

Resumen

Este trabajo se centra en la instrumentación adicional de probetas para evaluar sus propiedades mecánicas a altas velocidades de sollicitación. Los equipos de impacto usuales no nos permiten medir directamente sobre las probetas ensayadas. En efecto, la medición se suele hacer mediante sensores instalados en diferentes partes del equipo: impactor (para los ensayos de flexión de barras prismáticas) y mordaza (para los ensayos de impacto-tracción).

Para comprobar que lo que se mide por el equipo corresponde realmente a lo que sufre la probeta, hemos de plantear un método que nos permita medir directamente sobre las probetas. Uno de ellos es la extensometría, que mediante la colocación de galgas sobre las probetas nos permite medir sus elongaciones.

Antes de empezar con la instrumentación de las probetas, se hizo una serie de experimentos previos con el objetivo de tener unas referencias seguras para la caracterización del material. Además de los ensayos de tracción a baja velocidad, se hicieron unos ensayos de indentación y flexión de discos a altas velocidades que nos han permitido, mediante modelos analíticos, conseguir una caracterización referencial a velocidades de impacto.

Este trabajo se ha estructurado en concordancia con la metodología utilizada en la investigación correspondiente. Así, en el primer capítulo se ha hecho una introducción sobre los temas afines al proyecto. El segundo capítulo se dedica a la extensometría con su principio de funcionamiento. En el tercer capítulo se describen las características generales y particulares de los materiales ensayados. El cuarto capítulo contiene la descripción y la validación de los modelos analíticos empleados en los ensayos de caída de dardo. En el quinto capítulo se exponen los métodos de ensayo utilizados y las herramientas experimentales necesarias para su realización. Luego, en otro capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos a lo largo del proyecto y necesarios para sacar conclusiones. Para acabar, se expone una estimación del impacto ambiental y del coste del proyecto.



Índice

Resumen	1
Índice	2
CAPÍTULO 1: Introducción	5
1.1 Introducción general.....	6
1.2 Objetivos	9
CAPÍTULO 2: Extensometría.....	10
2.1 Introducción	11
2.2 Factor de galga	12
2.3 Materiales de la galga.....	12
2.3.1 El hilo conductor	12
2.3.2 El soporte.....	13
2.3.3 Encapsulados.....	14
2.3.4 Salidas	14
2.4 Geometría de las galgas.....	14
2.5 Efectos de la temperatura	16
2.6 Elección del tipo de galga	16
2.6.1 Tipo de información que se desea obtener de las mediciones.....	16
2.6.2 Material sobre que se desea medir	16
2.6.3 Lugar de colocación	17
2.6.4 Condiciones y tipo de ensayo.....	17
2.7 Elección de la cola.....	18
2.8 Conexiones de las galgas.....	18
2.8.1 Puente de Wheatstone	18
2.8.2 Propiedades del puente de Wheatstone	20
2.8.3 Diferentes montajes en puente	21
CAPÍTULO 3: Materiales	23
3.1 Poliamidas	24
3.1.1 Propiedades	25
3.1.2 Ejemplos de aplicación.....	27
3.2 Material de refuerzo: la fibra de vidrio	27
3.3 Obtención de las probetas	29
3.3.1 Inyección	29
3.3.2 Mecanización	35
CAPÍTULO 4: Modelos.....	37
4.1 Indentación: modelo no conservativo serie.....	38
4.1.1 Desarrollo del modelo	38
4.1.2 Resolución numérica	40
4.1.3 Validación del modelo	42
4.2 Indentación + flexión: modelo serie-paralelo.....	45
4.2.1 Desarrollo del modelo	45
4.2.2 Resolución numérica	47
4.2.3 Validación del modelo	50
CAPÍTULO 5: Metodos experimentales.....	53
5.1 Galgado de probetas	54
5.1.1 Probetas de impacto-tracción	55
5.1.2 Probetas SENB	56
5.2 Ensayos de tracción a baja velocidad.....	57
5.3 Ensayos a alta velocidad	59



5.3.1 Indentación	59
5.3.2 Flexión de platos	62
5.3.3 Impacto-tracción.....	63
5.3.4 Flexión de barras prismáticas.....	65
CAPÍTULO 6: Resultados y discusiones	70
6.1 Tracción a baja velocidad.....	71
6.1.1 Efectos del contenido en fibra.....	71
6.1.2 Efectos de la orientación de las fibras.....	73
6.1.3 Efectos de la velocidad de ensayo.....	75
6.1.4 Efectos del tamaño de las probetas	76
6.2 Indentación	78
6.3 Flexión + indentación.....	84
6.4 Impacto-tracción.....	93
6.5 Flexión de probetas SENB	100
6.5.1 Determinación del factor K_{IC}	100
6.5.2 Determinación del punto de inicio de la grieta	108
CAPÍTULO 7: Impacto ambiental y coste del proyecto.....	113
7.1 Impacto ambiental	114
7.1.1 Consumo eléctrico.....	114
7.1.2 Movilidad	116
7.1.3 Datos finales.....	116
7.2 Coste del proyecto.....	116
7.2.1 Consumo eléctrico.....	116
7.2.2 Materiales	117
CAPÍTULO 8: Conclusiones	118
Referencias.....	120
Agradecimientos.....	121





1- Introducción



1.1 Introducción general

La mayoría de los materiales que se emplean en ingeniería están sometidos a cargas dinámicas, por lo cual se está impulsando el desarrollo de métodos experimentales fiables que permitan realizar la caracterización del comportamiento mecánico de los materiales y de sus procesos de fractura en condiciones de baja, media y alta velocidad.

Se puede afirmar que el uso de productos plásticos y compuestos de matriz polimérica es creciente en ingeniería, lo que implica que hoy en día se hace tan necesario el estudio de sus propiedades como la puesta a punto de métodos de ensayo que permitan caracterizarlos bajo diferentes condiciones de aplicación de carga, siendo de especial interés conocer la respuesta de los mismos a las altas velocidades de sollicitación.

Desde la óptica de la ciencia de los materiales, la relación entre la estructura y el comportamiento de fractura de los polímeros es una de sus más importantes ramas, en la que los ensayos de impacto juegan un rol principal. Cada vez más un conocimiento cuantitativo del comportamiento a impacto, en términos de la ciencia de los materiales, requiere de un conjunto de técnicas adicionales para suplir –teórica y experimentalmente- los métodos de ensayo de impacto básicos especificados por las entidades de normalización como ASTM, BSI, DIN e ISO. Así, las técnicas de impacto utilizadas para evaluar el comportamiento al impacto de los materiales plásticos han desarrollado, paralelamente al diseño de nuevos y sofisticados equipos, desde las conocidas técnicas clásicas hasta las recientes que utilizan equipos instrumentados así como la teoría de la mecánica de la fractura.

En los últimos años -aproximadamente 30- diferentes organizaciones internacionales de normalización, así como instituciones y empresas de prestigio, han sumado esfuerzos en el intento de estandarizar las pruebas de impacto. Esto es, utilizar las mismas técnicas y equipos en todos los laboratorios para poder comparar sin duda alguna los resultados y, por tanto, también la calidad de los productos.

Los procesos de fractura en materiales poliméricos dependen en gran manera de las propiedades del material y, dado que los polímeros no tienen una estructura cristalina parecida a la de los metales o los cerámicos, la aparición de determinados tipos de mecanismos y la ausencia de otros hace que su estudio sea más complejo.



Si bien es cierto que los polímeros pueden presentar cierta estructura cristalina, la presencia de las macromoléculas hace que su acomodamiento y fuerza de cohesión sea distinta a la de las otras familias de materiales, influyendo de esta forma en sus propiedades mecánicas.

De hecho, un polímero puede muchas veces considerarse un fluido, con lo cual todos sus mecanismos de deformación dependen del tiempo. La presencia de términos viscosos dentro de la modelización de sus propiedades implica una dimensión temporal que no aparece en otros materiales.

Cuando se trabaja con materiales poliméricos a altas velocidades de sollicitación los efectos viscoelásticos de los mismos se vuelven despreciables, dado que estos fenómenos dependen de una componente temporal y en condiciones de impacto el tiempo consumido por dicho evento es mínimo.

De hecho, uno de los principales problemas de las técnicas de impacto es su alta dependencia respecto a los factores geométricos de la pieza ensayada, lo cual hace que los parámetros evaluados no sean una característica intrínseca del material, lo que limita en gran medida la utilidad de la información obtenida.

Por otro lado, el estudio del fenómeno de impacto en la actualidad se realiza por medio de sistemas instrumentados, lo que permite obtener más información que la energía absorbida por el impacto que proporcionaban los sistemas enteramente analógicos. Esta información que nos permite suponer lo que ocurre en el material, y nos posibilita discriminar los fenómenos dinámicos debidos al impacto de la energía absorbida y recuperada por el material. Esto nos permite diferenciar el comportamiento de 2 materiales que puedan consumir la misma energía en un fenómeno de este tipo [1].

Por lo anterior las pruebas de impacto son atractivas a la hora de evaluar el comportamiento de piezas hechas con plásticos de ingeniería. Sin embargo, el fenómeno de impacto dentro del campo de los polímeros es poco conocido.

Hoy en día, casi no existen publicaciones que tratan de impacto-tracción y tampoco de mecánica de la fractura de polímeros reforzados con fibras. El ESIS-TC4 está estudiando esto. ESIS (European Structural Integrity Society) es una organización de expertos europeos en la investigación y el desarrollo en el área de la fractura de materiales. Technical Committee 4 (ESIS-TC4) fue creado en 1985. Sus actividades se centran en el desarrollo y la standardización de las técnicas para la determinación de los parámetros de mecánica de la fractura de los materiales poliméricos. Las actividades de ESIS-TC4 se listan en la tabla 1.1.



DESCRIPTION OF ACTIVITY	CURRENT STATUS	DESIGNATION
Determination of fracture toughness (G_{IC} & K_{IC}) for plastics. An LEFM approach.	ISO standard published March 2000.	ISO 13586-1
Mode I interlaminar fracture toughness, G_{IC} , of unidirectional fibre-reinforced polymer composites.	ISO standard published in 2001.	ISO 15024
Mode II interlaminar fracture toughness, G_{IIC} , of unidirectional fibre-reinforced polymer composites.	TC4 protocol available. (Latest version 99-12-03). To be proposed jointly with 4ENF test-Technical Specification Doc.	-
Mixed-mode (I/II) interlaminar fracture toughness, G_{IIIC} , of unidirectional fibre-reinforced polymer composites. (ADCB).	TC4 protocol available. (Latest version 00-05-03) (Awaiting outcome of mode II work.)	-
Determination of fracture toughness (G_{IC} & K_{IC}) for short fibre composites.	TC4 Protocol available. Submitted to ISO as annex to ISO 13586. ISO DIS agreed in 2000.	ISO DIS 13585-2
Determination of fracture toughness (G_{IC} & K_{IC}) of plastics at high loading rates. (1m/s)	TC4 protocol published as final International standard- September 2002.	ISO 17281
Determination of fracture toughness (G_{IC} & K_{IC}) of plastics at loading rates greater than 1m/s. (1-30m/s)	TC4 protocol available. (Round-robin evaluation underway.)	-
J-Crack growth resistance curve tests for plastics under impact conditions.	TC4 protocol available, written as appendix D to static J protocol above. (Latest version: Oct 1996)	-
Essential work of fracture (EWF).	TC4 Protocol available. (Round-robin evaluation underway.)	-
Mode I interlaminar fracture toughness, G_{IC} , of cross-ply fibre-reinforced polymer composites.	Protocol as for mode I laminates. (Round-robin evaluation underway.)	-
Determination of the mode I adhesive fracture energy, G_{IC} , of structural adhesives.	TC4 protocol available (version 1-06-00) Published as a British Standard in 2001. Decision on EN pending.	BS 7991
Test method for tension-tension fatigue crack propagation in plastics	Standard published on 15/06/2002 (Round-robin evaluations underway.)	ISO 15850
Mode I interlaminar fracture toughness, G_{IC} , of z-pinned fibre-reinforced polymer composites.	As for ISO 15024. (Round-robin evaluation underway.)	-
Determination of fracture toughness (G_{IC} & K_{IC}) of short fibre composites at high loading rates. (1m/s)	No protocol available yet. (Preliminary testing underway).	-

Tabla 1.1: Actividades del ESIS-TC4



Recientemente, el ESIS-TC4 se ha centrado en los métodos de caracterización de la fractura de materiales compuestos a altas velocidades de sollicitación. El round-robin del TC4 es con poliamida reforzada con fibras.

1.2 Objetivos

El objetivo central del presente trabajo es la caracterización de un plástico reforzado con fibra de vidrio sometido a ensayos con altas velocidades de sollicitación. Para trabajar en paralelo con el TC4 del ESIS, fabricamos probetas con poliamida 6 reforzada con diferentes proporciones de fibra de vidrio.

Mediante la instrumentación adicional de las probetas con galgas extensométricas, se preve comprobar la validez de los valores dados por los equipos instrumentados. También, en el caso de la determinación de los parámetros de mecánica de la fractura a impacto, se usan las galgas extensométricas para poder determinar el momento de inicio de la grieta.

Un objetivo intrínseco de este trabajo es estudiar la influencia de las principales variables involucradas: la velocidad de ensayo, el contenido en fibra, el tamaño de las probetas y la orientación de las fibras respecto a la dirección del esfuerzo que sufre la probeta.

La caracterización de las diferentes mezclas se hará mediante una amplia gama de ensayos a baja como a alta velocidad: tracción, impacto-tracción, flexión e indentación de discos y flexión de barras prismáticas.



2- Extensometría



2.1 Introducción

En 1938, el científico americano Arthur Ruge investigaba sobre el efecto de los terremotos sobre modelos de depósitos de agua en escala reducida. Para su trabajo precisaba conocer los valores de tensión en distintos puntos del modelo. Los sistemas de medición conocidos hasta entonces le resultaban inútiles, dado que no soportaban las vibraciones, y, además, no permitían realizar las lecturas. En esta situación, Ruge recordó un efecto físico descubierto por Lord Kelvin en 1856. Dicho efecto consiste en lo siguiente:

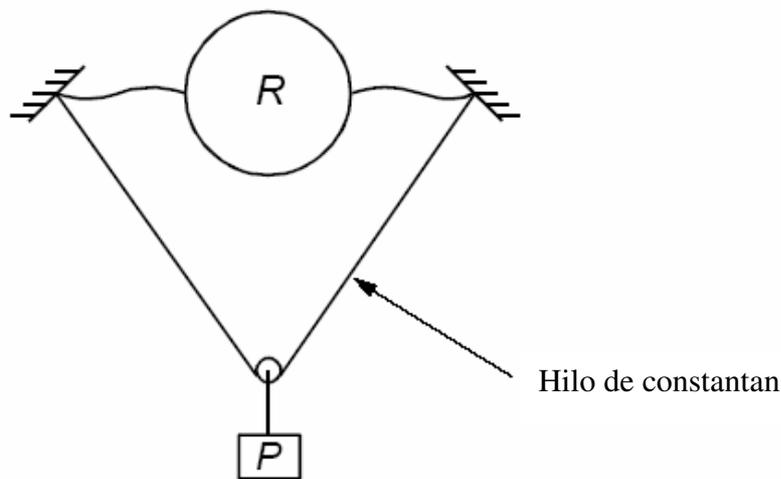


Figura 2.1

Si en el montaje de la figura 2.1 se va variando el peso P , la resistencia R varía en forma proporcional a la carga. Ruge vio en esto una solución a su problema. Enrolló hilo de constantan alrededor de un cilindro de papel y prensó el conjunto. Con un adhesivo adecuado pegó el elemento en la zona en que interesaba conocer la tensión.

