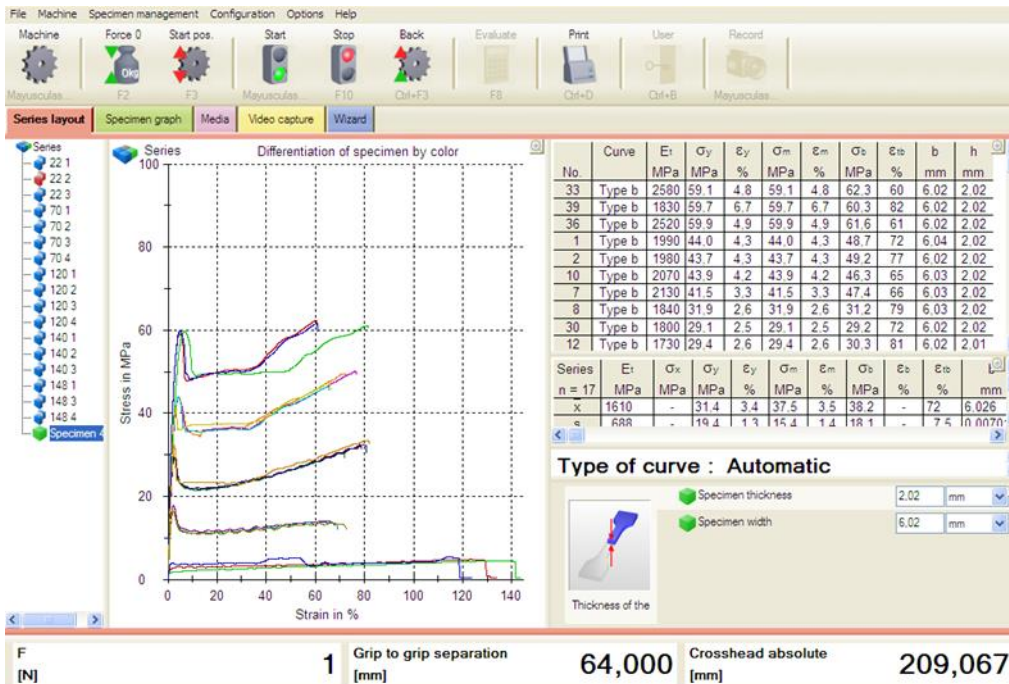
Al igual que se ha citado anteriormente, el programa debe saber cuáles son las dimensiones de la probeta a ensayar, que serán las mismas que se han anotado en la VTM y estas tienen que ser introducidas en el apartado que hay en la esquina inferior derecha.

Una vez que confirmemos que todos los parámetros sean correctos, podremos comenzar el ensayo pulsando el botón de "Start". Entonces, veremos como la fuerza y el alargamiento van subiendo a tiempo real, a la vez que se ira dibujando la curva tensión-deformación. Cuando la rotura se dé, el mismo programa detendrá el ensayo y creara la tabla con los resultados que anteriormente hayamos seleccionado.

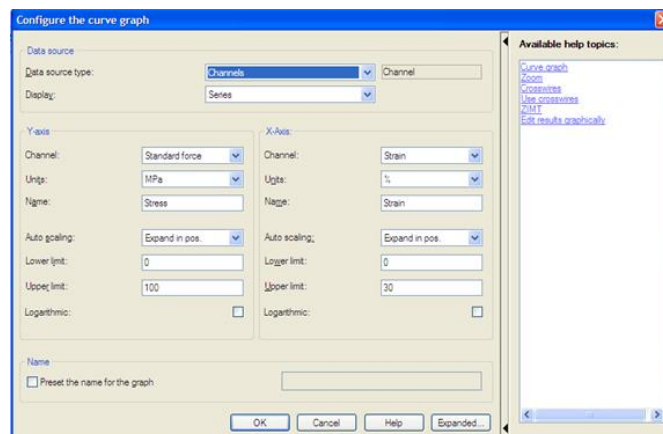
Para poder ensayar la siguiente probeta, al igual que en un ensayo real, hay que ir a la máquina virtual (VTM), abrir las mordazas (para quitar la probeta rota), volver a la posición inicial desde el programa de control, elegir la nueva probeta desde la máquina virtual y cerrar las mordazas, tal y como se haría en una máquina real.

#### 4) ANALISIS DEL ENSAYO

Al finalizar los ensayos de todas las probetas, las curvas se mostrarán en el mismo gráfico que hay en la página principal. A la derecha del grafico se podrá observar la tabla de resultados de cada una de las curvas. Debajo de esta, aparece otra tabla con la media y desviación de cada resultado. Esta última tabla, solo servirá si el material y las condiciones eran las mismas en todas las probetas. Haciendo doble clic en el grafico o en las tablas, aumentaran de tamaño para poder ser vistas con mayor exactitud. A continuación, se muestra la pantalla de la página principal tras los ensayos, con el grafico y las tablas anteriormente mencionadas.



En cuanto al gráfico, clicando con el botón derecho en él, aparece una serie de opciones para poder editarlo. Por ejemplo, cómo se puede apreciar en la siguiente imagen, pinchando en "Configure curve graph...", podemos confeccionar los ejes del gráfico, es decir, ponerlo en las unidades adecuadas para el posterior análisis.



También es posible guardar el gráfico con sus respectivos resultados para poder ser analizados cuando se desee. Se hace igual que con el método, pero en vez de guardarlo en formato (\*.zp2) hay que hacerlo en Series (\*.zs2). A la hora de abrirlo, igual que el método.

### **3.3. Guiones de Prácticas para el alumnado**

En las próximas páginas se muestran tres guiones de prácticas propuestos para utilizarlos en el aula. En estas prácticas se analizan los efectos de tres parámetros en los ensayos de tracción. Los tres parámetros son la velocidad de deformación, la temperatura del ensayo y la cristalinidad del material. En primer lugar, se presentan los guiones de prácticas para los estudiantes, y posteriormente se mostrarán los guiones para el profesor, en los que se dan algunas nociones sobre cómo analizar e interpretar los resultados obtenidos.

# **1-PRÁCTICA: EFECTO DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN EN MATERIALES POLIMÉRICOS**

## **INTRODUCCIÓN**

Uno de los ensayos mecánicos tensión-deformación más común es el ensayo de tracción. El ensayo de tracción puede ser utilizado para determinar varias propiedades de los materiales, como el módulo elástico, tensión y deformación de fluencia (yield), o los valores de rotura entre otros. En este ensayo, se estira a velocidad de alargamiento constante una probeta hasta rotura y se mide la fuerza necesaria para alargarla.

En polímeros, debido a su carácter viscoelástico, la velocidad con que se la aplica la carga a la probeta en el ensayo de tracción influye en los resultados obtenidos. A medida que aumenta la velocidad de deformación, la tensión y el módulo de tracción aumentan. Sin embargo, el alargamiento disminuye con la velocidad de deformación, ya que a velocidades lentas pueden darse mecanismos de respuesta rápidos y lentos, mientras que a velocidades altas solo pueden darse los más rápidos. En otro tipo de materiales, como los metales, la velocidad no tiene influencia.

Para que el efecto de la velocidad de deformación sea significativo tiene que haber una gran diferencia entre las velocidades. Además, siempre hay que tener en cuenta el estado de cada probeta y las condiciones del ensayo.

## **OBJETIVO**

El objetivo de esta práctica consiste en estudiar y comprender la influencia que tiene la velocidad de deformación en un ensayo de tracción sobre un material polimérico. Asimismo, familiarizarse con el funcionamiento del software testXpert II.

## **MATERIAL**

Esta práctica va a ejecutarse con el software informático testXpert II y el material a utilizar será el policarbonato.

## PARTE EXPERIMENTAL

Para empezar, hay que abrir la máquina virtual de ensayos (VTM) y una vez que esta se haya abierto, el programa testXpert II, cuyos iconos están disponibles en el escritorio.

Dentro del programa, abrimos el método con nombre “efecto velocidad”, el cual está hecho específicamente para esta práctica.

A continuación, se ensayan las probetas. Todos los materiales y probetas están incluidas en el apartado de la máquina virtual. Por tanto, escogemos el policarbonato (Tarflon Iv 1900R, Idemitsu petrochemical) y deberán aparecer 12 probetas con 4 velocidades diferentes (0,5; 5; 50 y 200 mm/min).

Se selecciona la primera probeta a la velocidad más baja (0,5 mm/min) y se cierran las mordazas. En la parte derecha aparecen los parámetros de la probeta (anchura y espesor), los cuales apuntaremos en el programa.

En el programa, se comprueba que la separación entre mordazas sea la misma que aparece en los parámetros de la probeta y que la fuerza sea cero. En caso de que no sea así, habrá que llevar las mordazas a su posición inicial o pulsar la fuerza cero, dependiendo del error que se esté dando.

Estando todo correcto, pulsa “Start” y el ensayo comenzará. Una vez acabe el ensayo, se pasa a la siguiente probeta, que será la probeta 2 de la velocidad más baja (0,5 mm/min). Para cambiar de probeta solamente hay que abrir las mordazas, regresar a la posición inicial, seleccionar la siguiente probeta y volver a cerrar las mordazas. Lo demás (indicar espesor y anchura, comprobación de la separación), igual que la anterior. Se repetirá el mismo proceso para las 12 probetas.

## CUESTIONES

- Comprueba la repetitividad de los ensayos y si hay alguna probeta anómala descártala. ¿Cuál es la máxima variación que se observa en cada uno de los parámetros analizados? Módulo elástico, tensión de yield, tensión y

deformación de rotura. ¿Esperas que todos los parámetros tengan similar variación? ¿por qué?