Visualizando el valor de la resistencia mediante un osciloscopio, podía conocer los valores de la deformación que sufría el depósito y se trasladaba al hilo de conductor a través del adhesivo. Esta fue la primera galga extensométrica. Actualmente, la construcción de galgas, aunque respetando el mismo principio, ha evolucionado mucho. Las galgas están, normalmente, constituidas por un soporte plástico con la rejilla conductora en una de sus caras.



Veamos a continuación qué ocurre con cada uno de los hilos que forman la rejilla de la galga cuando se produce una deformación. Si el hilo tiene inicialmente una longitud l y su resistencia óhmica es R , al deformarse pasa a una longitud $l+\Delta l$ y su resistencia se convierte en $R+\Delta R$.

Se cumple para ciertos materiales del hilo conductor que:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{\Delta l}{l} = K \cdot \varepsilon$$

es decir, existe proporcionalidad entre variaciones de resistencia del hilo y deformación sufrida.

2.2 Factor de galga. Sensibilidad transversal.

La expresión anterior, válida para el caso de un solo hilo, es aplicable a la galga como conjunto de varios hilos de ida y vuelta, en este caso, igual que antes:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon$$

Aquí, R es la resistencia entre los terminales de la galga, ε la deformación en la dirección de mayor longitud de la rejilla y K es el llamado factor de galga. Su valor oscila alrededor de 2 para las galgas con rejillas de constantan o níquel-cromo (las más usuales).

La galga extensométrica permite, por tanto, convertir el problema de medir deformaciones en el problema de medir resistencias óhmicas. Esto se hace porque estas últimas se pueden medir con gran exactitud convertidas en señales eléctricas, con todas las posibilidades que ofrece el tratamiento de estas últimas.

2.3 Materiales de la galga

2.3.1 El hilo conductor

Los filamentos de las galgas están hechos de constantan (cobre-níquel), algunas aleaciones de níquel-cromo o elinvar (aleación de hierro-cromo-molibdeno). Para el caso de utilizar galgas a



altas temperaturas, se emplean rejillas de aleaciones de platino-tungsteno, que pueden trabajar hasta unos 850°C.

2.3.2 El soporte

La rejilla está colocada sobre un soporte que permite aislar eléctricamente los filamentos del material sobre lo cual se quiere medir (en caso de que éste sea conductor). También debe ser capaz de transmitir lo más fielmente posible las deformaciones sufridas por el elemento estudiado.

El soporte tiene una gran importancia en el comportamiento de la galga.

Algunos problemas que pueden afectar al comportamiento de los soportes son:

La fluencia. Hace que la deformación transmitida disminuya con el tiempo, especialmente si se eleva la temperatura.

La flexibilidad. Necesaria para manejar y encolar las galgas.

El límite de alargamiento. Debe ser tan grande como las máximas deformaciones a medir.

La resistencia de aislamiento. Debe garantizar el aislamiento entre los hilos de la rejilla y con respecto a masa.

La resistencia a la temperatura. Tanto del punto de vista mecánico como de aislamiento eléctrico.

Los tipos de soporte más empleados aparecen en la tabla 2.1.

	Fluencia	Flexibilidad	Límite de alargamiento	Resistencia a la temperatura
Celulosa	R	B	10%	-40 a +70°C
Poliéster	R	MB	2%	-30 a +80°C
Poliamida	B	MB	2.5%	-30 a +200°C
Epoxi	B a MB	R a B	2.5%	-30 a +80°C
Resinas fenólicas con fibra de vidrio	MB	R	2%	-200 a +260°C

MB: Muy buena. B: Buena. R: Regular.

Tabla 2.1



2.3.3 Encapsulados

Algunos tipos de galga disponen de una pequeña lámina plástica sobre la rejilla que evita la penetración de humedad y las agresiones de tipo mecánico, como rayas, etc.

2.3.4 Salidas

En algunas galgas se disponen unas zonas o terminales construidas por una ampliación del circuito, previstas para soldar los hilos de salida. A veces dichos terminales llevan un recubrimiento que facilita la adherencia de la soldadura.

Otros tipos de galgas disponen, ya de fábrica, de pequeños hilos soldados en los terminales. El material de estos hilos tiene gran importancia, caso de que la galga deba soportar solicitaciones dinámicas intensas. Los tipos corrientes de hilos de salida rompen fácilmente ante la vibración. Para estos casos se usan hilos o pequeñas cintas de cobre niquelado o de bronce al berilio, que presentan una excelente resistencia a la fatiga.

2.4 Geometría de las galgas

Galgas Standard.

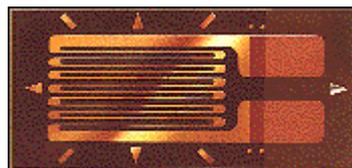


Figura 2.2: galga de uso general

La mayoría llevan los terminales o hilos de conexión a un extremo de la rejilla, siendo ésta de forma rectangular, entre 3 y 10 mm de longitud, mayor en los tipos más habituales. En algunos casos, se disponen los terminales de salida lateralmente para facilitar el cableado.

Galgas de gran longitud. Permiten determinar el valor medio de la deformación a lo largo de la rejilla de la galga. Son útiles para mediciones en materiales heterogéneos, como el hormigón.



Galgas sin soporte. Consisten solamente en la rejilla soportada por una cinta adhesiva provisional. Se encolan mediante cementos cerámicos y permiten realizar medidas en temperaturas de hasta unos 800°C.

Rosetas. Pueden estar constituidas por 2, 3 o 4 galgas sobre un mismo soporte, siendo las galgas de características muy semejantes entre sí. Las de 2 galgas se utilizan cuando se conocen las direcciones principales, las de 3 cuando se desconocen y las de 4 cuando se desea obtener un dato más, previendo la posibilidad de fallo de una de las galgas de una roseta tridimensional.

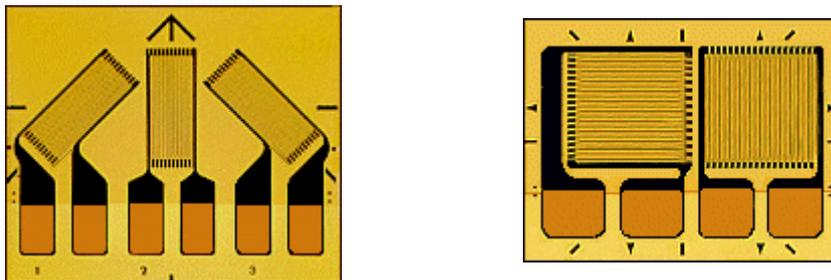


Figura 2.3: Rosetas 3D (izda) y 2D (dcha)

Galgas miniatura. La longitud de la rejilla puede ser de 0.2 mm. Se utilizan para casos de concentración de tensiones, de fuertes gradientes de tensión, o bien para fenómenos muy rápidos, Galgas para medición de tensiones residuales. Consisten en una roseta de tres direcciones montada sobre un soporte circular con una precisa inclinación del centro.

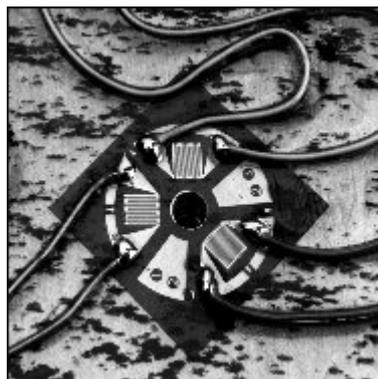


Figura 2.4: galga para medición de tensiones residuales

Esta inclinación sirve para orientar un taladro que se realiza en el centro de la galga, una vez colocada y conectada. Al realizarse el taladro, se liberan las tensiones residuales que pudiera tener el material. Dichas galgas permiten, por tanto, la medición de tensiones residuales.



2.5 Efectos de la temperatura

Una galga encolada sufre variaciones de resistencia debidas a efectos térmicos sobre la propia galga y dilataciones del material sobre el que está encolada. Estas dilataciones del material pueden alcanzar fácilmente los órdenes de magnitud de la deformación a medir. Una posible solución de este problema consiste en utilizar una galga idéntica a la de medida, que, colocada sobre un trozo del mismo material sometido a las mismas variaciones de temperatura permite, mediante una conexión adecuada de ambas galgas, eliminar la componente debida a la variación de temperatura. Esta segunda galga se suele llamar de compensación o galga testimonio “Dummy Gauge”.

2.6 Elección del tipo de galga

Para la elección de un determinado tipo de galga inciden, principalmente, los siguientes factores:

- Tipo de información que se desea obtener de las mediciones
- Material sobre el que se desea medir
- Lugar de colocación
- Condiciones y tipo de ensayo

2.6.1 Tipo de información que se desea obtener de las mediciones

Este factor incide directamente en la forma de la galga.

Para la medida de deformación en una sola dirección, lo que es nuestro caso, usaremos galgas unidireccionales.

2.6.2 Material sobre que se desea medir

El material sobre el que se desean hacer las medidas nos dará otro dato sobre el tipo de galga a emplear.

Como se vio en el apartado 2.5, los efectos de la temperatura son factores a tener en cuenta a la hora de hacer mediciones y casi todas las galgas extensométricas están compensadas para ciertos márgenes de temperatura; esta compensación, como se vio, trata de anular los efectos de temperatura debidos a las dilataciones de los materiales. Es, por tanto, necesario elegir una galga que esté compensada para un coeficiente de dilatación térmica igual que el del material al que se va a pegar, o, en su defecto, el más próximo posible.



2.6.3 Lugar de colocación

El lugar de colocación de la galga está relacionado directamente con los siguientes parámetros: tamaño de la rejilla y soporte, disposición y forma de los terminales, resistencia eléctrica de la galga y tipo de soporte.

Escogida la forma de la galga, debemos escoger su tamaño, pues es común en todos los fabricantes hacer la misma forma en varios tamaños; para la elección observaremos que, dado que la galga es un elemento de dimensiones pequeñas, será tanto más manejable cuanto mayor sea. Pero este tamaño vendrá condicionado por el espacio disponible físicamente para su colocación y, además, por el gradiente de tensiones existentes en el lugar de colocación, ya que la galga mide el promedio de valores de deformación, luego, existiendo un gradiente de tensiones fuerte, elegiremos una de tamaño pequeño.

La accesibilidad al lugar de colocación y la facilidad de soldar en él, harán que se elijan diferentes disposiciones de terminales, así como galgas con filamentos soldados, o bien encapsulados con protector y cableado incluido.

2.6.4 Condiciones y tipo de ensayo

Las condiciones de ensayo inciden en cuanto que la galga extensométrica ha de ser capaz de sobrevivir a dichas condiciones.

La temperatura condiciona el tipo de soporte; cada fabricante da para sus bandas la temperatura de compensación y la temperatura máxima, básicamente quien impone esta temperatura máxima es el soporte de la galga.

En cuanto al tipo de ensayo, estático o dinámico, los fabricantes recomiendan también sus galgas para cada uno de ellos, dando para el caso estático deformación máxima de la galga y en el caso dinámico, el número de ciclos superado para una cierta amplitud de deformación.

En el caso estático, la deformación máxima condiciona principalmente al soporte de la galga. Para deformaciones grandes (4 a 10%), son aconsejables los soportes de poliamida y celulosa; para deformaciones del orden de 1 a 2%, epoxi. Estos datos son meramente indicativos y hay que atenerse a las indicaciones de los fabricantes.



En el caso dinámico, el número de ciclos superado condiciona principalmente el material de la rejilla. A continuación se da una ordenación de mayor a menor en cuanto a resistencia a la fatiga de los materiales más usuales empleados en la construcción de rejillas:

Elinvar

Ni-Chrome

Constantan

2.7 Elección de la cola

La cola es uno de los componentes que más influye en la exactitud de las mediciones extensométricas. En principio, y para casos “normales” de análisis de tensiones, darán resultados correctos las colas rápidas de un solo componente, tipo cianoacrilato. Este tipo de colas tiene la ventaja de la simplicidad y rapidez de aplicación. Sin embargo, si se exigen niveles de precisión altos en las medidas, convendrá pensar en la utilización de colas de dos componentes de curado en caliente. Lo mismo ocurre en caso de tenerse que realizar medidas a temperaturas más altas que el ambiente; para temperaturas por encima de 50-60°C es recomendable el uso de estas colas de dos componentes. Lógicamente, su utilización exigirá la aplicación de un sistema de presionado de la galga y un sistema de calefacción, o bien en estufa, caso de piezas pequeñas, o bien mediante lámparas de infrarrojos o incluso estufas de gas o eléctricas, que permiten un calentamiento local importante. Los ciclos de curado se harán según indicación del fabricante y siempre con temperaturas 30°C más altas que la temperatura de ensayo.

2.8 Conexiones de las galgas

2.8.1 Puente de Wheatstone

En anteriores capítulos se ha visto como las galgas permiten convertir el delicado problema de medición de tensiones en el problema de medición de variaciones de resistencia. Veamos cómo se puede resolver este último. El método, generalmente utilizado, es el puente de Wheatstone, inventado por el físico inglés Charles Wheatstone en 1843.

El esquema básico aparece en la figura 2.5.



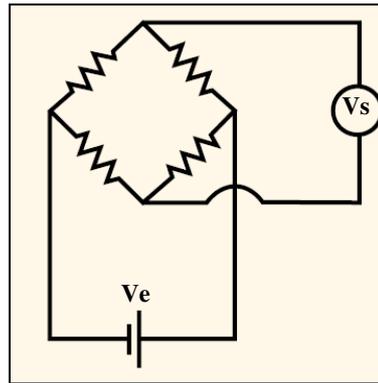


Figura 2.5: Puente de Wheatstone

Entre los 2 puntos 2 y 3 se aplica una tensión V_E continua o alterna, pero de valor constante en el tiempo. Se puede demostrar fácilmente, mediante las leyes de Ohm y de Kirchoff, que la tensión de salida V_S valdrá, en función de las resistencias de las cuatro galgas:

$$V_S = V_E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (2-1)$$

Si $R_1/R_2 = R_3/R_4$, se tendrá $V_S = 0$. También sucede esto en el caso de que sean $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$. En el caso de las galgas extensométricas, aunque los valores de resistencia son muy parecidos entre sí, no son rigurosamente iguales, con lo cual se tiene una V_S de valor pequeño.

Si las resistencias varían (siendo inicialmente aproximadamente iguales entre sí), variará también la tensión de salida V_S . Tendremos, por tanto:

$$\Delta V_S = \frac{V_E}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2-2)$$

ΔV_S será la variación de la tensión de salida del puente al variar en ΔR_1 , ΔR_2 , ΔR_3 y ΔR_4 las galgas R_1 , R_2 , R_3 y R_4 , respectivamente. Si sólo varía la resistencia de una galga, la R_1 por ejemplo, tendremos:

$$\Delta V_S = \frac{V_E}{4} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (2-3)$$

Obsérvese que el ΔV_S es proporcional a $\Delta R_1/R_1$. Recordemos que se había visto que en una galga:



$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{\Delta l}{l} = K \cdot \varepsilon \quad (2-4)$$

Sustituyendo esta expresión en la anterior, tenemos:

$$\Delta V_s = \frac{V_E \cdot K}{4} \cdot \varepsilon_1 \quad (2-5)$$

Es decir, la variación de tensión de salida del puente ΔV_s es proporcional a la deformación sufrida por la galga ε_1 . Podemos, por tanto, graduar el “voltímetro” del puente en unidades de deformación y “olvidar” que por en medio existen una serie de procesos eléctricos.

2.8.2 Propiedades del puente de Wheatstone

En el caso de que se deformen las cuatro galgas del puente, la última expresión se convierte en:

$$\Delta V_s = \frac{V_E \cdot K}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (2-6)$$

Obsérvese los signos con que aparecen las deformaciones ε en la anterior expresión, ε_1 y ε_3 llevan un signo “+”, ε_2 y ε_4 un signo “-”. Este hecho es del mayor interés en las aplicaciones del puente de Wheatstone. Su significado es el siguiente: si una galga, en la que ε tiene un signo “+”, sufre un alargamiento, se producirá un ΔV_s positivo, en cambio, si el mismo alargamiento se produce en una que tiene un signo “-”, se producirá un ΔV_s negativo, una disminución. La figura 2.6 es un recordatorio útil de esta cuestión.

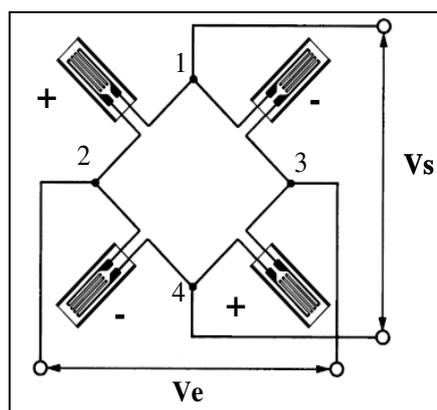


Figura 2.6

Una primera aplicación de lo dicho anteriormente se refiere a la compensación de temperaturas. Si se realizan mediciones con la galga R_1 del puente, manteniéndolas demás “inmóviles”, dicha galga registrará también las deformaciones debidas a cambios de temperatura, en pequeño grado si es



autocompensada. Para evitar este problema, una solución consiste en colocar una galga de signo contrario, usualmente la R_2 , en un elemento libre de tensiones mecánicas, del mismo material que en el que se está haciendo la medida, y situado de forma que sufra las mismas variaciones de temperatura.

Llamando ε_t a la deformación producida por la temperatura y ε_m a la producida por los efectos mecánicos, tendremos que la galga R_1 sufre una deformación:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_t + \varepsilon_m, \quad (2-7)$$

la R_2 ,

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_t; \quad (2-8)$$

ε_3 y ε_4 serán cero. Aplicando la expresión de la tensión de salida del puente y sustituyendo, tendremos:

$$\Delta V_s = \frac{V_E \cdot K}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) = \frac{V_E \cdot K}{4} (\varepsilon_t + \varepsilon_m - \varepsilon_t) = \frac{V_E \cdot K}{4} \cdot \varepsilon_m \quad (2-9)$$

Es decir, se han conseguido eliminar los efectos de temperatura.

A esta segunda galga se le llama galga testimonio o de compensación, “dummy gauge”.

2.8.3 Diferentes montajes en puente

Lo más usual en análisis de tensiones es emplear una sola galga para realizar la medida, pudiéndose recurrir o no a una galga de compensación.

A continuación se describen en detalle algunos de los diversos montajes usualmente empleados.

- Cuarto de puente

Se utiliza una sola galga. Las demás dispuestas en el interior del instrumento de medida.

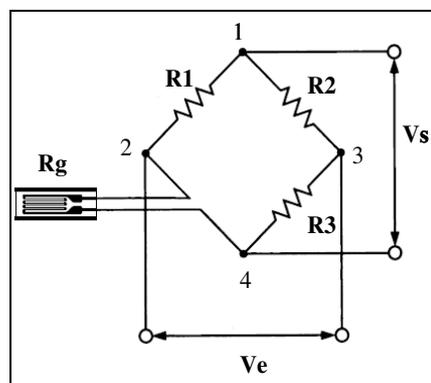


Figura 2.7: Montaje en cuarto de puente



- Medio puente

Este montaje da la diferencia entre las lecturas de dos galgas R_{g1} y R_{g2} . La galga R_{g1} es la que realiza la medida; la R_{g2} se colocará de forma que reciba cualquier influencia parásita en igual forma que la R_{g1} .

Dado que las galgas R_{g1} y R_{g2} están conectadas en ramas del puente de signo contrario, los efectos parásitos resultarán eliminados.

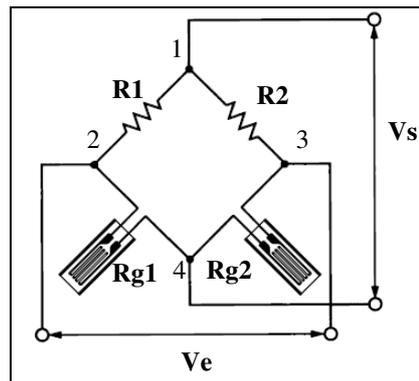


Figura 2.8: Montaje en medio puente

- Puente completo

En este montaje se utilizan las cuatro galgas del puente. La simetría del montaje es perfecta y se consigue eliminar en gran manera los efectos parásitos.

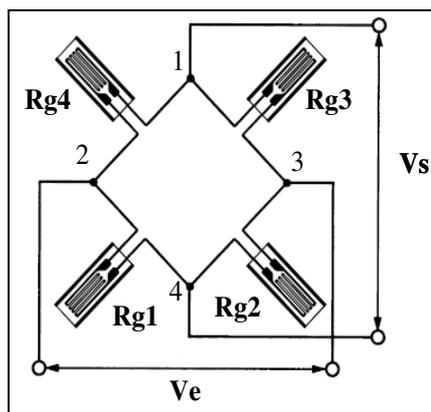


Figura 2.9: Montaje en puente completo



3- Materiales

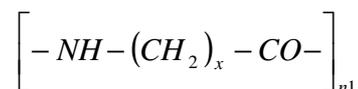


3.1 Poliamidas

Las poliamidas poseen buena resistencia mecánica, tenacidad y resistencia al impacto elevadas; tienen buen comportamiento al deslizamiento y buena resistencia al desgaste. Por ello, son apropiadas como plásticos de ingeniería para muchas aplicaciones técnicas. La masa fundida fluye con facilidad, lo cual permite piezas moldeadas de gran complejidad. Sin embargo, en el caso de las poliamidas hay que tener en cuenta que absorben y despiden humedad (de forma reversible), lo cual implica una alteración de sus propiedades.

Estructura:

Las poliamidas pueden estar compuestas por un solo elemento de partida (eslabón que se repite), por ejemplo la ϵ -caprolactama en el caso de la PA6. Se nombran con una cifra que indica el número de átomos de carbono del elemento de partida. Responden a la fórmula general siguiente:



Para la PA6 (x=5), PA11 (x=10) y PA12 (x=11).

Otras poliamidas se componen de dos elementos distintos de partida (eslabones), que por policondensación dan lugar a grupos dentro de la cadena. En este caso se nombran indicando el número de átomos de carbono de ambos elementos; primero se indican los átomos de carbono de la diamina, 6 ó 4, y luego los de carbono del componente ácido. Responden a la fórmula general:



Entre ellas están la PA66 (y=4), la PA610 (y=8) y la PA612 (y=10). La PA6-3-T no se enmarca en este esquema.

Nombres comerciales de la poliamida 6 (ejemplos):

Akulon (DSM); Bergamid B (Bergmann); Durethan B (Bayer); Fabenyl, Grilon (Ems); Latamid (Lati); Maranyl F (ICI); Miramid (LWU/piel); Nylatron (Polypenco); Orgamide (ATO); Renyl, Pernil (Mont); Technyl C (Rhodia); Ultramid B (BASF); Verafil (Ciba).



3.1.1 Propiedades

La densidad de la poliamida 6 es de 1.12 a 1.14 g/cm³ [2].

Las poliamidas son polímeros termoplásticos semicristalinos con una cristalinidad inferior al 60%. La cristalización es mejor con agentes nucleizadores, lográndose estructura esferulítica fina. Según los tipos (en especial la PA6 y la PA66), la absorción de humedad puede ser intensa; más en las zonas amorfas que en las cristalinas.

Los materiales mas empleados para reforzar o cargar las poliamidas son: las fibras de vidrio, incluso largas, las fibras de carbono, esferillas de vidrio, cargas minerales, creta, lubricantes como el MoS₂ y el grafito.

La poliamida tiene un color natural lechoso opaco pero se puede colorear en cualquier tono opaco.

Sus propiedades mecánicas dependen del tipo de poliamida, de la cristalinidad y del contenido en agua. Si aumenta la cristalinidad, se hacen rígidas y duras; después de haber absorbido agua, son muy tenaces. Si se someten a estiraje, se aumenta la resistencia (cables, bandas). Tienen una gran resistencia a la fatiga, una buena resistencia al impacto normal y con probeta entallada. También son resistentes a la abrasión y tienen un buen comportamiento al deslizamiento, que se mejora con adición de MoS₂, PTFE o grafito. La resistencia mecánica y el módulo de elasticidad se mejoran con fibras de vidrio o de carbono, con lo cual se reduce la contracción y se mejora la resistencia a la deformación por calor.

Las propiedades eléctricas de las poliamidas dependen del contenido en agua. Su buena resistencia superficial impide en gran parte las cargas electrostáticas. No son apropiadas para aislamiento en la región de altas frecuencias, por sus pérdidas dieléctricas, debidas a la polaridad; es posible su uso en la región de bajas frecuencias. Tienen buena resistencia a las corrientes de fuga.

La temperatura máxima de uso, según tipos, oscila de 80 a 120°C; por breve tiempo, puede alcanzar hasta 140°C; en tipos reforzados con fibra de vidrio puede ser incluso más alta, al igual que la PA46 que resiste hasta 130°C a largo plazo. La mayoría resisten el agua hirviendo y se pueden esterilizar. La temperatura mínima de uso alcanza hasta -40°C.



La zona de fusión de la poliamida 6 es de 215 a 225°C.

Las poliamidas arden con llama azulada y aureola amarilla, gotean chisporroteando, dan lugar a filamentos. Algunas son autoextinguibles; se mejoran con ignifugación. Su resistencia a la deformación por calor es mejor con estabilizadores al calor.

Las poliamidas son resistentes a hidrocarburos alifáticos y aromáticos, gasolina, aceites, grasas, algunos alcoholes, ésteres, cetonas, éteres, muchos hidrocarburos clorados, álcalis débiles. Las que tienen una cristalinidad elevada tienen mayor resistencia. Los tipos estabilizados al efecto son resistentes al envejecimiento y a la intemperie, punto importante en piezas de pared delgada.

No resisten a los ácidos inorgánicos, álcalis fuertes, soluciones de compuestos oxidantes, ácido fórmico, fenoles, cresoles, glicoles, cloroformo.

Bajo la acción prolongada del calor, el contacto con alimentos acuosos puede ser nocivo (a excepción de la PA11 y PA12). Los tipos que contienen plastificantes no son aptos para aplicaciones alimentarias.

Las poliamidas tienen la capacidad de absorber agua. Es un proceso lento en clima normal. Las varillas planas de poliamida 6 mantenidas en clima normal 23/50 durante 4 meses alcanzan un contenido de agua del 2,3% (todavía sin saturar). Las piezas inyectadas, secas, normalmente se acondicionan por ejemplo por inmersión en agua, para que alcancen el nivel de agua que necesitan para el uso.

Influencia del contenido en agua y de la cristalinidad sobre las propiedades de las poliamidas:

Propiedades	Si aumenta el contenido de agua	Si aumenta la cristalinidad
Módulo de elasticidad	Disminuye	Aumenta
Tensión de estiraje	Disminuye	Aumenta
Resistencia al impacto	Aumenta	Disminuye
Alargamiento a la rotura	Aumenta	Disminuye
Aislamiento eléctrico	Disminuye	---
Constante dieléctrica	Aumenta	Disminuye
Tendencia a absorber agua	---	Disminuye
Resistencia química	---	Aumenta
Transmisión de la luz	---	Disminuye



3.1.2 Ejemplos de aplicación

Maquinaria, mecánica fina: ruedas dentadas, poleas de transmisión, elementos de embrague, discos de maniobra, discos de levas, rodillos, jaulas para rodamientos de cilindros, rodamientos de fricción, hélices, cadenas de transporte, juntas, recubrimientos.

Automoción: aspas de ventilador, filtros de aceite, piñón de ataque (accionamiento); tubos de aspiración; cárter de aceite; boquillas para limpiaparabrisas, casquillo de cojinete, elementos de deslizamiento; piezas exteriores como carcasa de retrovisor, tapacubos, rejilla de radiador; hélices de barco; tuberías; cascos para motorista.

Electrotecnia: bobinas, enchufes, cajas de distribución, carcasas de motor, placas de cojinete, carcasas de herramientas eléctricas, aspiradores de polvo, linternas de mano, cubiertas de cable resistentes a la abrasión.

Material sanitario: carcasas de bombas, grifos de agua, grifos mezcladores.

Industria de la construcción y del mueble: herrajes, bisagras, pernios; plataformas para asiento y respaldos, incluso para uso exterior; cadenas de cierre; mueble de jardín con recubrimiento protector; tacos para pared; recubrimientos; regletas de aislamiento térmico para ventanas de aluminio.

Diversos: piezas encajables en juguetes didácticos; instrumental quirúrgico y materiales de costura; sedales; láminas de envasado, tripa sintética para envasar embutidos; fibras, cables, cerdas para brochas, bandas; cartuchos de correo neumático; piezas de fijación de esquí.

3.2 Material de refuerzo: la fibra de vidrio

Las fibras son los componentes resistentes en un material reforzado con ellas y definen la mayor parte de las características mecánicas del material, como la resistencia y la rigidez [3].

Las fibras pueden fabricarse a partir de varios materiales. Pueden citarse metales, boro o materias cerámicas, como el carburo de silicio (SiC), de muy elevada resistencia térmica.

Tanto el boro como el carburo de silicio dan fibras muy costosas y se emplean sólo en casos muy especiales. Para los plásticos reforzados se utilizan sólo fibras inorgánicas, como las de carbono o de vidrio, o bien sintéticas como las de aramida o de un polietileno de alta resistencia y rigidez.



La elevada resistencia de las fibras de vidrio es debida a los enlaces covalentes entre el silicio y los radicales oxígeno.

Los átomos integran una red tridimensional con estructura *amorfa*. Por esta razón, las fibras de vidrio poseen características *isotrópicas*.

Las de vidrio son las primeras fibras que han hallado una amplia aplicación como fibras de refuerzo. Están constituidas, en su mayor parte, por óxidos de silicio. El espectro de sus características puede modificarse mediante la mezcla con otros óxidos, como por ejemplo los de aluminio o magnesio.

Las fibras de vidrio se producen por medio de un proceso de hilado bajo fusión. El conjunto de los filamentos obtenidos se reúne formando una fibra.

La más difundida y utilizada en la mayor parte de aplicaciones es la fibra de vidrio E. La mayúscula E proviene de eléctrico, puesto que esta fibra fue desarrollada inicialmente para aplicaciones eléctricas. También se utiliza en muchas otras aplicaciones, para las que ofrece la ventaja de su reducido costo.

Mayor resistencia ofrecen los tipos de vidrio R y S. Estas iniciales corresponden a Resistance (francés) y Strength (inglés) respectivamente. Un tipo adicional de vidrio es el C, desarrollado para una buena resistencia química, de donde proviene la inicial C (Chemical).

En la tabla 3.1 se listan las características de las fibras de vidrio E y S.

	Densidad	Resistencia a la tracción	E	Alargamiento de rotura
Fibra de vidrio E	2,54 g/cm ³	3450 MPa	72,4 GPa	4,8%
Fibra de vidrio S	2,49 g/cm ³	4300 MPa	86,9 GPa	5,0%

Tabla 3.1: características de las fibras de vidrio E y S



3.3 Obtención de las probetas

La mayoría de las probetas necesarias a la realización del estudio se consiguieron mediante proceso de inyección mientras un tipo de probetas se obtuvo tras mecanización de unas placas inyectadas (*Figura 3.1*).