- Elige la curva de tracción correspondiente a una probeta cualquiera, a la velocidad que quieras, y descríbela. Explica que le ocurre a esta en cada punto o región de la curva.
- ¿Qué tipo de comportamiento muestran los ensayos del policarbonato? Dúctil, frágil... ¿Por qué?
- En probetas ensayadas a la misma velocidad, ¿cuál es el parámetro o propiedad mecánica que más varía? ¿Por qué?
- Selecciona una probeta de cada velocidad y muéstralas en un mismo gráfico. ¿Qué le ocurre a cada parámetro al aumentar la velocidad? ¿Por qué varían las propiedades mecánicas al variar la velocidad del ensayo? ¿Ocurre así con todo tipo de materiales? ¿Por qué?
- ¿Todos los parámetros concuerdan con la teoría? Si no es así, explica por qué ocurre esto.





## **2-PRÁCTICA: EFECTO DE LA TEMPERATURA DE ENSAYO**

### **INTRODUCCIÓN**

El efecto de la temperatura sobre las propiedades mecánicas de los polímeros es bastante grande, esto es, las propiedades cambian rápidamente con pequeños cambios en la temperatura.

En general, existe una relación inversa entre las propiedades mecánicas de los polímeros y la temperatura. Cuando la temperatura aumenta se produce una expansión gradual del material, lo que resulta en un aumento del volumen libre y en un debilitamiento de las fuerzas de cohesión del material. Por tanto, la resistencia a la tracción y el módulo se reducen, mientras que la elongación se incrementa.

### **OBJETIVO**

El objetivo de esta práctica es analizar el efecto que tiene la temperatura en los ensayos de tracción y, por tanto, en las propiedades mecánicas del policarbonato.

### **MATERIAL**

Esta práctica va a ejecutarse con el software informático testXpert II y el material a utilizar será el policarbonato.

### **PARTE EXPERIMENTAL**

Se abrirán los programas del mismo modo que en la primera practica (efecto de la velocidad), con la única diferencia de escoger el método llamado “efecto temperatura”.

Se han elegido 4 temperaturas diferentes para el análisis: 70, 120, 140 y 148°C. Además, también incluiremos la de temperatura ambiente, la cual hemos utilizado en la práctica anterior. Por tanto, tendremos 5 temperatura diferentes y todas son ensayadas a una velocidad de 10 mm/min.

A continuación, se procede a ensayar. Para ello, en el apartado de la maquina escogemos el policarbonato (Tarflon Iv 1900R, Idemitsu petrochemical) y veremos las

probetas con sus respectivas temperaturas. Una por una, por orden ascendente de la temperatura, se ensayarán de igual manera que en la práctica anterior.

#### CUESTIONES

- ¿Qué comportamiento mecánico tiene el policarbonato ensayado a temperatura ambiente? ¿Es un polímero amorfo o semicristalino? ¿Cuál es su  $T_g$  y/o  $T_m$ ? ¿Por qué el policarbonato puede dar lugar a deformaciones elevadas por debajo de su  $T_g$ ? ¿No deberían estar sus moléculas quietas y congeladas?
- Explica las diferencias que se observan en el comportamiento de las curvas de 70 y 140°C, y qué le ocurre a la probeta en cada punto de la curva.
- ¿A qué tipo de material corresponden el comportamiento de las curvas obtenidas a 148°C?
- ¿Podrías hacer ensayos de tracción del policarbonato a 160°C? ¿Por qué?
- ¿Cómo crees que serían las curvas si hicieses los ensayos a temperaturas muy bajas, por ejemplo -150°C?
- ¿Por qué se alargan tanto las probetas ensayadas a 148°C? ¿Qué les sucede a las moléculas de estas probetas?
- Selecciona una probeta de cada temperatura y muéstralas en un mismo gráfico. Razona cómo cambian las propiedades mecánicas del policarbonato con el aumento de la temperatura. Relaciona el comportamiento con las transiciones térmicas que presenta el policarbonato.

### **3-PRÁCTICA: EFECTO DE LA CRISTALINIDAD**

#### **INTRODUCCIÓN**

La cristalinidad de un polímero puede considerarse como el empaquetamiento de cadenas moleculares para producir una disposición molecular ordenada. La cristalinidad influye en las características del material, incluyendo su opacidad o propiedades mecánicas.

La cristalinidad en un polímero modifica el módulo de un polímero semicristalino por encima de su punto de Tg por al menos dos mecanismos. En primer lugar, los cristalitas actúan como retículos atando juntos los segmentos de muchas moléculas. En segundo lugar, los cristalitas tienen muy altos módulos en comparación con las partes amorfas, de modo que se comportan como materiales de relleno rígidos en una matriz amorfa.

La cristalinidad apenas tiene efecto sobre el módulo en las temperaturas por debajo de Tg. En la zona cauchosa, en cambio, el módulo incrementa muy rápidamente con el grado de cristalinidad.

En esta práctica se trabaja con el nylon 6,6, el cual tiene una Tg de 50°C. Dado que los ensayos se realizan a temperatura ambiente el efecto de la cristalinidad no se apreciaría. Pero, el nylon es un material higroscópico, lo cual absorbe humedad y el agua que absorbe actúa de plastificante. Esto hace que la Tg del material baje notablemente y, por tanto, el efecto se apreciará.

El módulo de tracción y la resistencia a la fluencia aumentan con el aumento de la cristalinidad del polímero. La tenacidad o dureza, en cambio, varía dependiendo del grado de cristalinidad. Con un grado alto (<70%) la tenacidad disminuirá, pero con uno medio la tenacidad aumentará.

#### **OBJETIVO**

El objetivo de esta práctica es estudiar el efecto que tiene la diferente cristalinidad en un mismo material en sus propiedades mecánicas.

## MATERIAL

Esta práctica va a ejecutarse con el software informático testXpert II y el material a utilizar será PA 6,6 y PA 6,6 recristalizada. Para conseguir una mayor cristalinidad; es decir, para recristalizar el nylon6,6, se escogieron 5 probetas y se metieron en la estufa durante 1 hora a una temperatura de 80°C. El nylon 6,6 inicial y el recristalizado tienen una cristalinidad de 32,4% y 49,3%, respectivamente.

## PARTE EXPERIMENTAL

Se abrirán los programas del mismo modo que en las anteriores prácticas, con la diferencia de escoger el método llamado “efecto cristalinidad”.

En esta práctica se ensayará el nylon 6,6, sin recristalizar y recristalizado. Por lo tanto, habrá dos tipos de materiales para escoger en la lista.

Igual que en las prácticas anteriores, empezaremos a ensayar con el nylon sin recristalizar y una vez ensayadas todas las probetas de este, continuaremos con el nylon recristalizado.

## CUESTIONES

- ¿Cuál es la deformación a rotura del nylon 6,6? ¿Cuál es la razón de que el nylon 6,6 pueda deformarse tanto a temperatura ambiente, teniendo en cuenta que tiene una Tg de 50°C?
- Como se puede apreciar en las curvas obtenidas, se observan diferentes máximos, ¿a qué se debe esto?
- Indica cómo cambian las propiedades mecánicas del nylon 6,6 con diferentes grados de cristalinidad.
- ¿El efecto de la cristalinidad es el mismo en polímeros dúctiles y en polímeros frágiles?

### **3.4. Guiones de Prácticas para el profesorado**

Como se ha comentado anteriormente, en este apartado se muestran los guiones de prácticas para el profesorado. En éstos se explica cómo se deben preparar e impartir las prácticas anteriores. También se muestran las respuestas a las posibles dudas de los alumnos. Dentro de cada práctica, en el apartado de resultados, se detalla cómo deberían de quedar las curvas y tabla de valores de cada ensayo. Se expone el análisis de estos resultados y, además, se examina detalladamente el efecto de cada práctica.



# **1-PRÁCTICA: EFECTO DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN EN MATERIALES POLIMÉRICOS (PROFESOR)**

## **PREPARACIÓN DEL METODO**

Para empezar y preparar la práctica correctamente, la creación del método es imprescindible. En la parte de “funcionamiento del programa” se explica cómo crear y guardar cualquier método con las condiciones que más desee. Se guardará con el nombre “efecto velocidad”.

Dado que los ensayos reales ya se han realizado a las velocidades de ensayo deseadas y los ficheros de los resultados de las diferentes velocidades ya recogen los valores correctos de tensión-deformación, no hace falta ensayar con el programa de simulación a diferentes velocidades, porque este únicamente representa los valores de los ficheros adquiridos. Por tanto, es suficiente con aplicar una misma velocidad de ensayo en la máquina virtual para todas las probetas, ya que la velocidad virtual no tiene ninguna influencia en los datos registrados en la máquina real. Así que, usaremos el mismo método para todas las probetas con una velocidad adecuada y rápida para ensayar todas las probetas, como 50 mm/min.

## **ENSAYO**

Una vez abierto el método, se seleccionan y ensayan las probetas de la manera que se explica en el “funcionamiento del programa”.

Las probetas aparecen en una lista en la parte de la máquina. En esta práctica se ensaya el policarbonato a diferentes velocidades. En la lista aparecen dos policarbonatos. Para esta práctica usaremos el que lleva el nombre “Policarbonato V”. El otro policarbonato, se utilizará para la práctica del efecto de la temperatura.

Al ensayar, se recomienda empezar por la velocidad más baja para acabar con la más alta. Se ensayarán las 12 probetas.



## RESULTADOS

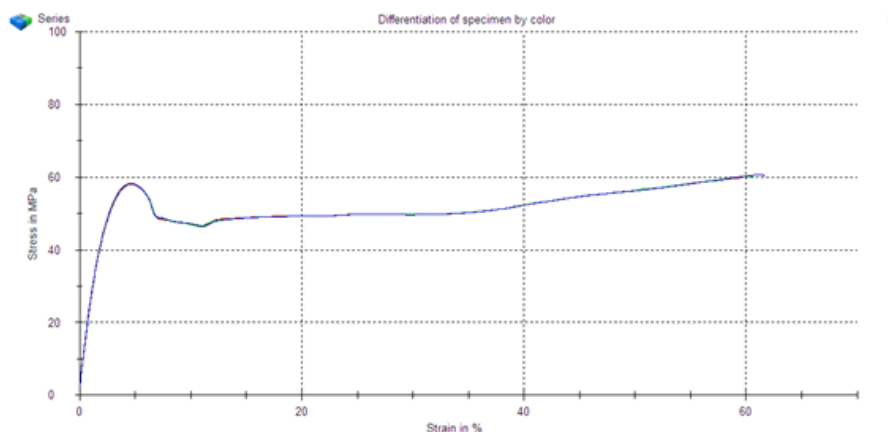
Estamos trabajando con el policarbonato, un polímero amorfo que tiene una Tg de 150°C. El policarbonato, a diferencia de otros polímeros orgánicos, presenta una Tg más alta, debido a la alta rigidez que presenta su cadena molecular [15].