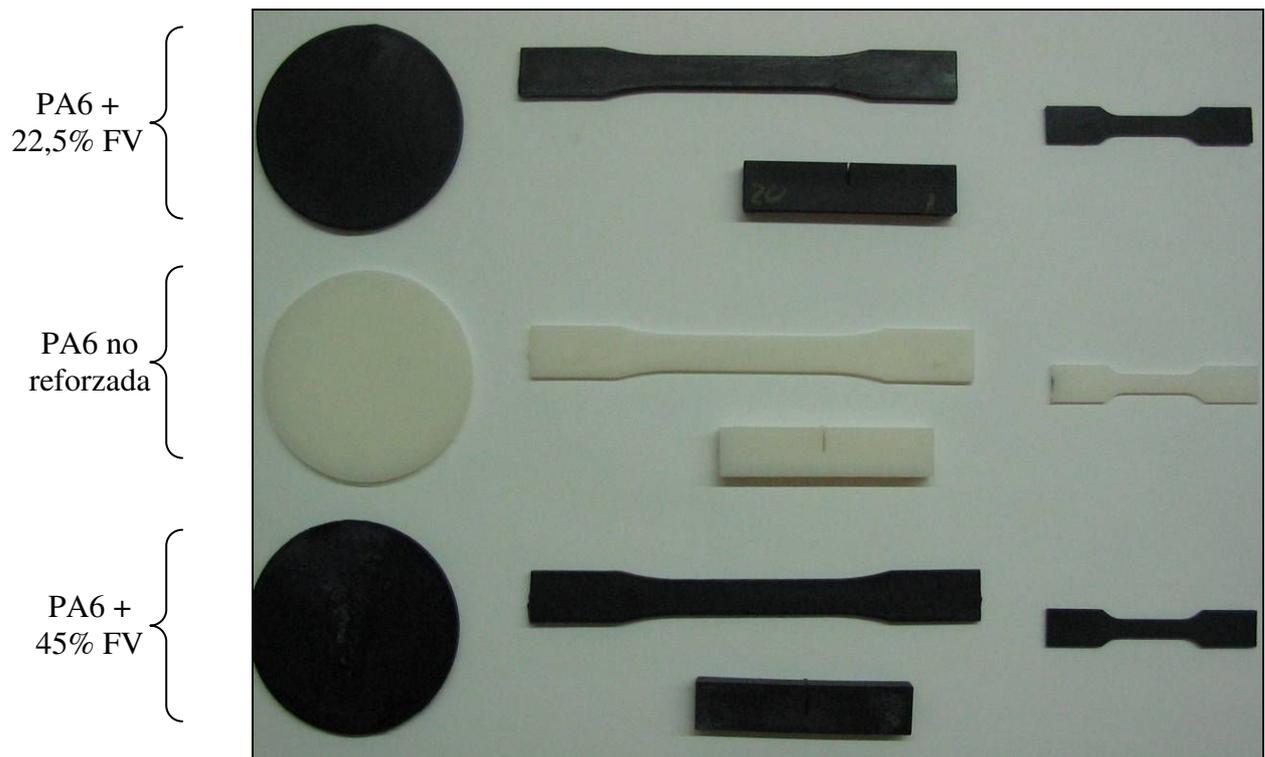


Figura 3.1: Probetas empleadas a lo largo del proyecto

3.3.1 Inyección

a. Preparación de las mezclas

La materia prima empleada para la obtención de las probetas es, por una parte, granza de poliamida 6 sin refuerzos (BASF Ultramid B3K) y por otra parte, granza de poliamida 6 reforzada con 45 por ciento de fibra de vidrio (Technyl C216 V45).

Mediante mezcla de un 50% en peso de poliamida 6 con un 50% de poliamida 6 reforzada con 45% de fibra de vidrio, se consigue un tercer tipo de granza: poliamida 6 reforzada con un 22,5% (teórico) de fibra de vidrio.



b. Secado del material

Dado que la poliamida 6 es muy sensible a la humedad, lo que afecta sus propiedades mecánicas y su procesabilidad, un secado preliminar de la granza es necesario antes de empezar el proceso de inyección. En efecto, si no se seca la poliamida, al inyectarla, el agua que contiene provoca la aparición de poros en las probetas. Obviamente, no se puede permitir que las probetas tengan esos defectos.

El secado del material se hace a 90°C durante 4h (*Figura 3.2*).



Figura 3.2: Deshumidificador

c. Composición de una inyectora

El moldeo por inyección es un proceso semicontinuo que consiste en inyectar el polímero en estado fundido en un molde cerrado refrigerado, a través de un orificio pequeño llamado compuerta. La pieza se solidifica en el molde.

Las partes más importantes de una inyectora son:

→ La unidad de inyección: es en origen una extrusora con un sólo husillo.

Contiene los siguientes componentes:



- La tolva: contiene la granza. Tiene un orificio que da al cilindro de inyección.
- El cilindro de inyección: está formado por un tornillo sin fin (husillo) con calentadores y sensores periféricos para mantener una temperatura programada constante. La plastificación, dosificación e inyección tienen lugar a lo largo de esta unidad. El husillo se compone de 3 zonas (*Figura 3.3*).

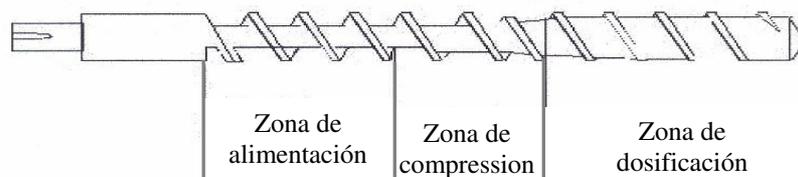


Figura 3.3: Zonas del husillo de una inyectora

Zona de alimentación: hace que la granza avance a la vez que lo va precalentando.

Zona de compresión: el espacio entre el husillo y el cilindro se va volviendo gradualmente más estrecho en esta sección. Por tanto, la materia precalentada se comprime a la vez que es calentada por las bandas calentadoras dispuestas alrededor del cilindro. Es en esta zona donde la materia se funde.

Zona de dosificación: aquí se mezcla y trabaja el fundido lo que permite conseguir uniformidad.

→ La unidad de cierre: su función es cerrar el molde con fuerza para que no se abra bajo el efecto de la presión de inyección, y expulsar la pieza del molde abriéndolo después que se haya solidificado el plástico.

Esta unidad contiene el plato fijo y el plato móvil: los platos de molde están montados sobre estos planos. El plato fijo en el lado de inyección está sujeto a la bancada mediante pernos. El plato móvil, guiado por barras, abre y cierra el molde. Está equipado con un expulsor hidráulico para desmoldar el producto moldeado.

→ El molde: es la parte más importante de la máquina de inyección, ya que es el espacio donde se genera la pieza; para producir un producto diferente, simplemente se cambia el molde, al ser una pieza intercambiable que se atornilla en la unidad de cierre.





Figura 3.4: Molde abierto

Las partes del molde son:

- La cavidad: es el volumen en el cual la pieza será moldeada.
- Los canales: son conductos a través de los cuales el polímero fundido fluye debido a la presión de inyección. El canal de alimentación se llena a través de la boquilla, los siguientes canales son los denominados bebederos y finalmente se encuentra la compuerta.
- Canales de enfriamiento: son canales por los cuales circula agua para regular la temperatura del molde. Su diseño es complejo y específico para cada pieza y molde, ya que de un correcto enfriamiento depende que la pieza no se deforme debido a contracciones irregulares.
- Barras expulsoras: al abrir el molde, estas barras expulsan la pieza moldeada fuera de la cavidad, pudiendo a veces contar con la ayuda de un robot para realizar esta operación. [4]



d. Ciclo de moldeo

En el ciclo de moldeo se distinguen 6 pasos principales:

- Molde cerrado y vacío. La unidad de inyección carga material y se llena de polímero fundido.
- Se inyecta el polímero abriéndose la válvula y con el husillo que actúa como un pistón se hace pasar el material a través de la boquilla hacia las cavidades del molde.
- La presión se mantiene constante para lograr que la pieza tenga las dimensiones adecuadas, pues al enfriarse tiende a contraerse.
- La presión se elimina. La válvula se cierra y el husillo gira para cargar material, al girar también retrocede (*Figura 3.5*).
- La pieza en el molde termina de enfriarse (este tiempo es el más caro pues es largo e interrumpe el proceso continuo), la prensa libera la presión y el molde se abre, las barras expulsan la parte moldeada fuera de la cavidad.
- La unidad de cierre vuelve a cerrar el molde y el ciclo puede reiniciarse.

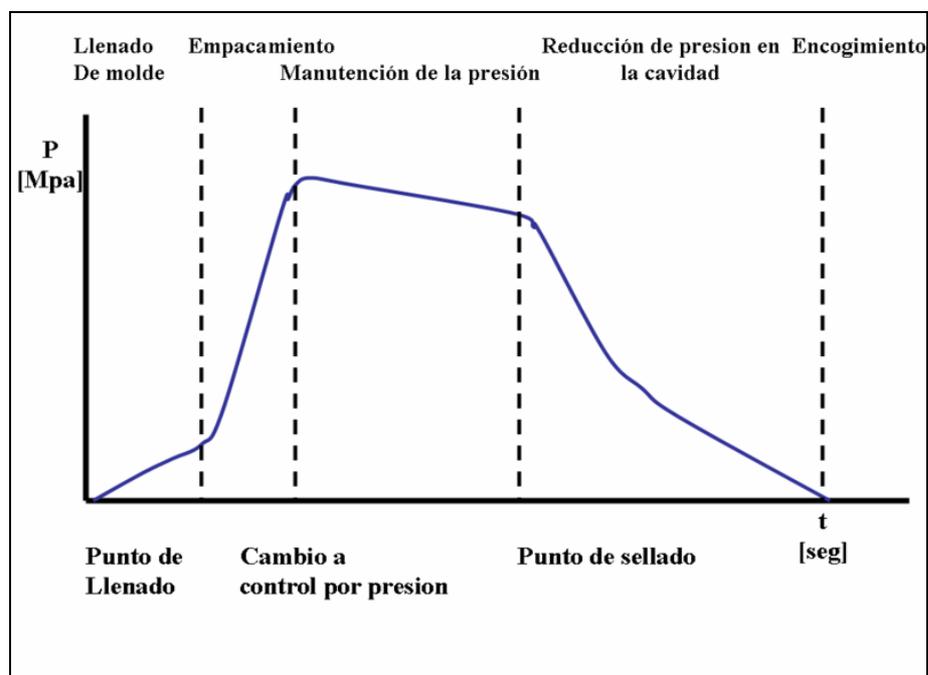


Figura 3.5: Variación de la presión durante un ciclo de inyección

Los procesos de inyección se hicieron con la inyectora Meteor 440/90 de MATEU & SOLÉ de 90 toneladas de fuerza de cierre (*Figura 3.6*). Los parámetros de inyección se encuentran en la tabla 3.2.





Figura 3.6: Inyectora MATEU SOLE Meteor 440/90

PA6 no reforzada				
Temperaturas	Boquilla	Zona 3	Zona 2	Alimentación
	270°C	260°C	250°C	240°C
Temperatura molde 60°C		Presión de inyección 50 bares	Presión de mantenimiento 55 bares	
PA6 + 22,5% FV				
Temperaturas	Boquilla	Zona 3	Zona 2	Alimentación
	280°C	270°C	260°C	250°C
Temperatura molde 60°C		Presión de inyección 50 bares	Presión de mantenimiento 55 bares	
PA6 + 45% FV				
Temperaturas	Boquilla	Zona 3	Zona 2	Alimentación
	280°C	270°C	260°C	250°C
Temperatura molde 60°C		Presión de inyección 50 bares	Presión de mantenimiento 55 bares	

Tabla 3.2: Parámetros de inyección utilizados



3.3.2 Mecanización

Otro método para fabricar probetas de ensayo es mediante mecanizado: se inyectan placas de 2mm de espesor dentro de las cuales se cortan con un robot fresador 2 probetas por placas.

Para esto, primero se diseña el perfil de la probeta a cortar con el programa Galaad. Luego, la información llega al Charlyrobot y este último ejecuta el corte. Hay que tener cuidado con la velocidad de corte ya que si es demasiada alta, se funde el material y se crea una pelota de plástico alrededor de la herramienta, la cual daña la probeta debido al rozamiento.

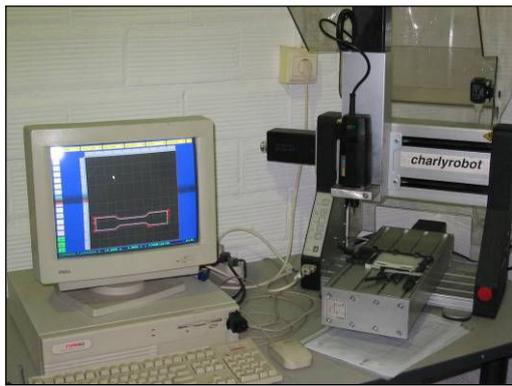


Figura 3.7: Mecanización de una probeta con el Charlyrobot

Así se consiguen 2 tipos de probetas: las longitudinales y las transversales. En efecto, según donde se sitúa el punto de inyección en la placa, las fibras tendrán una orientación preferencial si las probetas se cortan en un sentido u otro (*Figura 3.8*).



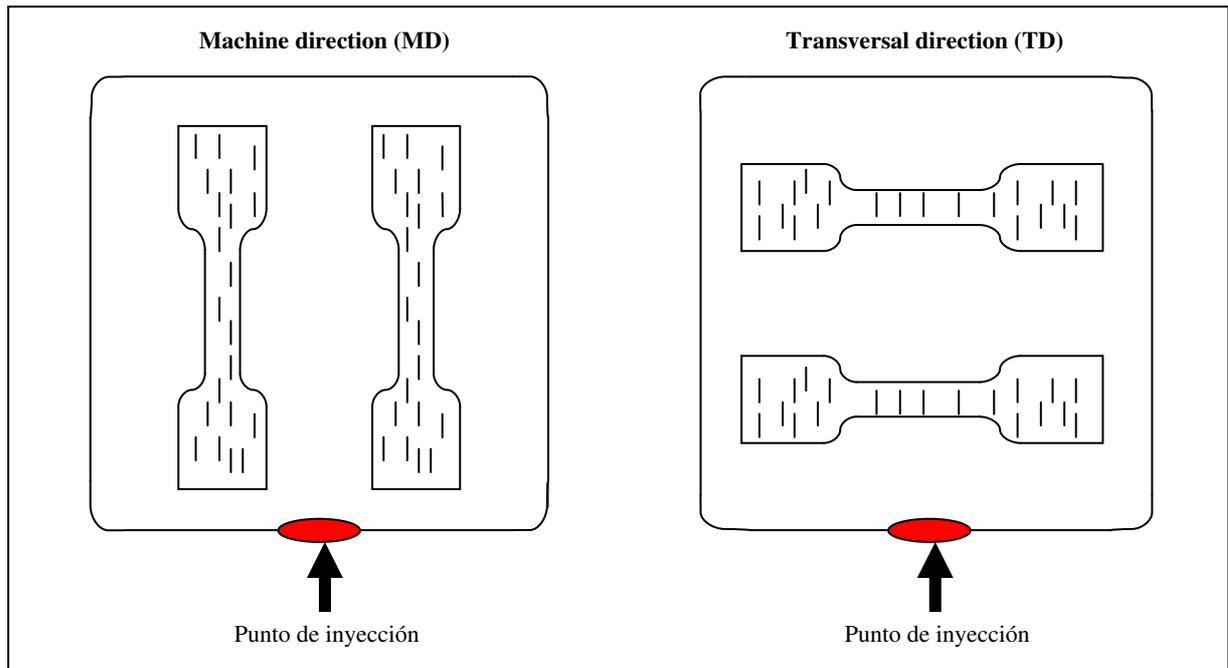


Figura 3.8: Orientación de las probetas: longitudinal (izquierda), transversal (derecha)

Una vez cortadas las probetas, se limpian y se quitan las rebabas.