La temperatura de ensayo es ambiente. Al ensayar un material amorfo por debajo de su Tg, las cadenas deberían estar congeladas y el polímero no podría deformarse mucho por lo que sería un polímero frágil. Sin embargo, el policarbonato presenta un comportamiento dúctil.

Aunque la cadena esta teóricamente congelada, pueden ocurrir movimientos en los grupos carbonatos, fenílicos e isopropilídenos de la cadena. Estos grupos tienden a tener transiciones secundarias que se unen para dar una banda difusa en un rango de temperatura de -200°C a 0°C [15,16].

Si estuviéramos a temperatura ambiente, el polímero no respondería al aplicar una tensión, pero los pequeños movimientos internos de cadena, que son posibles por encima de las temperaturas de transiciones secundarias, permiten al polímero disipar la energía necesaria para deformarse [15].

Para empezar, se va a analizar la repetitividad de los resultados en cada una de las velocidades. A continuación, se muestra tanto el gráfico como los resultados de las tres probetas ensayadas a 0,5 mm/min.



$E_t$	$\sigma_y$	$\epsilon_y$	$\sigma_m$	$\epsilon_m$	$\sigma_s$	$\epsilon_s$	$b$	$h$
MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	mm	mm
2470	58.2	4.6	58.2	4.6	59.7	59	6.03	2.01
2440	58.1	4.6	58.1	4.6	59.7	61	6.01	2.02
2430	58.0	4.6	58.0	4.6	60.6	61	6.01	2.02

Series	$E_t$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\epsilon_y$	$\sigma_m$	$\epsilon_m$	$\sigma_s$	$\epsilon_s$	$\epsilon_m$	$b$	$h$
$n = 3$	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	%	mm	mm
x	2450	-	58.1	4.6	58.1	4.6	60.0	-	60	6.017	2.017
s	23.2	-	0.0921	0.027	0.0921	0.027	0.506	-	1.1	0.01155	0.005774

Viendo el gráfico, no se presenta diferencia alguna entre las tres curvas. Esto se refleja también en la tabla de resultados.

La curva muestra el esfuerzo-deformación del policarbonato. Empieza con una línea recta hasta el esfuerzo de rendición. En esta región, la deformación de la probeta es uniforme, mostrando la curva un incremento de carga continuo. El comportamiento del material es lineal y aquí se sitúa la zona de deformación elástica. El módulo de elasticidad del material es la pendiente de la región linealmente elástica. Después del límite elástico, la recta deja de ser lineal y la deformación empieza a aumentar más rápidamente para cada incremento del esfuerzo. Por esto, la curva tiene una pendiente cada vez más pequeña, hasta llegar al máximo, la tensión de yield. En este punto, la fuerza disminuye y la probeta comienza a estrecharse en una sección concreta.

Después, la tensión nominal baja mientras la estricción se va haciendo cada vez más pronunciada. Este fenómeno se conoce como necking. En esta bajada de la tensión nominal, la deformación no es homogénea en todos los puntos de la probeta, sino que está localizada en una única sección. En esta zona de la curva, la estricción va progresando, el área de esa zona de la probeta va disminuyendo, mientras que en otras secciones apenas varía. Si el área es menor, la tensión en esa sección es mayor. Además del aumento de tensión en la zona de la estricción debida a la disminución del área, hay otro proceso que interviene y que es el aumento de la orientación de las cadenas que da lugar a un aumento de la resistencia del material.

A medida que la estricción y orientación aumentan, llega un momento en que el efecto del aumento de la tensión de yield del material en la zona, como consecuencia de la orientación, es mayor que el aumento de la tensión que hay en esa zona como consecuencia de la reducción de sección. En ese momento la deformación se estabiliza en el punto de estricción y comienza a deformarse una sección adyacente, que todavía no se ha deformado y que no es tan resistente.

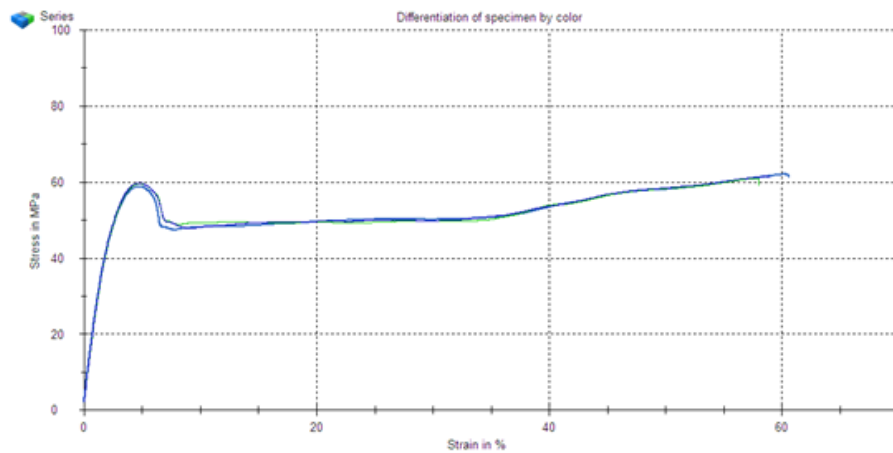
Después de la bajada de la tensión nominal, se presenta un alargamiento considerable, con un incremento prácticamente inapreciable en la fuerza de tensión. La estricción se va extendiendo a secciones contiguas, que a su vez se van estrechando. Esta estricción va propagándose hasta que se topa con las zonas anchas de la probeta, los extremos. Este proceso se denomina cold-drawing. En esta región el material se vuelve perfectamente plástico, lo que significa que puede deformarse sin un incremento en la carga aplicada.

Después de sufrir las grandes deformaciones que se presentan durante el cold-drawing, la pendiente de la curva tensión-deformación vuelve a ascender otra vez. A partir de ese punto, la deformación es homogénea en toda la probeta, esto es, toda la probeta se deforma por igual hasta llegar al punto de rotura.

Por tanto, analizando la curva, el policarbonato muestra un comportamiento dúctil.

A continuación, se mostrarán las curvas tensión-deformación y los resultados con sus respectivas desviaciones de las probetas ensayadas a las otras velocidades (5, 50 y 200 mm/min). Como se observará, las curvas son semejantes a la explicada anteriormente. Por tanto, la explicación de la anterior servirá para las siguientes.

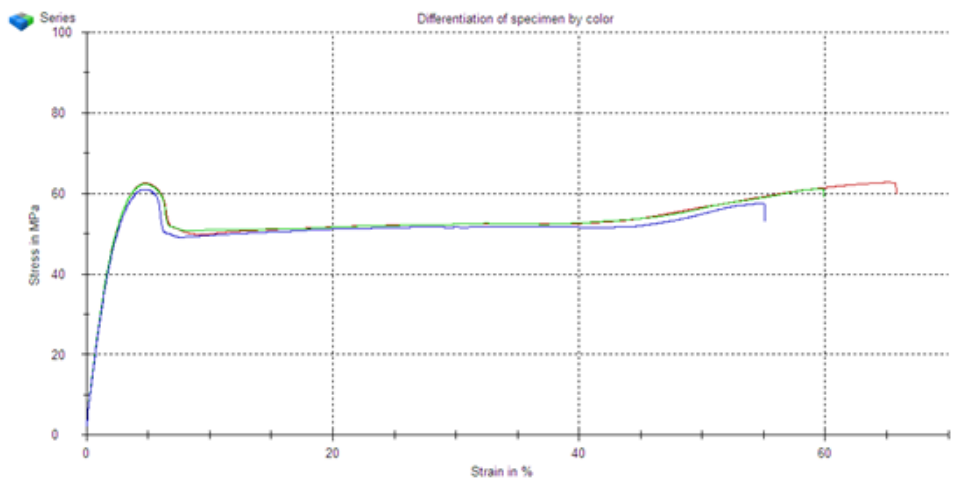
Curvas y resultados de las 3 probetas ensayadas a 5 mm/min.



E:	$\sigma_y$	$\epsilon_y$	$\sigma_m$	$\epsilon_m$	$\sigma_e$	$\epsilon_e$	b	h
MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	mm	mm
2390	58,8	4,7	58,8	4,7	62,0	60	6,04	2,02
2400	59,6	4,8	59,6	4,8	60,9	58	6,02	2,02
2440	59,7	4,7	59,7	4,7	61,5	59	6,02	2,02

Series	E:	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\epsilon_y$	$\sigma_m$	$\epsilon_m$	$\sigma_e$	$\epsilon_e$	$\epsilon_m$	b	h
n = 3	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	%	mm	mm
x	2410	-	59,4	4,7	59,4	4,7	61,5	-	59	6,027	2,02
s	25,5	-	0,503	0,034	0,503	0,034	0,524	-	1,3	0,01155	0,000
v	1,06	-	0,85	0,73	0,85	0,73	0,85	-	2,24	0,19	0,00

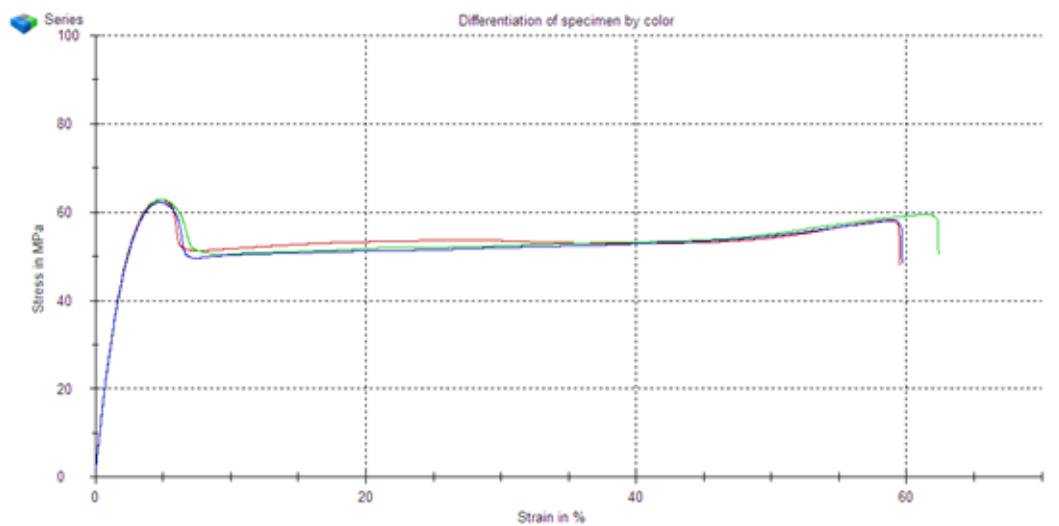
Curvas y resultados de las 3 probetas ensayadas a 50 mm/min.



E <sub>t</sub>	σ <sub>y</sub>	ε <sub>y</sub>	σ <sub>m</sub>	ε <sub>m</sub>	σ <sub>b</sub>	ε <sub>b</sub>	b	h
MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	mm	mm
2490	62,5	4,8	62,5	4,8	59,6	66	6,03	2,01
2500	62,3	4,8	62,3	4,8	58,8	60	6,01	2,02
2420	61,0	4,8	61,0	4,8	52,9	55	6,03	2,01

Series	E <sub>t</sub>	σ <sub>x</sub>	σ <sub>y</sub>	ε <sub>y</sub>	σ <sub>m</sub>	ε <sub>m</sub>	σ <sub>b</sub>	ε <sub>b</sub>	ε <sub>10</sub>	b	h
n = 3	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	%	mm	mm
x	2470	-	61,9	4,8	61,9	4,8	57,1	-	60	6,023	2,013
s	44,3	-	0,816	0,018	0,816	0,018	3,66	-	5,3	0,01155	0,005774
v	1,80	-	1,32	0,37	1,32	0,37	6,41	-	8,86	0,19	0,29

Curvas y resultados de las 3 probetas ensayadas a 200 mm/min



E <sub>t</sub>	σ <sub>y</sub>	ε <sub>y</sub>	σ <sub>m</sub>	ε <sub>m</sub>	σ <sub>b</sub>	ε <sub>b</sub>	b	h
MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	mm	mm
2720	62,7	4,6	62,7	4,6	47,9	59	6,03	2,02
2670	62,9	4,9	62,9	4,9	50,3	62	6,04	2,02
2710	62,2	4,7	62,2	4,7	48,3	60	6,04	2,02

Series	E <sub>t</sub>	σ <sub>x</sub>	σ <sub>y</sub>	ε <sub>y</sub>	σ <sub>m</sub>	ε <sub>m</sub>	σ <sub>b</sub>	ε <sub>b</sub>	ε <sub>10</sub>	b	h
n = 3	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	%	mm	mm
x	2700	-	62,6	4,7	62,6	4,7	48,8	-	61	6,037	2,02
s	27,1	-	0,344	0,14	0,344	0,14	1,25	-	1,6	0,005774	0,000
v	1,01	-	0,55	2,93	0,55	2,93	2,57	-	2,64	0,10	0,00

Como se puede observar, la concordancia de los parámetros en las distintas probetas es razonable. Si nos fijamos en la desviación de cada dato, no muestra diferencia casi entre las muestras excepto en el módulo elástico y en la deformación de rotura.

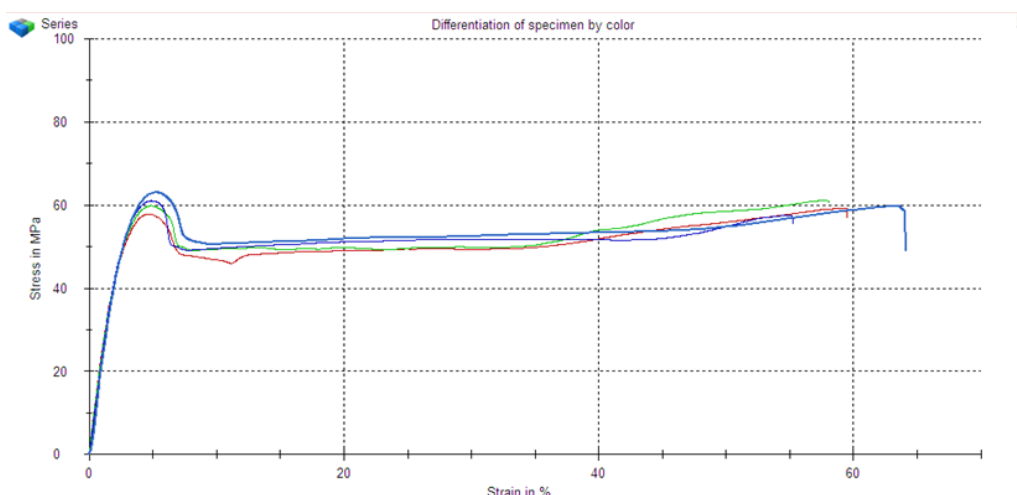
Respecto al módulo, es normal que haya un poco más de diferencia, ya que se calcula regresivamente cuando las tensiones son muy bajas, y puede que al principio del ensayo hasta que la probeta se sostenga correctamente haya pequeños cambios en el registro de las deformaciones, y esto da lugar a pequeños cambios en los valores del módulo.

En la deformación por rotura también es normal que haya variaciones. Puesto que, dependiendo del estado de la probeta, como imperfecciones en la superficie, burbujas en la probeta o dependiendo de la zona donde se dé la rotura, la probeta se romperá antes o después [17]. Así, quedan demostradas esas variaciones en la deformación de rotura.

En general, se puede decir que la repetitividad de las probetas es correcta y que no hay ninguna probeta anómala y haya que excluirla. Una vez hecha la comprobación de la repetitividad de las probetas ensayadas a diferentes velocidades, analizamos el efecto que tiene la velocidad de deformación en las propiedades mecánicas del policarbonato.

#### EFFECTO DE LA VELOCIDAD

Dado que entre las 4 velocidades no había mucha diferencia en las curvas, se elige una curva representativa de cada una de las velocidades y las incluimos en el mismo gráfico. Debajo del gráfico se muestran los resultados de cada una de las curvas.



$E_t$ MPa	$\sigma_y$ MPa	$\epsilon_y$ %	$\sigma_m$ MPa	$\epsilon_m$ %	$\sigma_b$ MPa	$\epsilon_{tb}$ %	b mm	h mm
2640	57.8	4.7	57.8	4.7	59.3	59	6.04	2.02
2650	59.8	4.8	59.8	4.8	61.1	58	6.03	2.01
2940	61.0	4.9	61.0	4.9	55.4	55	6.01	2.02
2960	63.1	5.2	63.1	5.2	49.1	64	6.03	2.02

La primera fila de resultados representa a la probeta ensayada a 0,5 mm/min. La segunda a la de 5 mm/min, la tercera a la de 50 mm/min y la cuarta a la de 200 mm/min.

Como indica la teoría, tanto el módulo elástico (E) como la tensión de yield ( $\sigma_y$ ) deben aumentar con la velocidad de deformación, mientras que la deformación ( $\epsilon$ ) debería disminuir [18]. Si nos fijamos en la tabla, se puede observar que el módulo elástico aumenta ligeramente. Es necesario precisar que para que el efecto sea notable, mínimamente tiene que haber una diferencia en las velocidades de por lo menos una década. Aun así, hay que tener en cuenta que la propia variabilidad de los resultados de unas probetas a otras puede enmascarar el efecto de la velocidad. Por eso, a veces se observan resultados aparentemente anómalos. De todos modos, si comparamos el módulo elástico de la velocidad más baja (0,5 mm/min) con la de velocidad más alta (200 mm/min), se observa claramente un aumento, aunque en las velocidades intermedias no sea tan evidente.

Con respecto a la tensión de yield el cambio entre las diferentes velocidades es más evidente. El módulo elástico de las diferentes probetas puede variar un 10% mientras que en la tensión de yield, esta variabilidad es menor [19].

La deformación a rotura ( $\epsilon_{tb}$ ), en teoría, debería ser menor al aumentar la velocidad, puesto que a velocidades mayores es menor la cantidad de procesos de deformación que pueden darse, ya que solamente se darán los más rápidos, es decir, los que tengan tiempos de relajación cortos. Al haber menos posibilidades de deformación, la medida será menor [20]. En la práctica, no se observa este efecto. Esto se debe a que las propiedades de rotura dependen mucho de la existencia de defectos, como impurezas, burbujas o posibles grietas o muescas en la superficie de la probeta. Por eso, es habitual encontrar grandes variaciones en los resultados de rotura en ensayos realizado con mismas condiciones, que incluso pueden ser de 50% o más. Por estos motivos, si nos fijamos en la tabla, la deformación de rotura correspondiente a la probeta ensayada a la velocidad más alta (200 mm/min) es el que mayor deformación presenta a la rotura, cuando esto debería ser al revés.





## **2-PRÁCTICA: EFECTO DE LA TEMPERATURA DE ENSAYO (PROFESOR)**

### PREPARACIÓN DEL METODO

Se creará un método con las condiciones adecuadas para esta práctica. Se guardará con el nombre “efecto temperatura”.