Para poder trabajar con las probetas de poliamidas, hay que esperar que recuperen la humedad perdida durante el proceso de secado. Para acelerar esa recuperación de humedad, colocamos las probetas en un medio húmedo (estufa a 70°C conteniendo un recipiente de agua) durante 10 horas aproximadamente.



4- Modelos



En este capítulo, se describen los diferentes modelos matemáticos utilizados para poder determinar el módulo de Young de un material sometido a un ensayo de impacto. Estos modelos fueron desarrollados por alumnos del CCP en el cuadro de sus tesis doctorales [5] [6] y se basan en la asociación de elementos muelle + amortiguador. Se sabe que existen modelos diferentes para poder describir la respuesta de un material a un tipo de ensayo, pero, ya que los que desarrollaron esos modelos hicieron un inventario de todas las combinaciones posibles, nos centraremos solamente en los modelos que mejor resultados dan.

4.1 Indentación: modelo no conservativo serie

4.1.1 Desarrollo del modelo

Para poder desarrollar un modelo que nos permita describir el comportamiento de una probeta sometida a un ensayo de indentación por impacto, hay que tener en cuenta los mecanismos presentes en el material durante el impacto. Un modelo simple que tenga en cuenta las pérdidas de energía ha de estar constituido por una masa, un muelle y un amortiguador. En el modelo serie se toman en consideración las deformaciones permanentes que se producen en las probetas indentadas. Dado que la energía consumida en una deformación no elástica es función de los diversos mecanismos presentes, es conveniente agruparlos todos en un solo elemento, el cual puede ser representado mecánicamente por un amortiguador.

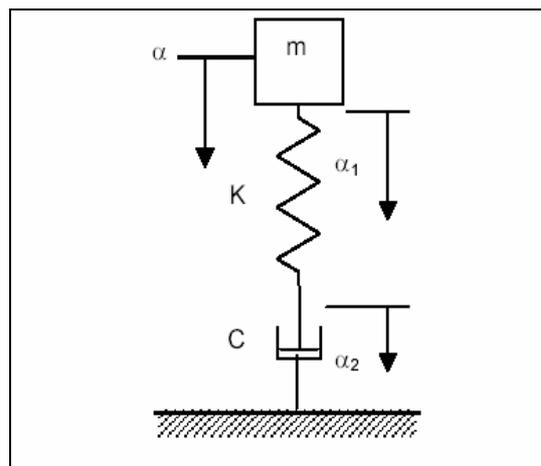


Figura 4.1: Modelo de indentación serie no conservativo

Resultados obtenidos por *Rayleigh (1906)* muestran que si el tiempo del contacto, entre el impactor y la probeta, es muy largo en comparación con su período natural, las vibraciones del sistema pueden ser despreciadas. Por tanto, puede asumirse la ley de *Hertz (1881 y 1895)*:



$$F_{K_i} = K_i \alpha_1^{3/2} \quad (4-1)$$

Podemos asumir que el elemento amortiguador tiene un comportamiento lineal, de tal forma que podemos describirlo con la expresión:

$$F_{C_i} = C_i \dot{\alpha}_2 \quad (4-2)$$

Donde:

$$K_i = \frac{4E_i \sqrt{R}}{3(1-\nu^2)} \quad (4-3)$$

F_{K_i} es la fuerza de reacción del muelle

F_{C_i} es la fuerza de reacción del amortiguador

K_i es la constante del muelle

C_i es la constante de amortiguamiento

α_1 es el desplazamiento del muelle

$\dot{\alpha}_2$ es la velocidad a la que se produce la deformación no elástica durante el impacto.

Al ser una disposición en serie, la fuerza aplicada es la misma para todos los elementos, por lo tanto tenemos que:

$$F_m = -F_{K_i} = -F_{C_i} \quad (4-4)$$

Aplicando la segunda ley de Newton al sistema, conseguimos la ecuación siguiente:

$$m \ddot{\alpha} + mg = F_m = -K_i \alpha_1^{3/2} = -C_i \dot{\alpha}_2 \quad (4-5)$$

El desplazamiento total del sistema corresponde a la suma de los desplazamientos del muelle y del amortiguador, lo que se puede expresar como:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (4-6)$$

Este sistema de ecuaciones (4-5 y 4-6) describe el comportamiento general del modelo planteado. Dada la diferencia en las magnitudes de los valores de cada término de la ecuación 4-5, el término gravitatorio se puede obviar ya que su efecto es despreciable.



4.1.2 Resolución numérica

Teniendo el elemento resorte un comportamiento no lineal, la ecuación diferencial 4-5 no tiene una solución analítica. No obstante se puede encontrar una función de tipo numérico que sea solución de la misma.

Los métodos numéricos basan su funcionamiento en algoritmos para efectuar cálculos iterativos tomando en referencia un punto inicial con condiciones y valores conocidos. El método empleado es el método numérico de Runge-Kutta de 4° orden, lo cual permite encontrar una función numérica solución de nuestro sistema en un intervalo extendido.

El método de Runge-Kutta se basa en el cálculo de pendientes entre 1 punto conocido y aquél que se pretende conocer. De estructura similar a los métodos de Euler y Euler-Gauss, hace uso de los primeros términos de la serie de Taylor. Esto hace que sea factible la programación del mismo y por medio de un ordenador poder calcular la solución con una alta densidad de puntos. En nuestro caso, al tener la ecuación diferencial más de 1 variable y sus derivadas, es necesario expresar el modelo como un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias que nos permitan el cálculo de las diferentes variables.

Al separar la ecuación 4-5 y tomando en cuenta la observación previa de despreciar el término gravitatorio se obtiene que:

$$\ddot{\alpha} = -\frac{K_i}{m} \alpha_1^{3/2} \quad (4-7)$$

y

$$\dot{\alpha}_2 = \frac{K_i}{C_i} \alpha_1^{3/2} \quad (4-8)$$

A partir de la ecuación 4-6 obtenemos:

$$\alpha_1 = \alpha - \alpha_2 \quad (4-9)$$

por lo que al combinar la ecuación 4.64 con 4.62 y 4.63 tenemos:

$$\ddot{\alpha} = -\frac{K_i}{m} (\alpha - \alpha_2)^{3/2} \quad (4-10)$$

$$\dot{\alpha}_2 = \frac{K_i}{C_i} (\alpha - \alpha_2)^{3/2} \quad (4-11)$$

Se puede ver que estas 2 ecuaciones permiten involucrar los efectos másicos, elásticos y de pérdida de energía. Sin embargo, la presencia de 3 derivadas (2 explícitas y una tercera que no aparece) hace necesario disponer de 1 tercera ecuación. De esta forma además del par anterior definimos:



$$\dot{\alpha} = \frac{d\alpha}{dt} \quad (4-12)$$

Para poder programar el método es necesario expresar las ecuaciones de forma apropiada, de esta forma el sistema que nos queda es:

$$f_1 = -\frac{K_i}{m}(\alpha - \alpha_2)^{3/2} \quad (4-13)$$

$$f_2 = \frac{K_i}{C_i}(\alpha - \alpha_2)^{3/2} \quad (4-14)$$

$$f_3 = \dot{\alpha} \quad (4-15)$$

Con estas 3 ecuaciones se desarrolló el algoritmo y fue programado en Excel por la facilidad que da este programa para el manejo de tablas de datos y cálculo dinámico, así como por su conveniencia para visualizar las diferentes variables y resultados. En su programación se usó un intervalo de 1.5 μ s entre cada punto calculado. En este sentido, el intervalo del mismo orden de magnitud que la frecuencia de adquisición de datos utilizadas en los experimentos.

Para el funcionamiento del algoritmo, es necesario dar una serie de valor iniciales, que en general son:

Velocidad del impacto ($\dot{\alpha}_{t=0} = v_0$)

Velocidad de deformación no elástica (elemento amortiguador; $\dot{\alpha}_{2;t=0} = 0$)

La aceleración del elemento másico ($\ddot{\alpha} = 0$)

Como parámetros del modelo se tienen la masa del impactor (m) y las constantes K_i (relacionada con la parte elástica) y C_i (relacionada con la pérdida de energía y por ello con el coeficiente de restitución). Más adelante se verá que para el ajuste del modelo a los valores experimentales se variarán estos 2 últimos parámetros. En la figura 4.2 se puede visualizar el gráfico de una función numérica que se genera al ejecutar el programa. La curva es una cuasisenoide atenuada, y se puede apreciar cierta asimetría ocasionada por el elemento amortiguador.



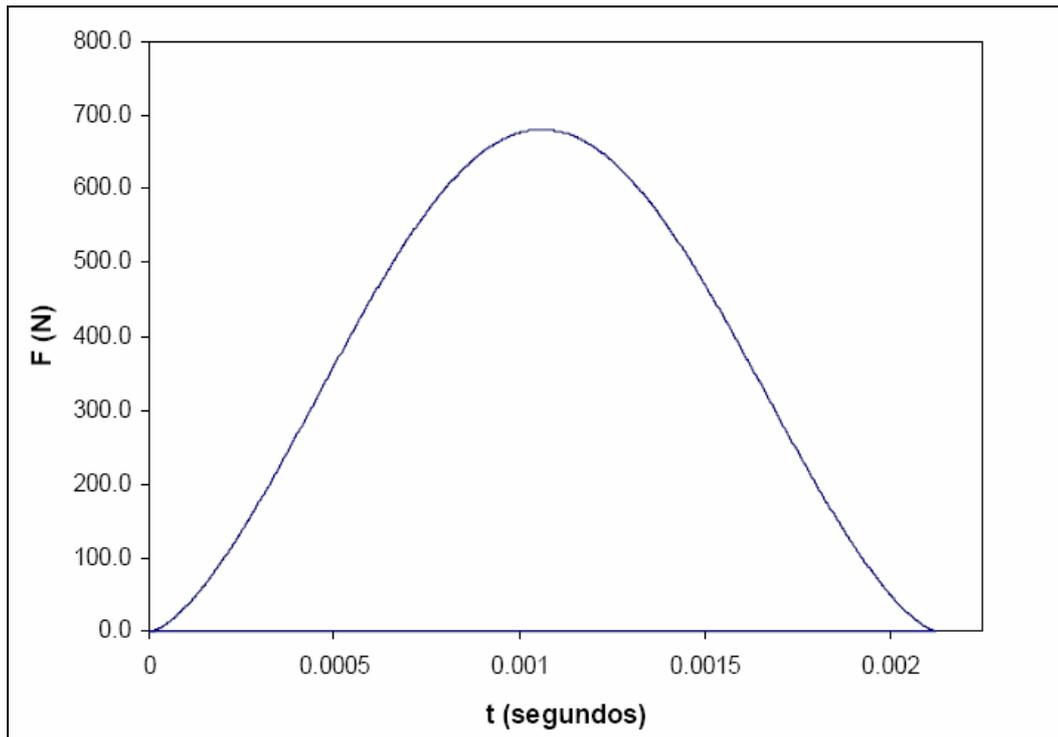


Figura 4.2: Solución numérica para el modelo de indentación no conservativo serie

4.1.3 Validación del modelo

Para asegurarse de la validez del modelo, hemos de ver los efectos de las variaciones de los distintos parámetros sobre la curva generada. Dichos efectos deben de estar coherentes con lo que se cabe esperar experimentalmente.

En la figura 4.3, se muestran la variación del comportamiento del modelo cuando se varía K_i mediante el módulo de indentación (ver ecuación 4-3) manteniendo todos los otros parámetros constantes. Se aprecia que cuando se incrementa el módulo, la fuerza máxima va aumentando mientras el tiempo de contacto disminuye.

En la figura 4.4 se grafican las variaciones de la fuerza máxima y del tiempo de contacto en función del módulo de indentación. Se nota que la variación de ambos parámetros no es lineal e incluso se aprecia una cierta tendencia a ser asintotas en valores muy altos del módulo. Por otro lado, para valores muy bajos del módulo, el tiempo de contacto tiende a hacerse infinito y la fuerza máxima se hace nula, lo cual es físicamente coherente.



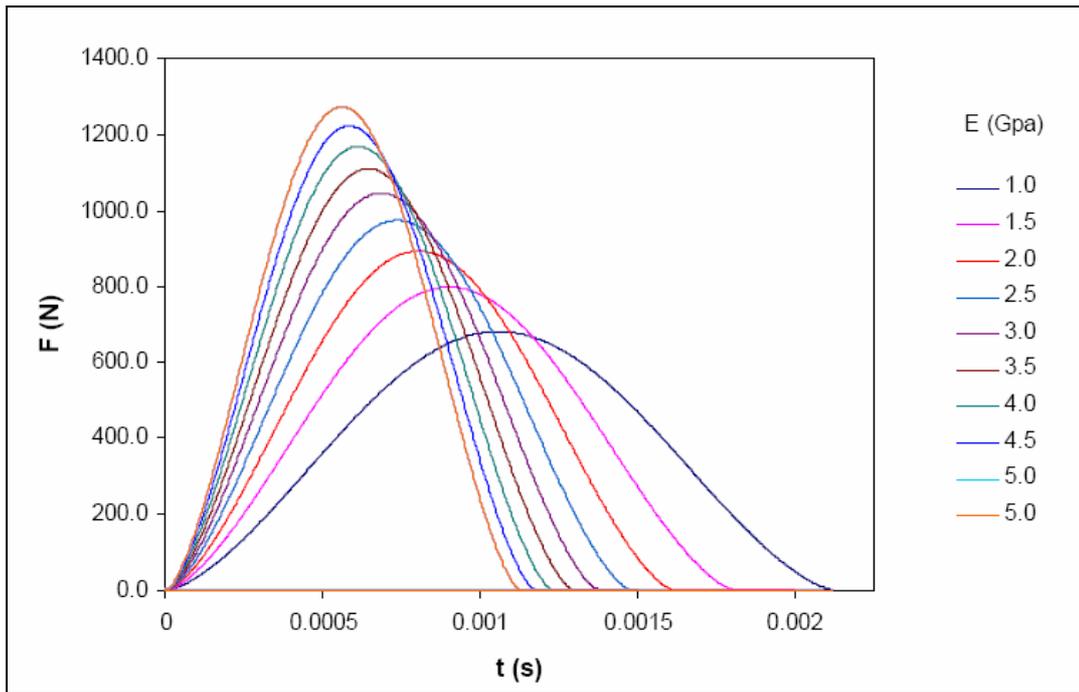


Figura 4.3: Variación del comportamiento de la fuerza con diferentes módulos de elasticidad, modelo de indentación serie

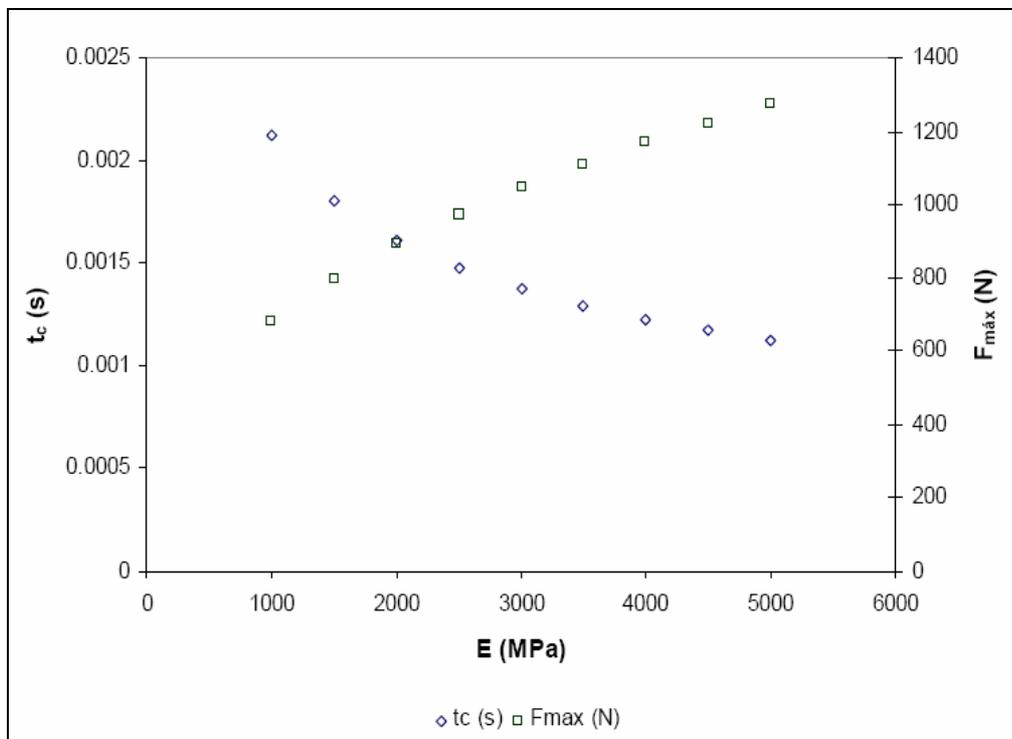


Figura 4.4: Variación de la fuerza máxima y del tiempo de contacto en función del módulo de elasticidad, modelo indentación serie



Si ahora hacemos variar el coeficiente de amortiguación C_i manteniendo los otros parámetros constantes, podemos ver en la figura 4.5 como se comporta el modelo.