Las diferentes temperaturas no importan en la creación del método.

### ENSAYO

En la práctica anterior, se cita que hay dos policarbonatos en la lista de materiales. En esta práctica se usarán el llamado “policarbonato T”.

Todas las probetas que aparezcan dentro de este se ensayaran y, por tanto, tendremos ensayos a 5 temperatura diferentes; 22, 70, 120, 140 y 148°C.

Cada una de las probetas se ensayará de la misma forma anteriormente citada y se recomienda hacerlo en orden ascendente de temperatura.

### RESULTADOS

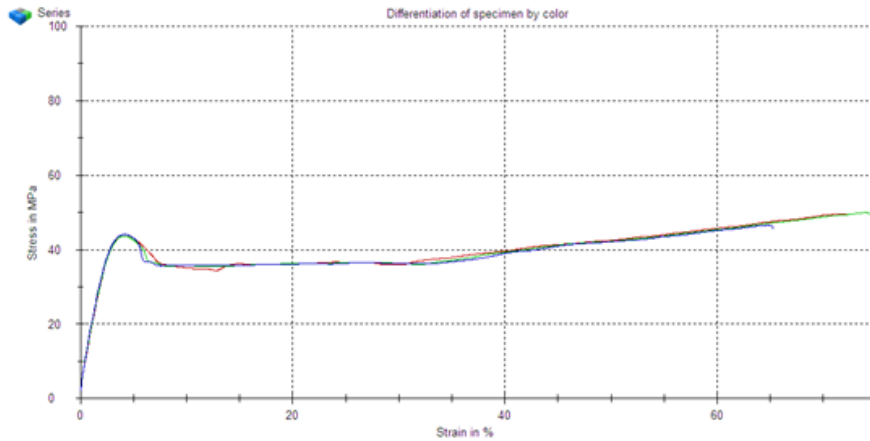
Estamos trabajando con el policarbonato, un polímero amorfo que tiene una Tg de 150°C. El policarbonato, a diferencia de otros polímeros orgánicos, presenta un Tg más grande y esto es por su gran volumen libre.

La temperatura de ensayo es ambiente. Al ensayar un material amorfo por debajo de su Tg, las cadenas deberían estar congeladas y el polímero no podría deformarse por lo que sería un polímero frágil. Como se ha explicado en la práctica del efecto de la velocidad, esto no es así, ya que presenta un comportamiento dúctil [15].

De la misma manera que en la anterior práctica, se comprobará la repetitividad de los resultados de las probetas en cada temperatura y se analizará el comportamiento de las curvas.

La repetitividad de los ensayos realizados a 22°C ya se analizó en la práctica anterior y no es necesario volver a hacerlo.

A continuación, se muestra tanto el gráfico con las curvas y los resultados de las 3 probetas ensayadas a 70°C.

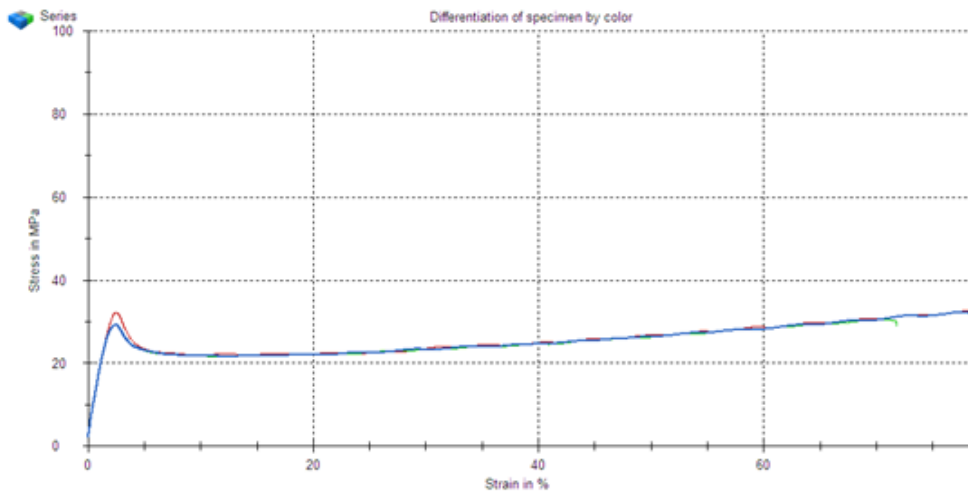


$E_t$	$\sigma_y$	$\epsilon_y$	$\sigma_m$	$\epsilon_m$	$\sigma_b$	$\epsilon_b$	b	h
MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	mm	mm
2030	44.0	4.2	44.0	4.2	49.0	72	6.02	2.02
1970	43.6	4.1	43.6	4.1	49.4	74	6.04	2.02
2080	44.1	4.1	44.1	4.1	46.5	65	6.01	2.02

Series	$E_t$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\epsilon_y$	$\sigma_m$	$\epsilon_m$	$\sigma_b$	$\epsilon_b$	$\epsilon_c$	b	h
n = 3	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	%	mm	mm
x	2030	-	43.9	4.1	43.9	4.1	48.3	-	71	6.023	2.02
s	53.8	-	0.292	0.012	0.292	0.012	1.58	-	5.1	0.01528	0.000
v	2.65	-	0.66	0.30	0.66	0.30	3.28	-	7.22	0.25	0.00

Como se puede observar, el comportamiento de la curva a 70°C es similar al de temperatura ambiente. Por lo que las explicaciones se remiten a las de la práctica anterior. Lo único que cabe destacar, es la notable disminución en los valores de módulo elástico y tensión de yield. Por lo demás, la repetitividad de las probetas es correcta, ya que no hay ninguna curva anómala.

Curvas y resultados de las 3 probetas ensayadas a 120°C.



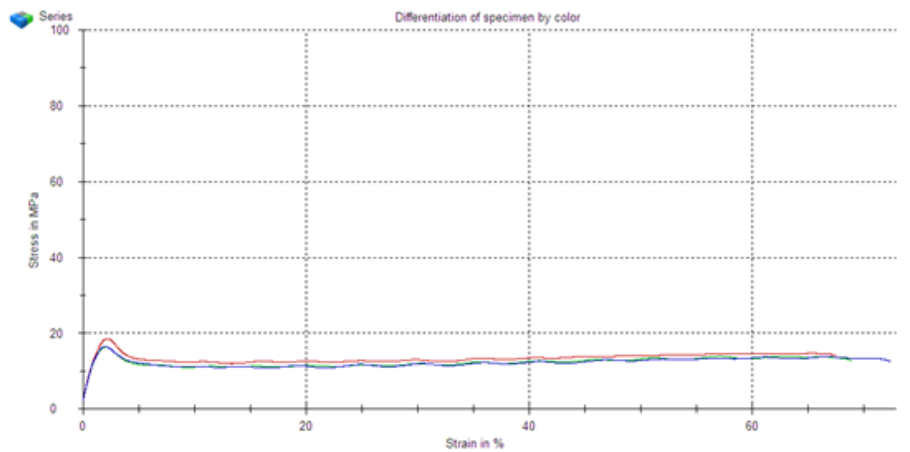
$E_t$	$\sigma_y$	$\epsilon_y$	$\sigma_m$	$\epsilon_m$	$\sigma_b$	$\epsilon_b$	b	h
MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	mm	mm
1880	32.2	2.5	32.2	2.5	31.6	79	6.02	2.01
1810	29.3	2.4	29.3	2.4	28.7	72	6.02	2.01
1760	29.2	2.4	29.2	2.4	31.3	79	6.03	2.02

Series	$E_t$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\epsilon_y$	$\sigma_m$	$\epsilon_m$	$\sigma_b$	$\epsilon_b$	$\epsilon_{10}$	b	h
n = 3	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	%	mm	mm
x	1820	-	30.2	2.4	30.2	2.4	30.5	-	76	6.023	2.013
s	60.6	-	1.70	0.030	1.70	0.030	1.61	-	4.0	0.005774	0.005774
v	3.33	-	5.64	1.25	5.64	1.25	5.27	-	5.25	0.10	0.29

Lo primero que cabe destacar es que las curvas y resultados de las tres probetas son casi idénticas, las desviaciones de los resultados son mínimas. Por tanto, se puede decir que la repetitividad es la adecuada.

A 120°C se empiezan a ver diferencias en el comportamiento de la curva respecto a las anteriores dos temperaturas. Una vez alcanzada la tensión de rendición, la bajada de la tensión nominal es menos notable que en las anteriores temperaturas. Esto ocurre porque a temperaturas mayores las cadenas se mueven más, y la orientación en la zona de estricción se da más rápida, por lo que la deformación aumentará con tensiones mucho más bajas. Por tanto, la estricción se propagará más rápido y el cold-drawing acabará antes. El estrechamiento en toda la probeta se dará antes y la probeta es capaz de deformarse por igual en todas sus zonas durante más tiempo hasta que se dé la rotura.

Curvas y resultados de las 3 probetas ensayadas a 140°C.