A bajos valores de C_i se incrementa la asimetría de la curva con la presencia de colas más alargadas, reflejando de esta forma la deformación permanente del sistema.

Hemos de notar que cuando el valor de C_i se incrementa, la variación de la forma de la curva no es tan evidente lo cual aproxima al modelo a un sistema conservativo ya que las deformaciones permanentes que se esperan en el elemento amortiguador serán mínimas, lo que representaría a materiales altamente elásticos.

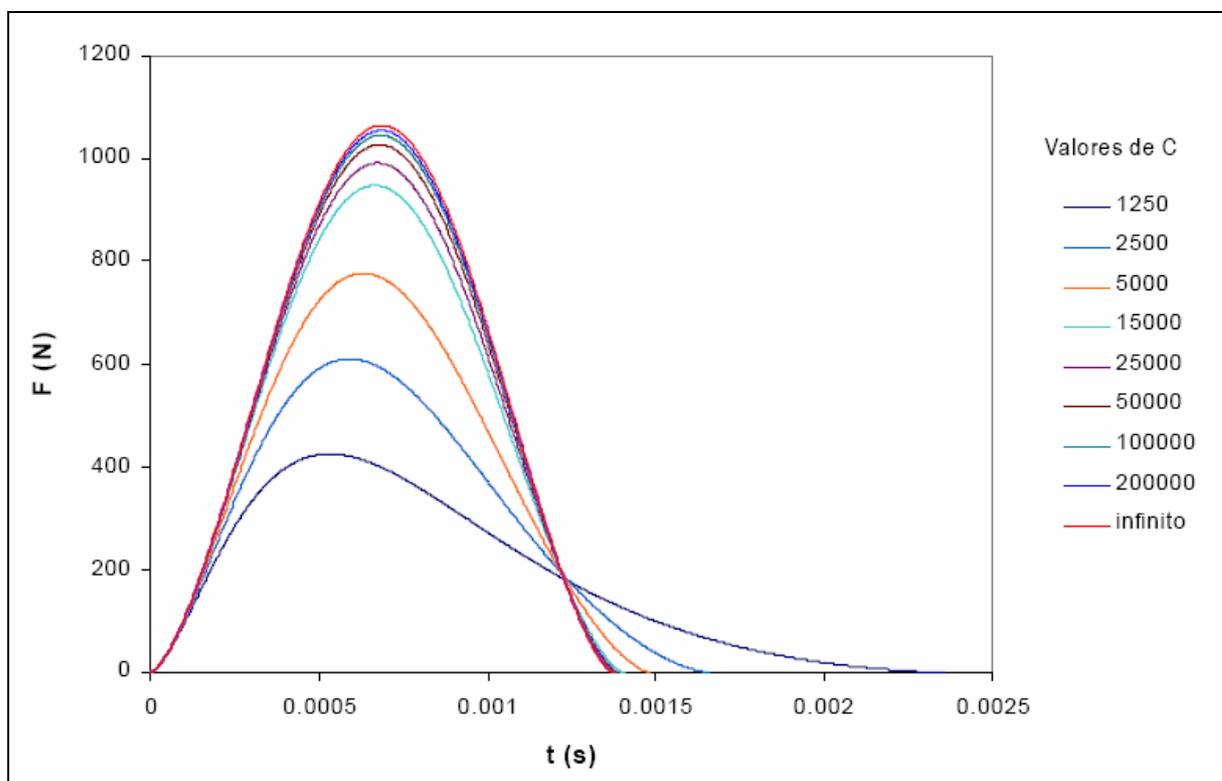


Figura 4.5: Variación del comportamiento de la fuerza con diferentes valores de C_i , modelo de indentación serie

En la figura 4.6 se puede apreciar que al disminuir el valor de C_i , la fuerza máxima disminuye mientras el tiempo de contacto no se incrementa significativamente, salvo en muy bajos valores de C_i . Se observa también que a altos valores de C_i , se tiene una variación casi nula del tiempo de contacto y de la fuerza máxima, por lo que el modelo estará gobernado principalmente por la componente elástica.



Para valores bajos de C_i , se acentúan las variaciones de t_c y F_{\max} . En este caso la componente plástica domina el comportamiento ya que el elemento amortiguador absorba y disipa la mayor cantidad de energía.

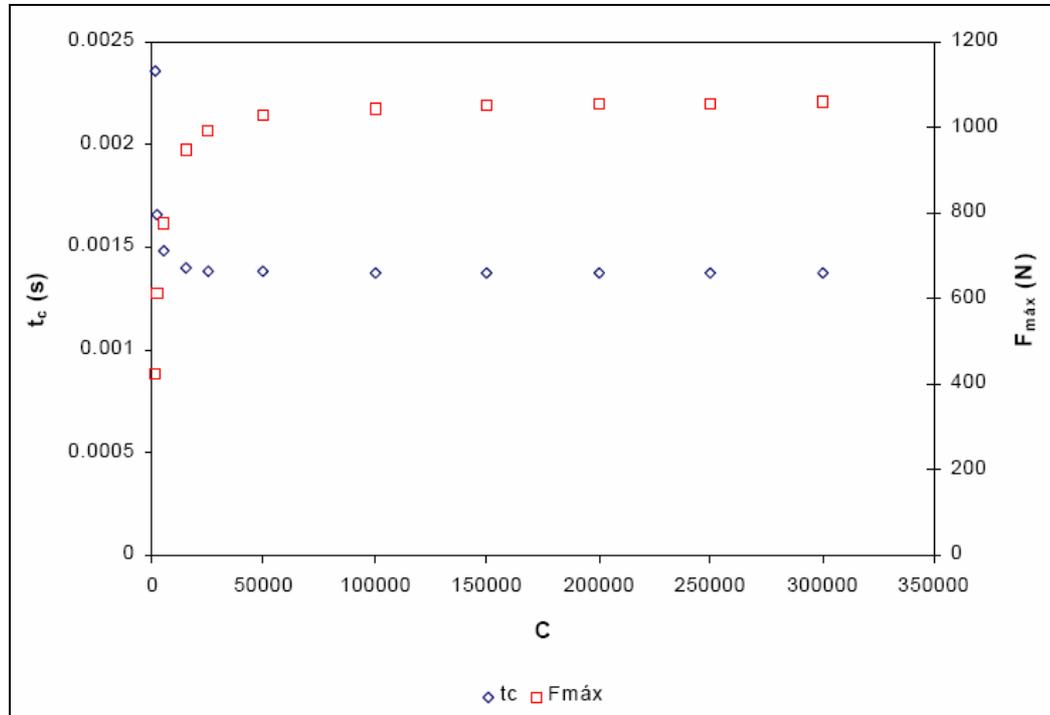


Figura 4.6: Variación de la fuerza máxima y el tiempo de contacto en función de C , modelo de indentación serie

4.2 Indentación + flexión: modelo serie-paralelo

4.2.1 Desarrollo del modelo

En este caso partimos básicamente del modelo planteado en el apartado anterior (indentación serie) y añadimos al sistema el modelo de flexión en paralelo. Con esto, el conjunto está compuesto por 1 elemento másico (m), 2 amortiguadores lineales (uno de indentación C_i y otro de flexión C_f) y 2 elementos elásticos, uno lineal para la flexión (K_f) y otro no lineal debido a la indentación (K_i), cuyos comportamientos se describen en las ecuaciones 4.77 a 4.81 respectivamente.

$$F_m = m\ddot{\alpha} + mg \quad (4-16)$$



$$F_{Ci} = C_i \dot{\alpha}_{Ci} \quad (4-17)$$

$$F_{Cf} = C_f \dot{\alpha}_{Cf} \quad (4-18)$$

$$F_{Kf} = K_f \alpha_{Kf} \quad (4-19)$$

$$F_{Ki} = K_i \alpha_{Ki}^{3/2} \quad (4-20)$$

Donde:

$$K_i = \frac{4E_i \sqrt{R}}{3(1-\nu^2)} \quad (4-21)$$

$$K_f = \frac{4\pi E_f e^3}{3(1-\nu)(3+\nu)r^2} \quad (4-22)$$

Partiendo de los modelos descritos podemos representar de forma esquemática el modelo que integra a ambos fenómenos en la figura 4.7.

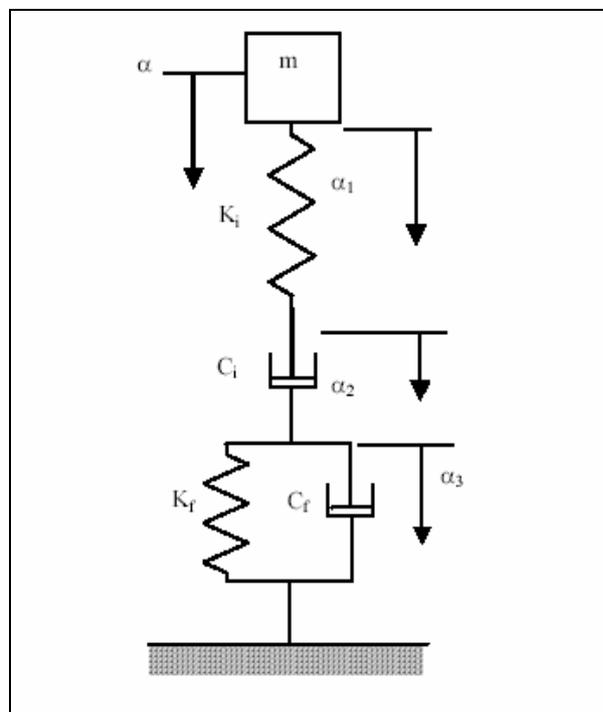


Figura 4.7: Modelo de flexión en paralelo más indentación en serie



La presencia de 2 conjuntos de deformaciones de diferente índole, hace que el sistema sea algo más complejo de modelizar, dado que ahora tendremos en si 3 desplazamientos. De esta forma podemos plantear que:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \quad (4-23)$$

donde α es el desplazamiento total del sistema así como del elemento másico, $\alpha_1 = \alpha_{Ki}$ correspondiente a la parte elástica de la indentación, $\alpha_2 = \alpha_{Ci}$ que describe la deformación no elástica de la indentación y $\alpha_3 = \alpha_{Kf} = \alpha_{Cf}$ que en este caso describen el desplazamiento debido a la flexión tanto en sus partes elástica y no elástica.

Aplicando la segunda ley de Newton al sistema, tenemos que:

$$m \ddot{\alpha} + mg = F_m = -F_{Ki} \quad (4-24)$$

Despreciando el término gravitatorio, obtenemos:

$$m \ddot{\alpha} = -K_i \alpha_1^{3/2} \quad (4-25)$$

Sabemos que $F_{Ki} = F_{Ci} = F_{Kf} + F_{Cf}$, por lo tanto:

$$K_i \alpha_1^{3/2} = C_i \dot{\alpha}_2 \quad (4-26)$$

$$K_i \alpha_1^{3/2} = K_f \alpha_3 + C_f \dot{\alpha}_3 \quad (4-27)$$

De igual forma que en el modelo anterior, la aparición del término no lineal correspondiente a la ley de Hertz nos impide encontrar una solución analítica que satisfaga el sistema, por lo que otra vez se recurre método numérico de Runge-Kutta de 4º orden.

4.2.2 Resolución numérica

Como se comentó, es necesaria la resolución por métodos numéricos para poder encontrar la función que satisfaga al sistema de ecuaciones.

Al igual que anteriormente, es necesario expresar el sistema de ecuaciones de forma tal que podamos programar el método.



A partir de la ecuación 4-23 se deduce que:

$$\alpha_1 = \alpha - \alpha_2 - \alpha_3 \quad (4-28)$$

De la ecuación 4-26 se tiene que:

$$\dot{\alpha}_2 = \frac{K_i}{C_i} \alpha_1^{3/2} \quad (4-29)$$

Al combinar con la ecuación 4-28 se tiene que:

$$\dot{\alpha}_2 = \frac{K_i}{C_i} (\alpha - \alpha_2 - \alpha_3)^{3/2} \quad (4-30)$$

De la ecuación 4-25 se desprende que:

$$\ddot{\alpha} = -\frac{C_i}{m} \dot{\alpha}_2 \quad (4-31)$$

usando la ecuación 4-30

$$\ddot{\alpha} = -\frac{C_i}{m} \left(\frac{K_i}{C_i} (\alpha - \alpha_2 - \alpha_3)^{3/2} \right) \quad (4-32)$$

simplificando

$$\ddot{\alpha} = -\frac{K_i}{m} (\alpha - \alpha_2 - \alpha_3)^{3/2} \quad (4-33)$$

partiendo de la ecuación 4-27 desarrollamos:

$$\dot{\alpha}_3 = \frac{1}{C_f} \left(K_i \alpha_1^{3/2} - K_f \alpha_3 \right) \quad (4-34)$$

recurriendo a la ecuación 4-28 se tiene que:

$$\dot{\alpha}_3 = \frac{1}{C_f} \left(K_i (\alpha - \alpha_2 - \alpha_3)^{3/2} - K_f \alpha_3 \right) \quad (4-35)$$

Las expresiones 4-30, 4-33 y 4-35 nos permiten construir el sistema de funciones que requiere el método de Runge-Kutta. Sin embargo, al igual que en el caso anterior, hace falta otra función que nos permita calcular todas las variables que aparecen. De esta forma volvemos a utilizar la definición de derivada expresada en la ecuación 4-12. De esta forma el conjunto de funciones quedaría como

$$f_1 = \frac{K_i}{C_i} (\alpha - \alpha_2 - \alpha_3)^{3/2} \quad (4-36)$$

$$f_2 = -\frac{K_i}{m} (\alpha - \alpha_2 - \alpha_3)^{3/2} \quad (4-37)$$



$$f_3 = \frac{1}{C_f} (K_i (\alpha - \alpha_2 - \alpha_3)^{3/2} - K_f \alpha_3) \quad (4-38)$$

$$f_4 = \dot{\alpha} \quad (4-39)$$

A partir de estas funciones se programó el algoritmo del método usando para ello Excel, usando un intervalo de 2.5 μ s entre cada punto calculado. Como en todos los casos, es necesario dar una serie de valor iniciales, que en general son:

Velocidad del impacto ($\dot{\alpha}_{t=0} = v_0$)

Posiciones iniciales de todos los elementos ($\alpha = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0$)

En este caso los parámetros del modelo son la masa del impactor (m) y las constantes K_i , K_f , C_f y C_i . En la figura 4.8 se puede visualizar el gráfico de una función numérica que se genera al ejecutar el programa. La curva es una cuasisenoide atenuada. Se puede apreciar cierta asimetría ocasionada por los 2 elementos amortiguadores, en especial en la parte inicial de la gráfica, donde predomina la actuación de la parte de indentación, por lo cual el valor de la fuerza se incrementa rápidamente. Este predominio de la indentación se debe a que al disponerse la parte de flexión en paralelo, el amortiguador de la misma presenta una reacción que provoca una mínima deformación en este subsistema, con lo cual el conjunto completo actúa en un primer instante como si se tratase de un fenómeno de indentación pura, evolucionando hacia un dominio de la parte de flexión.