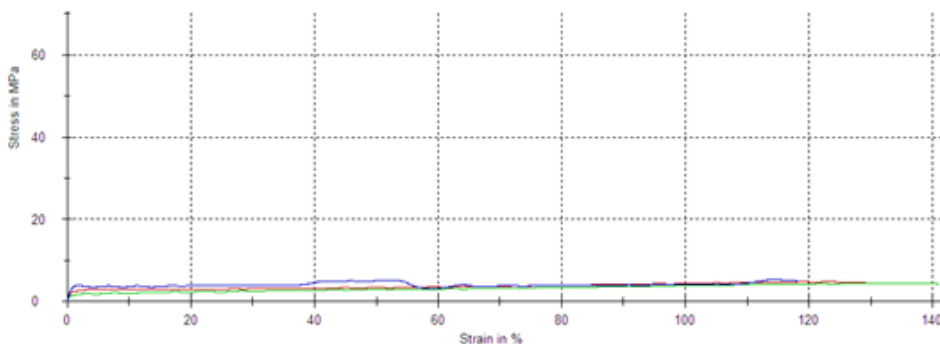


E <sub>t</sub>	σ <sub>y</sub>	ε <sub>y</sub>	σ <sub>m</sub>	ε <sub>m</sub>	σ <sub>b</sub>	ε <sub>b</sub>	b	h
MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	mm	mm
1440	18,5	2,2	18,5	2,2	13,7	68	6,02	2,02
1360	16,3	2,0	16,3	2,0	12,4	69	6,03	2,02
1310	16,4	2,0	16,4	2,0	12,2	72	6,03	2,01

Series	E <sub>t</sub>	σ <sub>x</sub>	σ <sub>y</sub>	ε <sub>y</sub>	σ <sub>m</sub>	ε <sub>m</sub>	σ <sub>b</sub>	ε <sub>b</sub>	ε <sub>10</sub>	b	h
n = 3	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	%	mm	mm
x	1370	-	17,1	2,1	17,1	2,1	12,8	-	70	6,027	2,017
s	63,4	-	1,23	0,093	1,23	0,093	0,809	-	2,5	0,005774	0,005774
v	4,63	-	7,22	4,48	7,22	4,48	6,34	-	3,60	0,10	0,29

Se puede observar que el comportamiento de las curvas obtenidas a 120°C y 140°C, son muy semejantes. Cada vez la tensión de yield y su posterior bajada de la tensión nominal es menos apreciable, ya que estamos a temperaturas cercanas a la T<sub>g</sub>. El cold-drawing aparece mucho antes que en bajas temperaturas y la deformación de rotura es mayor.

Curvas y resultados de las 3 probetas ensayadas a 148°C.



$E_t$	$\sigma_y$	$\varepsilon_y$	$\sigma_m$	$\varepsilon_m$	$\sigma_b$	$\varepsilon_b$	b	h
MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	mm	mm
407	2.98	4.3	2.98	4.3	4.24 *	130 *	6.03	2.01
283	1.89	2.9	1.89	2.9	4.17 *	140 *	6.04	2.02
496	3.89	1.8	3.89	1.8	4.78 *	120 *	6.03	2.01

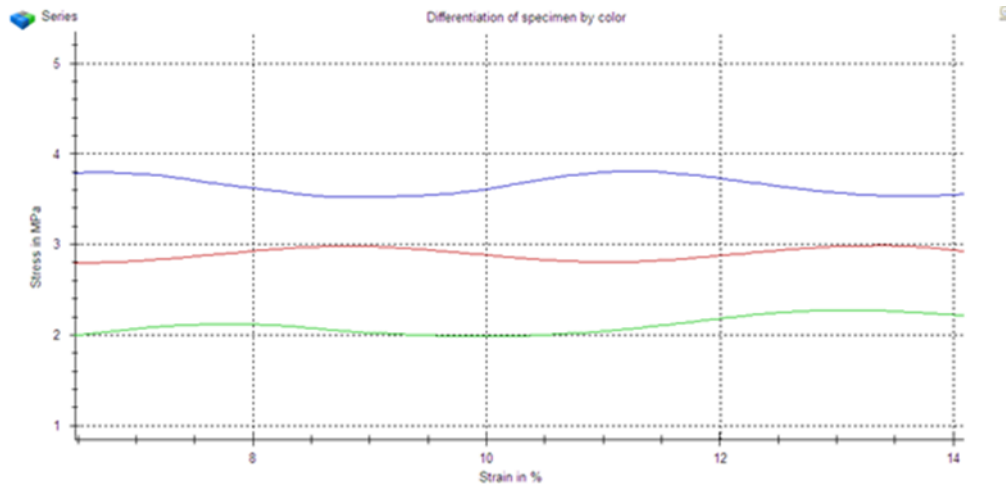
Serie	$E_t$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\varepsilon_y$	$\sigma_m$	$\varepsilon_m$	$\sigma_b$	$\varepsilon_b$	$\varepsilon_a$	b	h
n = 3	MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	%	mm	mm
x	396	-	2.92	3.0	2.92	3.0	4.39	-	130	6.033	2.013
s	107	-	1.00	1.3	1.00	1.3	0.334	-	11	0.005774	0.005774
v	27.12	-	34.32	41.84	34.32	41.84	7.60	-	8.76	0.10	0.29

Las curvas y resultados obtenidos a 148°C, muestran el comportamiento de un caucho. Este comportamiento se debe a la temperatura con la que se realiza el ensayo, puesto que solo estamos a 2°C de la Tg del policarbonato. Las curvas son muy largas y las deformaciones se producen con tensiones muy bajas, las cuales son características de un caucho.

A estas temperaturas las posibilidades de movimiento de la estructura del policarbonato son muy grandes. Una molécula se puede desplazar con respecto a otra, aunque no de manera indefinida, ya que los enmarañamientos entre cadenas lo impiden y, además, se mueven hacia posiciones de menor entropía ordenadas en la dirección de la tensión [21].

Los grandes movimientos de moléculas dan lugar a cambios en la estructura. Por este motivo la deformación no es instantánea. Estos movimientos de cadenas se producen fácilmente a temperaturas grandes y por eso, la deformación es de tipo anelástico.

Una vez sabido el comportamiento de los cauchos, analizamos nuestras curvas. A simple vista parece que son unas curvas casi lineales, pero si aumentamos la imagen se observa que no es así y que las líneas van haciendo ondas periódicamente. La siguiente imagen es un aumento del gráfico de arriba para poder observar las ondas citadas.

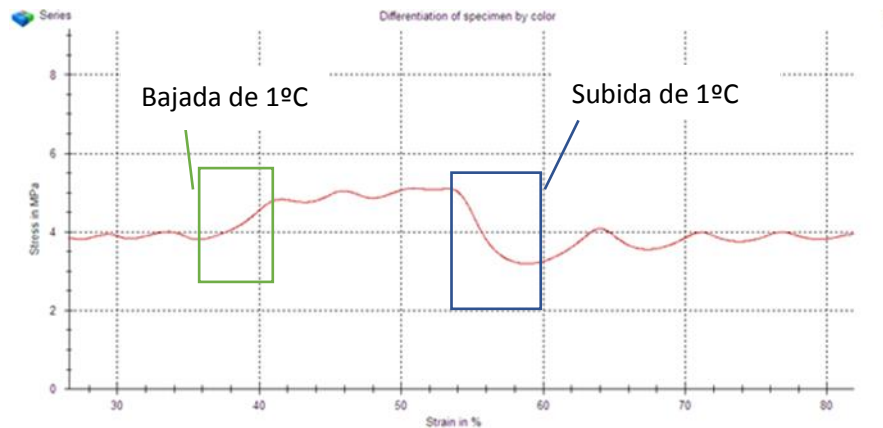


Este fenómeno no solo pasa en las curvas a 148°C. Si observamos las de 120 y 140°C también se pueden apreciar dichas ondas. A continuación, se explica el origen de estas ondas. Estos ensayos que ahora se han hecho virtualmente, se ensayaron anteriormente con la maquina Instron 5569 para el posterior traspaso al programa testXpert II.

En los ensayos realizados con cámara térmica, como bien se explica en un apartado anterior del trabajo, las probetas necesitan un tiempo para atemperarse a la temperatura del ensayo. En un principio se pensó que la causa de las ondas podría haber sido el mal calentamiento de las probetas y que no tuviese la misma temperatura en todas sus zonas. Por ello, se repitieron los ensayos dejando la probeta calentando el suficiente tiempo (1 h) para asegurarse de que esta tuviese la temperatura adecuada en todas sus zonas. El resultado fue el mismo, es decir, seguían saliendo ondas. También se comprobó que las mordazas no tuvieran ningún tipo de rozamiento con la cámara térmica, ya que esta causa podría haber sido la causante, pero se comprobó que no había rozamiento.

Finalmente, se comprobó si la temperatura de la cámara térmica era constante a lo largo del tiempo. Para ello, se programó en la cámara una temperatura de 148°C y se introdujo un termopar dentro. Pasada media hora, para que la cámara entera estuviese a esa temperatura, se comprobó la temperatura dentro de la cámara con el termopar. Se observó que la temperatura oscilaba  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ , que no parece mucho. Sin embargo, el efecto de la temperatura cerca de la  $T_g$  afecta mucho más que a

temperaturas bajas, por lo que esta podría ser la causa de las ondas. Para confirmarlo, se realizó un ensayo a 148°C y, durante el ensayo, se bajó y subió 1°C desde la cámara térmica para ver como afectaban los cambios de temperatura durante el ensayo. Este fue el resultado.

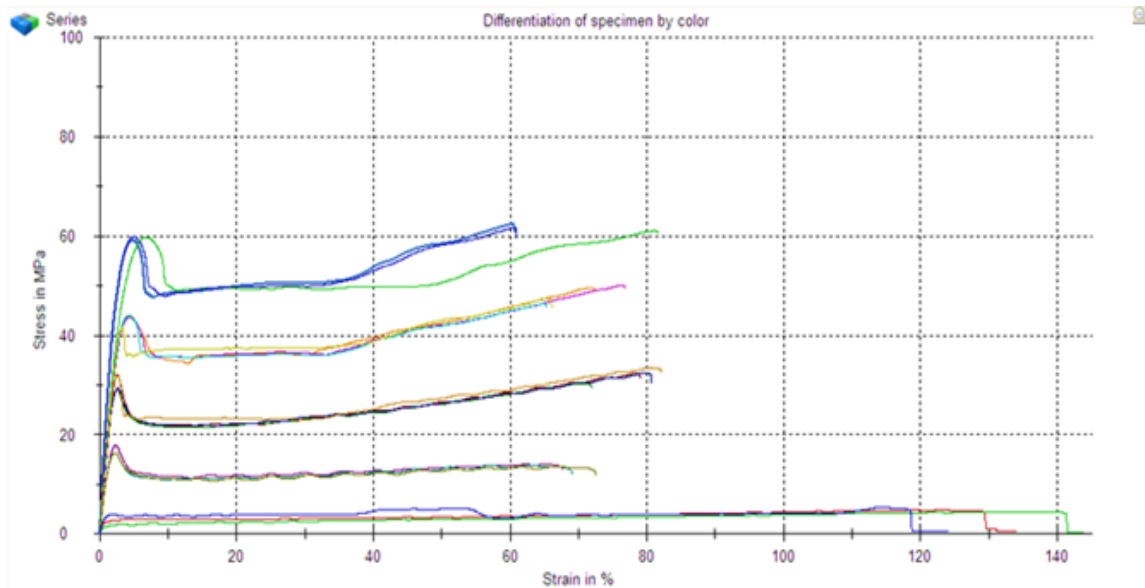


En la imagen se observa cómo actúa la curva con la bajada de 1°C (de 148°C a 147°C) y la posterior subida. Durante el ensayo, nada más programar la temperatura de 147°C la curva empezó a subir como se puede ver en la imagen y, al subir a 148°C, pasó lo mismo. Así, se explica el fenómeno de las ondas. Si a 1°C muestra ese cambio, la oscilación de 0,3°C de la propia cámara térmica es la que crea la onda en la curva. De esta manera queda claramente puesto en evidencia lo sensible que es el comportamiento mecánico del material a la temperatura, en las proximidades de la T<sub>g</sub>, y lo rápidamente que se alcanza el equilibrio térmico de la probeta.

#### EFFECTO TEMPERATURA

A continuación, se muestran todas las curvas obtenidas con las diferentes temperaturas.





En el grafico se puede observar una notable diferencia en las curvas dependiendo de la temperatura. Esto es una muestra de la importancia que tiene la temperatura en las propiedades mecánicas de un polímero.

Lo primero que cabe destacar, es que tanto el módulo como la tensión de yield, disminuyen cuando la temperatura aumenta, salvo alguna excepción. El esfuerzo de rotura también baja con el aumento de la temperatura [22].

A temperaturas bien por debajo de la  $T_g$ , los segmentos de la cadena no tienen posibilidad de movimiento, siendo baja la deformación del material. A temperaturas cercanas, pero por debajo de la  $T_g$ , como 120 ó 140°C, la curva presenta un máximo seguido de un “plateau” de tensión constante. La deformación es elevada debido al estiramiento de las moléculas del policarbonato que son flexibles. A temperaturas todavía más cercanas a la  $T_g$ , 148°C, la deformación es tipo caucho, muy elevada.

Cuando la temperatura aumenta se produce una expansión gradual del material, lo que resulta en un aumento del volumen libre y en un debilitamiento de las fuerzas de cohesión del material. Por ello, cuanto más cerca estemos de la  $T_g$  del policarbonato, 150°C, más se alargará la probeta antes de romperse y menos carga necesitaremos para la fluencia del polímero [23].

Como es de esperar para un polímero amorfo, la tensión de fluencia va disminuyendo cuando la temperatura se acerca a la temperatura de transición de vítrea,  $T_g$ . A temperaturas mayores el polímero puede comportarse como un elastómero, por lo que el alargamiento a rotura puede llegar al 1000% [24]. A temperaturas bajas, en cambio, el comportamiento es el de un sólido elástico.

Sin embargo, para las temperaturas intermedias, el polímero presenta un comportamiento intermedio (sólido viscoelástico), que presenta características mecánicas intermedias entre estos los dos extremos. Esta condición se denomina viscoelasticidad.

Por lo tanto, las características dúctiles del policarbonato aumentan con la temperatura.



### **3-PRÁCTICA: EFECTO DE LA CRISTALINIDAD (PROFESOR)**

#### **PREPARACIÓN DEL METODO**

Se creará un método con las condiciones adecuadas para esta práctica. Se guardará con el nombre "efecto cristalinidad".

#### **ENSAYO**

En esta práctica se usa la PA 6,6 con dos grados de cristalinidad diferentes. Por tanto, en el listado de materiales encontraremos la PA 6,6 y la PA 6,6 recristalizada, cuyas cristalinidades son del 32,4% y 49,3%, respectivamente, medidas por DSC.

Se ensayarán todas las probetas de cada uno de ellos de la misma manera que se ha hecho anteriormente con las otras prácticas.

Se recomienda empezar a ensayar con la PA 6,6 y luego, la PA 6,6 recristalizada. De esta manera, conseguiremos curvas de la PA 6,6 con distintos grados de cristalinidad en la misma gráfica para posteriormente analizarlas.

#### **RESULTADOS**

Los polímeros semicristalinos están formados por laminillas que contienen cadenas plegadas. Las láminas se mantienen unidas por "moléculas de unión" que van de una capa cristalina a otra. Los extremos de las cadenas y las imperfecciones moleculares tienden a acumularse en la porción amorfa entre las láminas de cristalito, por lo que pueden existir muy pocas moléculas de unión y se obtiene un material quebradizo de baja resistencia a temperaturas por debajo de la Tg [15].

Para materiales elastoméricos o muy dúctiles, la presencia de una fase cristalina produce un comportamiento de tensión-deformación bastante diferente. Al pasar de ninguna cristalinidad a un alto grado de cristalinidad, la curva tensión-deformación cambia de la de un caucho no reticulado a una que es similar a un caucho reticulado. A muy altos grados de cristalinidad, especialmente si están presentes grandes esferulitas, el polímero tiene en muchos casos la curva tensión-deformación de un material quebradizo.

La cristalinidad en un polímero modifica el módulo de un polímero semicristalino por encima de su punto de Tg por al menos dos mecanismos. En primer lugar, los cristalitos actúan como retículos atando juntos los segmentos de muchas moléculas. En segundo lugar, los cristalitos tienen muy altos módulos en comparación con las partes amorfas, de modo que se comportan como materiales de relleno rígidos en una matriz amorfa [25].

A pesar de que los enlaces intermoleculares secundarios son mucho más débiles que los covalentes primarios, aquéllos suelen ser más efectivos para inhibir la movilidad relativa de las cadenas. Así, las propiedades mecánicas de los polímeros dependen en gran medida de la magnitud de dichas fuerzas intermoleculares [25].

#### EFEECTO CRISTALINIDAD

El grado de cristalinidad de un determinado polímero influye decisivamente en sus propiedades mecánicas, ya que el grado de cristalinidad influye en la cantidad de enlaces secundarios intermoleculares presentes. En las regiones cristalinas, donde las cadenas moleculares están empaquetadas y dispuestas ordenada y paralelamente, suele haber enlaces secundarios entre segmentos de cadenas adyacentes. Estos enlaces secundarios son mucho menos numerosos en las regiones amorfas, donde las cadenas están desalineadas. Así, el aumento de la cristalinidad de un determinado polímero mejora generalmente las propiedades mecánicas [26].

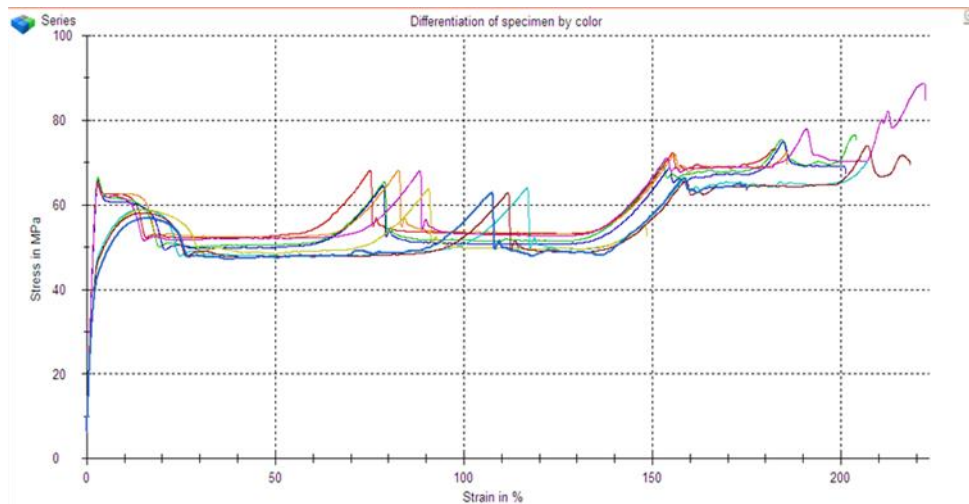
La cristalinidad apenas tiene efecto sobre el módulo en las temperaturas por debajo de Tg. En la zona cauchosa, en cambio, el módulo incrementa muy rápidamente con el grado de cristalinidad.

En esta práctica se trabaja con el nylon 6,6, el cual tiene una Tg de 50°C. Este valor tiende a 0°C con la absorción del agua. El nylon 6,6 a temperatura ambiente, con la cantidad normal de agua absorbida, debe estar ligeramente por encima de la Tg y la cristalización se produce muy lentamente. Por tanto, a pesar de su alta cristalinidad, mantienen cierta flexibilidad en condiciones ambientales.

Cuanto mayor es el grado de cristalinidad menor es la absorción de agua y, por consiguiente, menor será el efecto de la humedad sobre las propiedades. El agua absorbida tiene un efecto de plastificante, por lo que da origen a una reducción en la resistencia a la tracción [15].

El mecanismo básico de deformación elástica de los polímeros semicristalinos es la elongación (enderezamiento) de las cadenas de moléculas del polímero en la dirección de la tensión aplicada. El módulo elástico es definido por las propiedades elásticas de las regiones amorfas y cristalinas.

A continuación, se muestran las curvas y resultados de las probetas de PA6,6 y PA6,6 recristalizada.