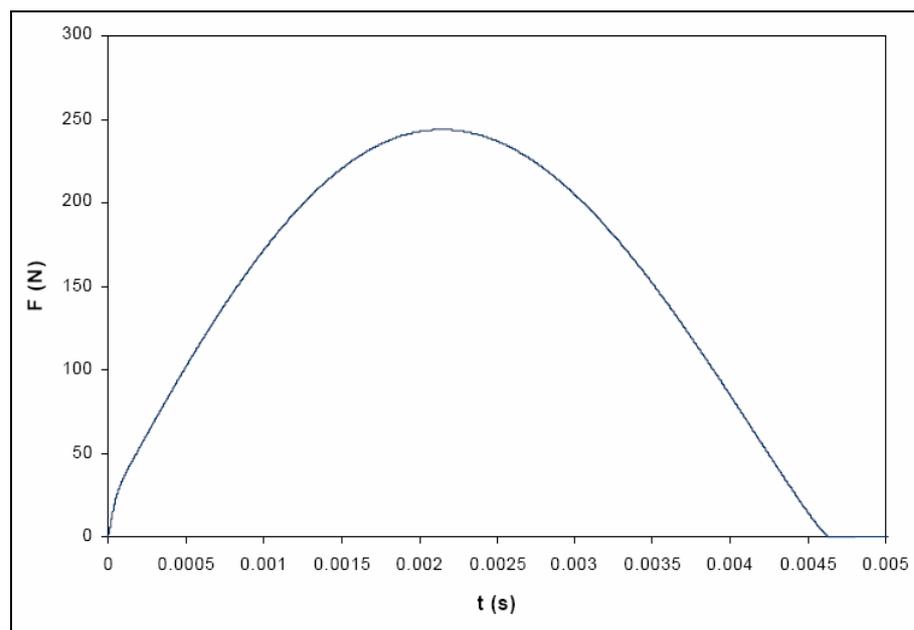


Figura 4.8: Solución numérica para el modelo de flexión+indentación paralelo-serie



4.2.3 Validación del modelo

En la figura 4.9 se pueden ver las variaciones del comportamiento del modelo cuando varía el módulo de flexión E_f .

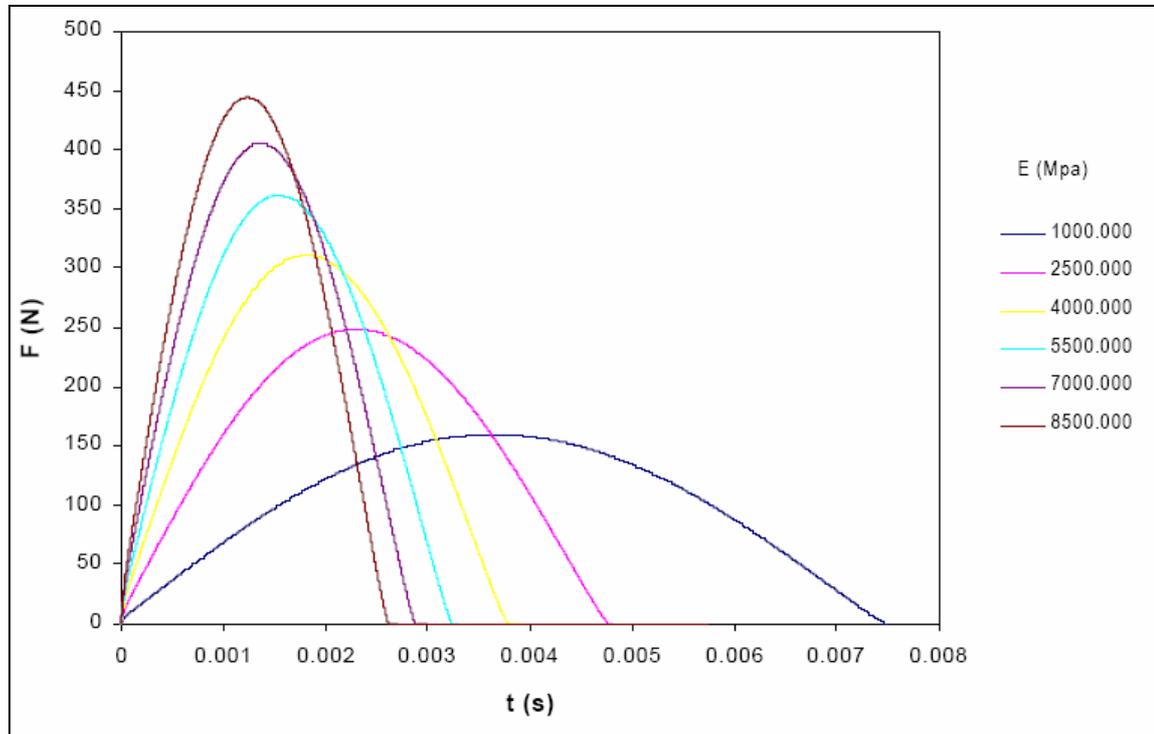


Figura 4.9: Variación del comportamiento de la fuerza con diferentes módulos de elasticidad, modelo de flexión+indentación paralelo-serie

Se nota que las variaciones de E_f afectan a los valores de la fuerza máxima y del tiempo de contacto. Como se puede ver en la figura 4.10, cuando aumenta el módulo de flexión, la fuerza máxima aumenta mientras el tiempo de contacto disminuye.



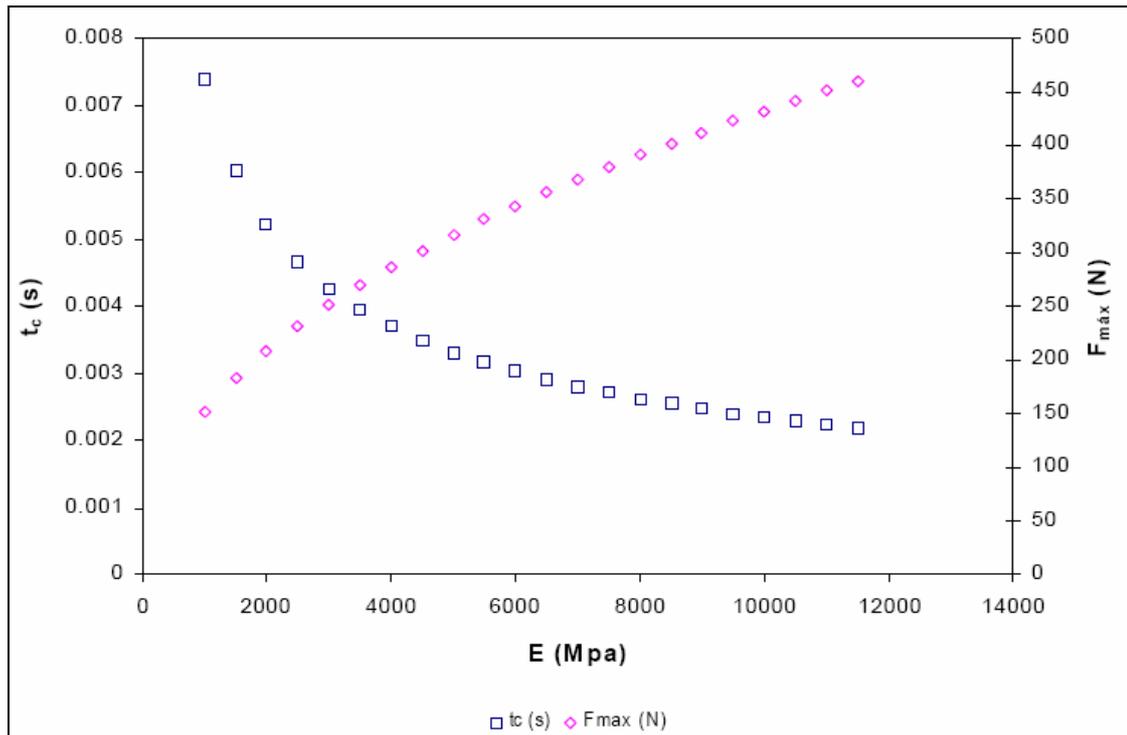


Figura 4.10: Variación de la fuerza máxima y del tiempo de contacto en función del módulo de elasticidad, modelo de flexión+indentación paralelo-serie

Al analizar el modelo desde la influencia de C_i en su comportamiento, podemos ver en la figura 4.11 que un menor valor de C_i aleja a las curvas de la forma senoidal. Esto representa físicamente un incremento de la deformación ocasionada por el fenómeno de indentación que es el mecanismo dominante en el entorno del tiempo inicial. No obstante, a altos valores de C_i , las diferencias entre las curvas no son tan evidentes, con lo cual no se esperan grandes cambios en lo referente a la pérdida de energía.



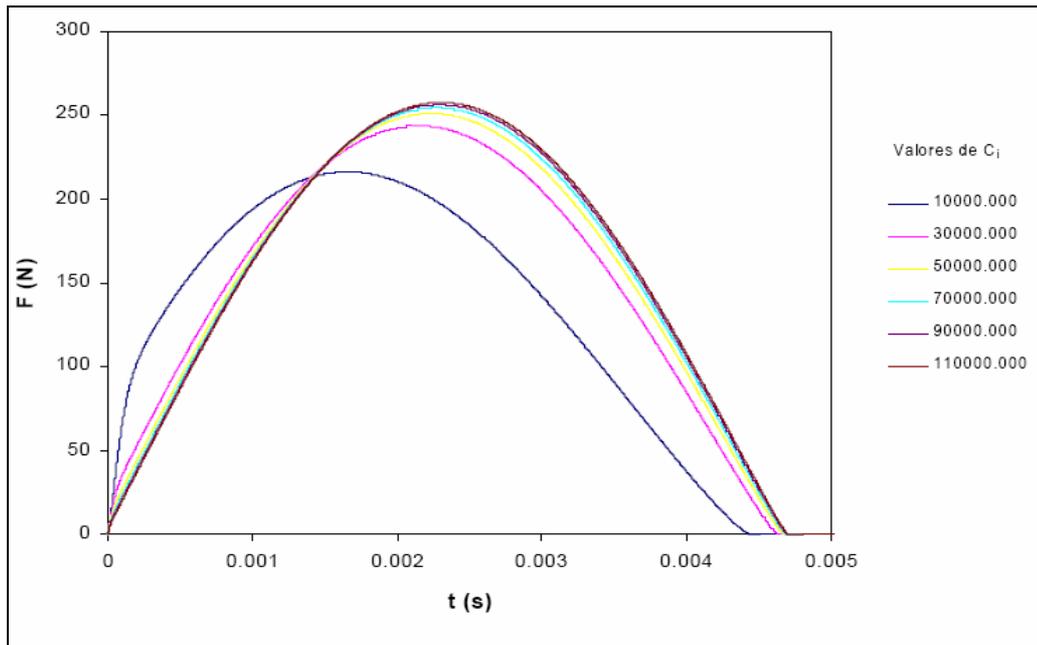


Figura 4.11: Variación del comportamiento de la fuerza con diferentes valores de C_i , modelo de flexión+indentación paralelo-serie

La figura 4.12 confirma estas últimas afirmaciones ya que se nota que para altos valores de C_i , tanto la fuerza máxima como el tiempo de contacto tienen una menor variación que cuando C_i es pequeño.

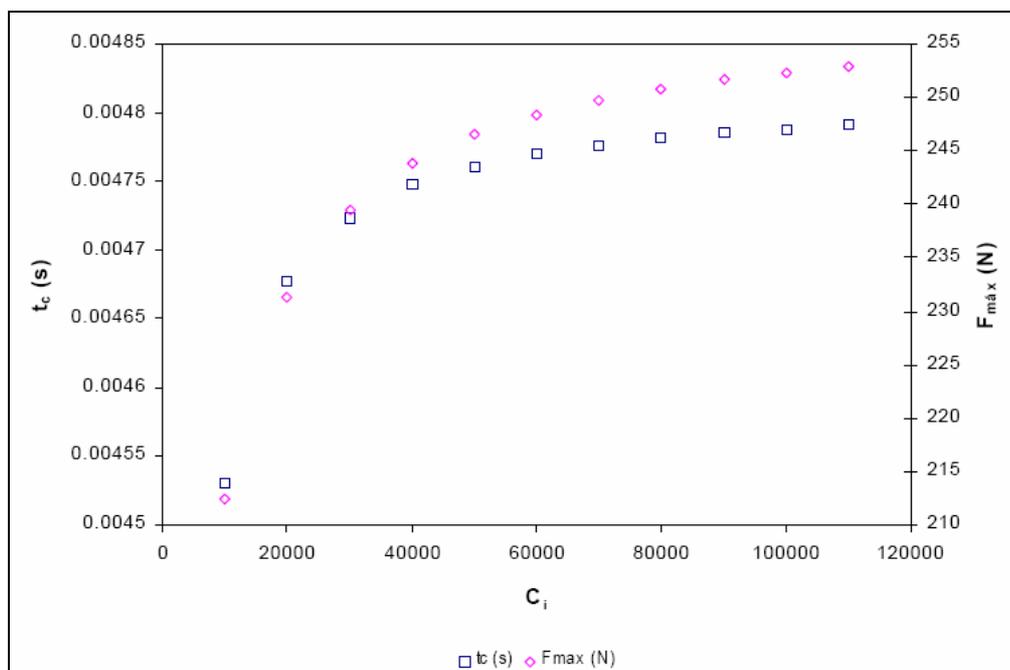


Figura 4.12: Variación de la fuerza máxima y el tiempo de contacto en función de C_i , modelo de flexión+indentación paralelo-serie



5- Métodos Experimentales



En este capítulo se describen las técnicas experimentales que se han empleado para la elaboración de los experimentos necesarios al desarrollo del proyecto.

5.1 Galgado de probetas

En los ensayos a altas velocidades de sollicitaciones, resulta ser muy difícil medir informaciones sobre la misma probeta. Las galgas extensométricas son unos de los pocos medios que lo permiten. Por eso hemos usado galgas unidireccionales de Vishay Measurements. Las características de aquellas galgas se pueden ver en la figura 5.1.