$E_t$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\epsilon_y$	$\sigma_m$	$\epsilon_m$	$\sigma_b$	$\epsilon_b$	$\epsilon_{tb}$	b	h
MPa	MPa	MPa	%	MPa	%	MPa	%	%	mm	mm
2920	-	65,7	2,9	65,7	2,9	73,2	-	180	6,04	2,02
2870	-	66,3	3,0	66,3	3,0	76,5	-	200	5,82	1,99
2800	-	64,8	3,0	64,8	3,0	67,2	-	200	5,85	2
2880	-	64,6	2,9	64,6	2,9	72,4	-	190	5,84	1,99
2870	-	65,2	2,9	65,2	2,9	88,7	-	220	5,85	1,99
2150	57,6	58,8	14	58,8	14	70,1 *	-	210 *	6,04	2,02
2140	57,2	58,8	15	58,8	15	52,5	-	150	6,04	2,02
2160	56,7	58,1	15	58,1	15	69,3	-	220	6,04	2,02
2030	54,8	56,7	16	56,7	16	63,4	-	170	6,09	2,02

Los cinco primeros corresponden a las probetas del nylon recristalizado y los cuatro últimos a los del nylon sin recristalizar.

Se observa que el módulo y la fuerza de yield aumentan con el grado de cristalinidad [26]. En cambio, para la deformación de rotura la cristalinidad no tiene efecto. Cada probeta es diferente a la otra y, dependiendo de la zona de rotura o el propio estado de la probeta, la rotura se dará antes o después.

En cuanto al comportamiento de las curvas, tanto las del nylon como en las del recristalizado, se aprecian diferentes picos o máximos. Al ser un polímero semicristalino, cuando se da la primera estricción, las cadenas moleculares se alinean en dirección de la carga aplicada, es decir, las partes amorfas del material se ordenan. Al alinearse, la parte amorfa se vuelve cristalina, lo que da lugar a que en esa zona se cree otra estricción. Esa zona que se ha vuelto cristalina, se requiere una fuerza de rendimiento mayor que la que tenía anteriormente y por eso, aparecen esas subidas de la tensión. Este comportamiento es particular del nylon.

## 4. CONCLUSIONES

Tras la realización del presente trabajo titulado “Simulación de ensayos mecánicos mediante software testXpert II”, se pueden extraer las siguientes conclusiones generales.

1. Se ha conseguido proponer una metodología para importar nuevos materiales desde la máquina de ensayos mecánicos Instron 5569 a la biblioteca del software testXpert II. El protocolo propuesto permitirá a cualquier persona la adición rápida de los nuevos materiales que se quieran incorporar en el futuro.

2. Dada la complejidad del manejo correcto del programa, debido a las numerosas opciones que presenta, se ha conseguido redactar un protocolo sencillo para la persona principiante en el uso del software testXpert II.

3. En base a la Enseñanza Asistida por Ordenador (EAO), con el uso del software testXpert II, se ha conseguido un instrumento educativo y eficaz en el proceso de aprendizaje de los ensayos mecánicos y que sirva a los alumnos para alcanzar los objetivos previstos, además de entretenerlos y motivarlos.

4. Al hilo de la conclusión anterior, para un aprendizaje guiado, se ha elaborado un cuaderno de prácticas tanto para el alumno como para el profesor, donde se analizan los efectos de tres parámetros diferentes (velocidad, temperatura y cristalinidad) en los resultados de tracción.

Como trabajos futuros utilizando el software testXpert II, con la ayuda de las guías proporcionadas en este trabajo, se podría aumentar aún más la biblioteca con nuevos materiales tales como cauchos, resinas termoestables, incluso metales. Además, se pueden crear nuevas prácticas analizando otros efectos como, por ejemplo, el efecto de la estructura del polímero, de la orientación molecular, de los plastificantes o la influencia del peso molecular, entre otros.



## 4. CONCLUSIONS

Following the completion of the present paper entitled "Simulation of mechanical tests using software testXpert II", the following general conclusions can be drawn.

1. It has been possible to propose a methodology to import new materials from the mechanical test machine Instron 5569 to the software library testXpert II. The proposed protocol will allow anyone to quickly add new materials to be incorporated in the future.

2. Due to the complexity of the correct management of the program, because of the many options offered, it has been possible to write a simple protocol for the beginner in the use of the testXpert II software.

3. Based on Computer-Assisted Teaching (EAT), with the use of testXpert II software, an educational and effective instrument has been achieved for the process of learning mechanical tests, which could be used by the students to achieve the targeted objectives, as well as to entertain and to motivate them.

4. Following the previous conclusion, for a guided learning, practical laboratory guides have been developed for both the student and the teacher, where the effects of three different parameters (velocity, temperature and crystallinity) on tensile tests results are analyzed.

As future work using testXpert II software, with the help of the guides provided in this paper, the library of materials could be further expanded with new materials such as rubbers, thermoset resins, or even metals. In addition, new practices can be written to analyze the effect of other parameters such as the effect of polymer structure, molecular orientation, plasticizers or the influence of molecular weight, among others.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

1. S. Almeida Campos, J. P. Febles Rodríguez, O. Bolaños Ruiz, “Evolución de la enseñanza asistida por computadoras”, *Educación Médica Superior*, **11(1)**, 31-38 (1997)
2. A. B. García Castillo, “Educación asistida por computadora”, (2011)  
[https://es.slideshare.net/geli\\_zafiro22/maestra-en-comunicacin-acadmica](https://es.slideshare.net/geli_zafiro22/maestra-en-comunicacin-acadmica)
3. J. M. Lefebvre, “Guía práctica de la EAO”, Ed. Gustavo Gili, México (1984)
4. J.L. Alonso Oliva, D. Gutiérrez Fernández, V. López Santa Cruz, J. Torrecilla Peñuela, “El mundo de la enseñanza asistida por ordenador”, Universidad de Castilla-La Mancha, Escuela Universitaria de Magisterio de Toledo (1998) pp. 27-33
5. M. A. Pérez Abad, “Enseñanza de inglés asistida por ordenador: evaluación de CALL en general y de algunos programas en particular”, I. B. Alhambra, Granada (1991)  
[https://cvc.cervantes.es/ensenanza/biblioteca\\_ele/diccio\\_ele/diccionario/ensenanz aasistordenador.htm](https://cvc.cervantes.es/ensenanza/biblioteca_ele/diccio_ele/diccionario/ensenanz aasistordenador.htm)
6. M. A. Gómez Crespo, “Influencia de la enseñanza asistida por ordenador en el rendimiento y las ideas de los alumnos en electricidad”, *Enseñanza de las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, **12(3)**, 355-360 (1994)
7. P. Marqués, “El software educativo”, Universidad Autónoma de Barcelona.  
[http://www.lmi.ub.es/te/any96/marques\\_software/](http://www.lmi.ub.es/te/any96/marques_software/)
8. J. Salinas, “Innovación docente y uso de las TIC en la enseñanza universitaria”, *Revista Universitaria y Sociedad del conocimiento*, **1**, 1-16 (2004)  
<http://www.uoc.edu/rusc/dt/esp/salinas1104.pdf>
9. G. Sentís Sans, “Simulación de ensayos mecánicos”, Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica (UPC)  
<http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/22129/Resum.pdf?sequence=2>
10. Charles A. Harper, “Modern plastics handbook”, McGraw-Hill (1998)
11. A. Hatef, S. M. Hadi Alavi, A. Abdulfatah, P. Fontaine, M. Rodina, O. Linhart, “Ecotoxycology and Environmental Safety”, **76**, 56-63 (2012)

12. L. Di Maio, E. Garofalo, P. Scarfato, L. Incarmato, "*Effect of polymer composition on morphology and rheological properties of polylactide nanocomposites*", *Polymer Composites*, **36**, 1135-1144 (2015), DOI: 10.1002
13. D. W. Vankrevelen, "*Properties of Polymers: Their Correlation with Chemical Structure*", *Third Edition*, Elsevier Science (1990) pp. 596, 704
14. J. R. Miró Recasens, F. E. Pérez Jiménez, "*Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo*", **5**, 178-228 Barcelona (1994)
15. J.A. Brydson, "*Plastics materials*", *Seventh edition*, Butterworth Heinemann, Oxford (1982)
16. L. Conelis, E. Struik, "*Physical aging in amorphous polymers and other materials*", **7(5)**, 49-117 (1977)
17. A. D. Mulliken, M. C. Boyce, "*Mechanics of the rate-dependent elastic-plastic deformation of glassy polymers from low to high strain rates*", *International Journal of Solids and Structures*, **43(5)**, 1331-1356 (2006)
18. W. E. Brown, "*Testing of polymers*", **4**, John Wiley & Sons, New York (1968)
19. P. Zhang, Y. Huang, P. H. Geubelle, P. A. Klein, K. C. Hwang, "*The elastic modulus of single-wall carbon nanotubes: a continuum analysis incorporating interatomic potentials*", *International Journal of Solids and Structures*, **39(13-14)**, 3893-3906 (2002)
20. D. C. Hylton, "*Plastics Testing*", Hanser Publishers, Munich (2004) pp. 17-37
21. Meyers y Chawla, "*Mechanical Behaviors of Materials*", Prentice Hall, Inc. Pearson Education, (1999)
22. V. Shah, "*Handbook of Plastics testing and failure analysis*", *Third Edition*, John Willey & Sons, New Jersey (2007) pp. 17-94
23. L. E. Nielsen, R. F. Landel, "*Mechanical properties of polymers and composites*", *Second Edition*, L. L. Faulkner, The Ohio University Columbus (1994) pp. 253-256
24. O. Salomón, S. Oller, A. H. Barbat, "*Modelo numérico de elastómeros multi-fase y su aplicación al análisis de estructuras con aislamientos sísmicos*", *Monografías de Ingeniería sísmica*, **2**, 16-18 (2000)
25. J. V. Schmitz, "*Testing of polymers*", John Wiley & Sons, **2**, 83-135 (1966)
26. 23. L. E. Nielsen, R. F. Landel, "*Mechanical properties of polymers and composites*", *Second Edition*, L. L. Faulkner, The Ohio University Columbus (1994) pp. 131-337