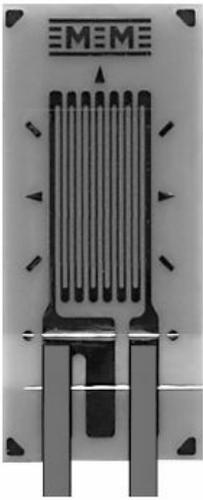
GAGE PATTERN DATA					
			GAGE DESIGNATION See Note 1	RESISTANCE (OHMS)	OPTIONS AVAILABLE
			L2A-XX-125LW-120 L2A-XX-125LW-350 C2A-XX-125LW-120 C2A-XX-125LW-350	120 ± 0.6% 350 ± 0.6% 120 ± 0.6% 350 ± 0.6%	
DESCRIPTION Widely used general-purpose gage.					
GAGE DIMENSIONS			Legend: ES = Each Section S = Section (S1 = Sec 1)	CP = Complete Pattern M = Matrix	<input type="checkbox"/> inch <input type="checkbox"/> millimeter
Gage Length	Overall Length	Grid Width	Overall Width	Matrix Length	Matrix Width
0.125	0.238	0.070	0.080	0.315	0.170
3.18	8.05	1.78	2.03	8.00	4.32

Figura 5.1: características de las galgas empleadas

Dado la intensidad de los impactos sufridos por las probetas, la mayoría de los pegamentos probados resultaron ineficaces. En efecto, al recibir el choque, las galgas se despegaron parcial o totalmente. Al final hemos conseguido un pegamento que aguantaba los impactos: el M-Bond 200 de Vishay Measurements. Es un adhesivo de tipo cianoacrilato que viene certificado para el uso en extensometría: polimeriza casi instantáneamente produciendo un pegado libre de fluencia, resistente a la fatiga y capaz de deformarse hasta un 5%. (Figura 5.2)





Figura 5.2: pegamento empleado para colocar las galgas extensométricas

5.1.1 Probetas de impacto-tracción

En los ensayos de impacto-tracción, teniendo el péndulo una trayectoria circular, además de ser sometida a tracción, la probeta también trabaja a flexión. Como solo nos interesa el comportamiento a tracción, hemos de eliminar los efectos de flexión en la medición de la elongación de la probeta. Para ello se colocan 2 galgas sobre la probeta: una sobre cada cara. Como lo hemos visto en la ecuación 2-6, tenemos:

$$\Delta V_S = \frac{V_E \cdot K}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (5-1)$$

Aquí, las galgas 1 y 3 están sobre la probeta y las 2 y 4 en el puente de Wheatstone. Las galgas sobre la probeta se alargan bajo los efectos de tracción (ε_t), de flexión (ε_f) y de la temperatura (ε_T) mientras las que están en el puente se pueden alargar solo bajo los efectos de la temperatura. Entonces tenemos:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{t1} + \varepsilon_{f1} + \varepsilon_{T1} \quad (5-2)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{T2} \quad (5-3)$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_{t3} + \varepsilon_{f3} + \varepsilon_{T3} \quad (5-4)$$

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_{T4} \quad (5-5)$$



El efecto de la temperatura es el mismo para todas las galgas, por lo tanto:

$$\varepsilon_{T1} = \varepsilon_{T2} = \varepsilon_{T3} = \varepsilon_{T4} \quad (5-6)$$

En cuanto a la elongación debida a la flexión de la probeta, una galga se alarga bajo los efectos de la flexión mientras la otra se comprime, por lo cual:

$$\varepsilon_{f1} = -\varepsilon_{f3} \quad (5-7)$$

Los efectos de la tracción pura provocan la misma elongación para cada galga:

$$\varepsilon_{t1} = \varepsilon_{t3} = \varepsilon_t \quad (5-8)$$

Al final, la ecuación 5-1 se puede simplificar y se obtiene:

$$\Delta V_s = \frac{V_E \cdot K}{4} (2 \cdot \varepsilon_t) = \frac{V_E \cdot K}{2} \varepsilon_t \quad (5-9)$$

El puente de Wheatstone esta conectado a un canal secundario del sistema de adquisición de datos DAS16000. Este le proporciona la tensión de entrada V_E y digitaliza la tensión de salida V_s . A partir de estos datos, podemos conocer la elongación de la probeta debida únicamente a la tracción pura:

$$\varepsilon_t = \frac{2 \cdot \Delta V_s}{V_E \cdot K} \quad (5-10)$$

5.1.2 Probetas SENB

En los ensayos de mecánica de la fractura a alta velocidad, nos interesa ver mediante galgas extensométricas el momento donde se inicia la grieta. Así se podrá comprobar si el momento de iniciación de la grieta corresponde al máximo de la fuerza registrada por la maquina. Para ello se coloca una galga sobre la probeta (3 otras galgas completan el puente de Wheatstone). Se hicieron unos ensayos con la galga colocada en el camino de la grieta y otros donde la galga estaba pegada por un lado de la entalla (figura 5.3).



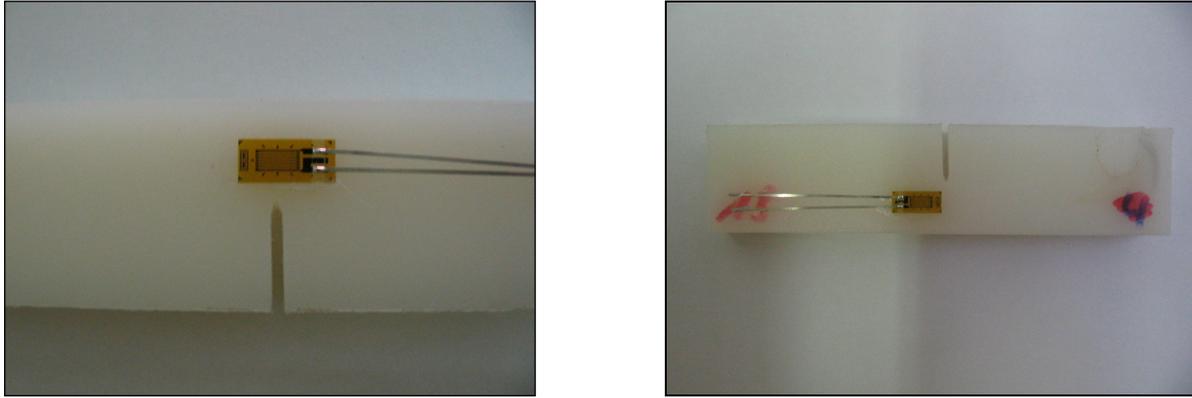


Figura 5.3: galga colocada en el camino de la grieta (izda), por un lado de la entalla (dcha)

Se registra la curva V_S en función del tiempo y se analiza las variaciones de la señal para poder detectar cuando se inicia la grieta.

5.2 Ensayos de tracción a baja velocidad

Como no se conocen las propiedades de la poliamida 6 a altas velocidades, hicimos unos ensayos a baja velocidad que nos permitieron tener un punto de referencia. Se obtuvieron las curvas tensión-deformación según la norma ISO 527 [7] en una máquina de tracción GALDABINI equipada con célula de carga de 25kN y con un videoextensómetro, dotada de un sistema informático de adquisición y tratamiento de datos SUN 2500. El videoextensómetro registra la variación relativa de la longitud de referencia de la probeta en cada instante del ensayo en la zona normalizada. Se mide mediante las dos bandas de contraste luminoso colocadas sobre la muestra. Las marcas se pusieron a una distancia de 62mm entre ellas (figura 5.4). La velocidad de adquisición de los datos durante todo el ensayo es de 50 datos/s. Los ensayos se realizaron a velocidades de 5, 10 y 100 mm/min y a temperatura ambiente.



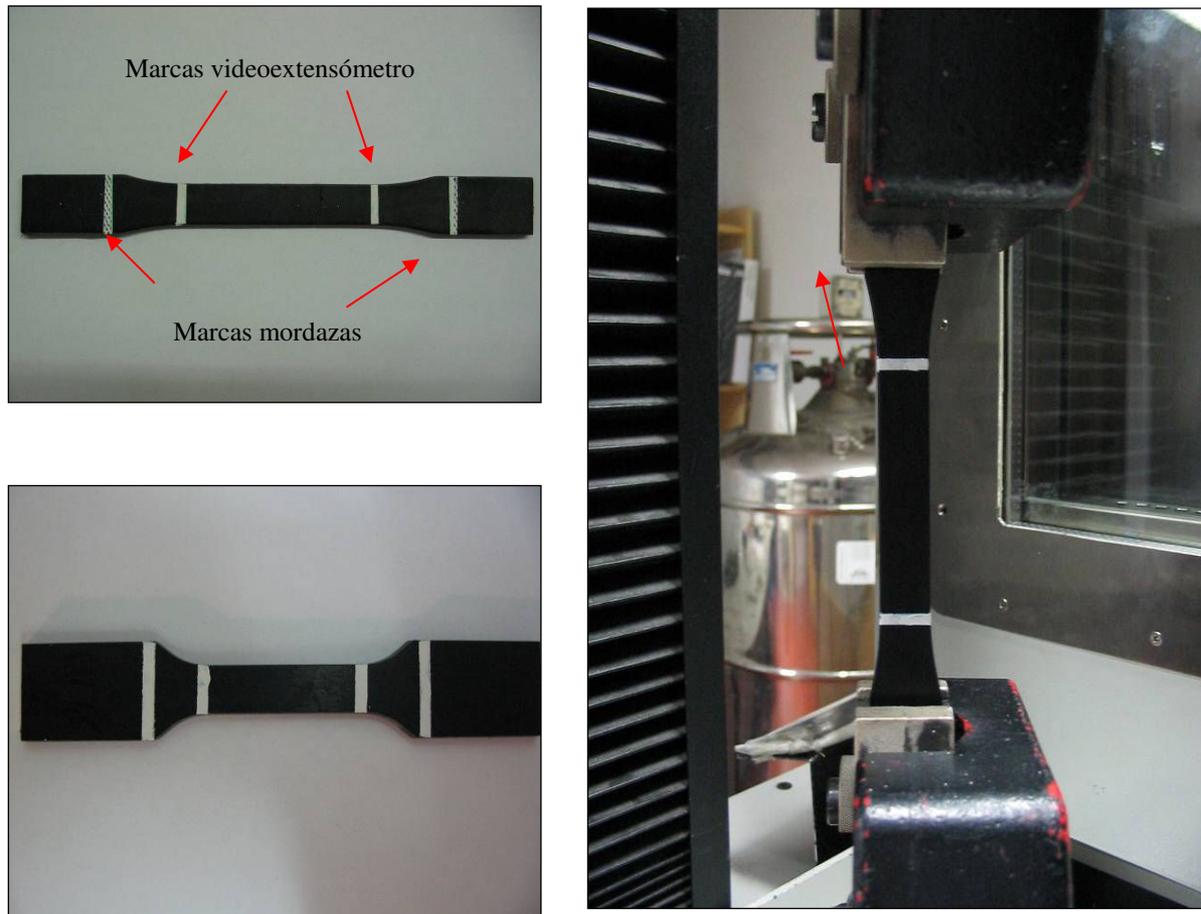


Figura 5.4: Probetas empleadas para los ensayos de tracción (izquierda). Probeta sometida al ensayo (derecha)

A partir de las curvas se obtuvieron los siguientes parámetros (figura 5.5).

Modulo de Young (E): Se obtiene calculando la pendiente en la zona lineal de las curvas.

El modulo de elasticidad en tracción se calcula sobre la base de dos valores de deformación especificados:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (5-11)$$

donde σ_1 es el esfuerzo medido el valor de deformación $\varepsilon_1=0,0005$; σ_2 es el esfuerzo medido el valor de deformación $\varepsilon_1=0,0025$.

Esfuerzo en el punto de fluencia, σ_y : Se considera el valor de fluencia como el primer esfuerzo para el cual tiene lugar un aumento de la deformación sin aumentar el esfuerzo.

Resistencia a tracción en el punto de rotura, σ_B : Esfuerzo en tracción soportado en el momento de la rotura de la probeta.



Deformación en el punto de rotura, ϵ_B : deformación correspondiente al valor del esfuerzo en el punto de rotura.

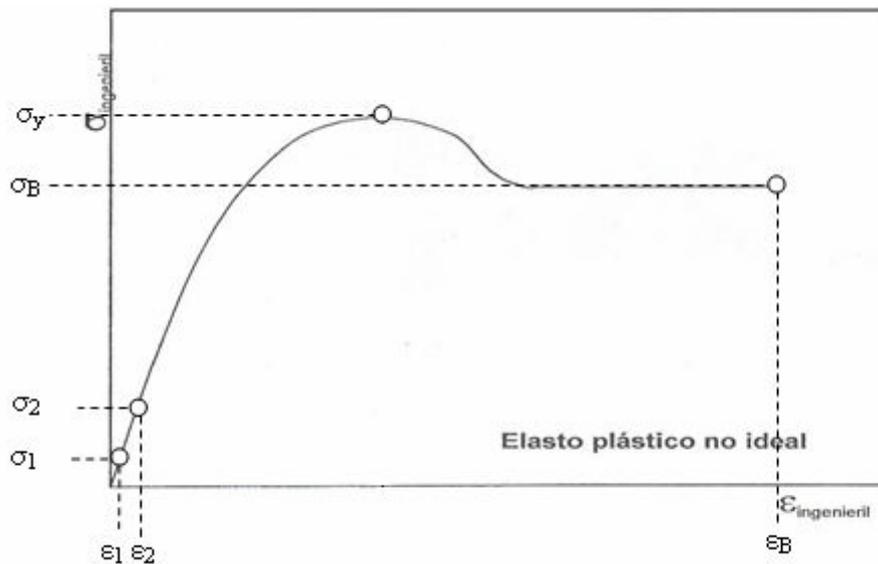


Figura 5.5: Curva típica de esfuerzo-deformación obtenida durante los ensayos

5.3 Ensayos a alta velocidad

Para los ensayos a alta velocidad de deformación [8], se emplea unos equipos instrumentados conectados con el sistema de adquisición de datos DAS16000 (figura 5.8). Los equipos de impacto instrumentados llevan un "captador de fuerza" instalado en el impactor (o en las mordazas), que hace posible la obtención de una señal fuerza-tiempo ($F-t$), la cual se amplifica, se digitaliza en un conversor analógico y se almacena en un ordenador, para luego ser procesada, representada y evaluada como una relación gráfica de la fuerza (F) soportada por dicho impactor durante el tiempo (t) del impacto (figuras 5.6 y 5.7).

El procesamiento de los datos se hace mediante el software DASWIN, que permite transferir los datos bajo formato Excel.

5.3.1 Indentación

Los ensayos de indentación se realizan mediante el equipo comercial de caída de dardo DARTVIS (Ceast, Italia). El dardo tiene una masa de 0.503Kg y una punta semiesférica de 12,7mm de diámetro. Se emplean probetas prismáticas de 9mm cuyas caras son previamente pulidas mediante papel esmeril. Así se consigue que las caras estén perfectamente paralelas y favorece un mejor asentamiento. Las probetas se colocan sobre una placa de acero de 15mm de espesor para evitar que se produzca flexión de las mismas y, por lo tanto, evidenciar el fenómeno de indentación.



Además, se sujeta la probeta por su parte superior mediante un anillo con accionamiento neumático, ejerciendo una presión nominal de 5 PSI (34,5 KPa). Así, se disminuyan los efectos dinámicos provocados por la vibración de las probetas al recibir el impacto. Se hicieron 3 pruebas incrementando la altura de caída y por tanto la velocidad de impacto (figura 5.9). Después de cada impacto, el dardo fue cogido mediante un mecanismo neumático (“anti-rebote”) para evitar subsiguientes golpes sobre la probeta.



Figura 5.6: Equipo instrumentado de impacto por caída de dardo DARTVIS



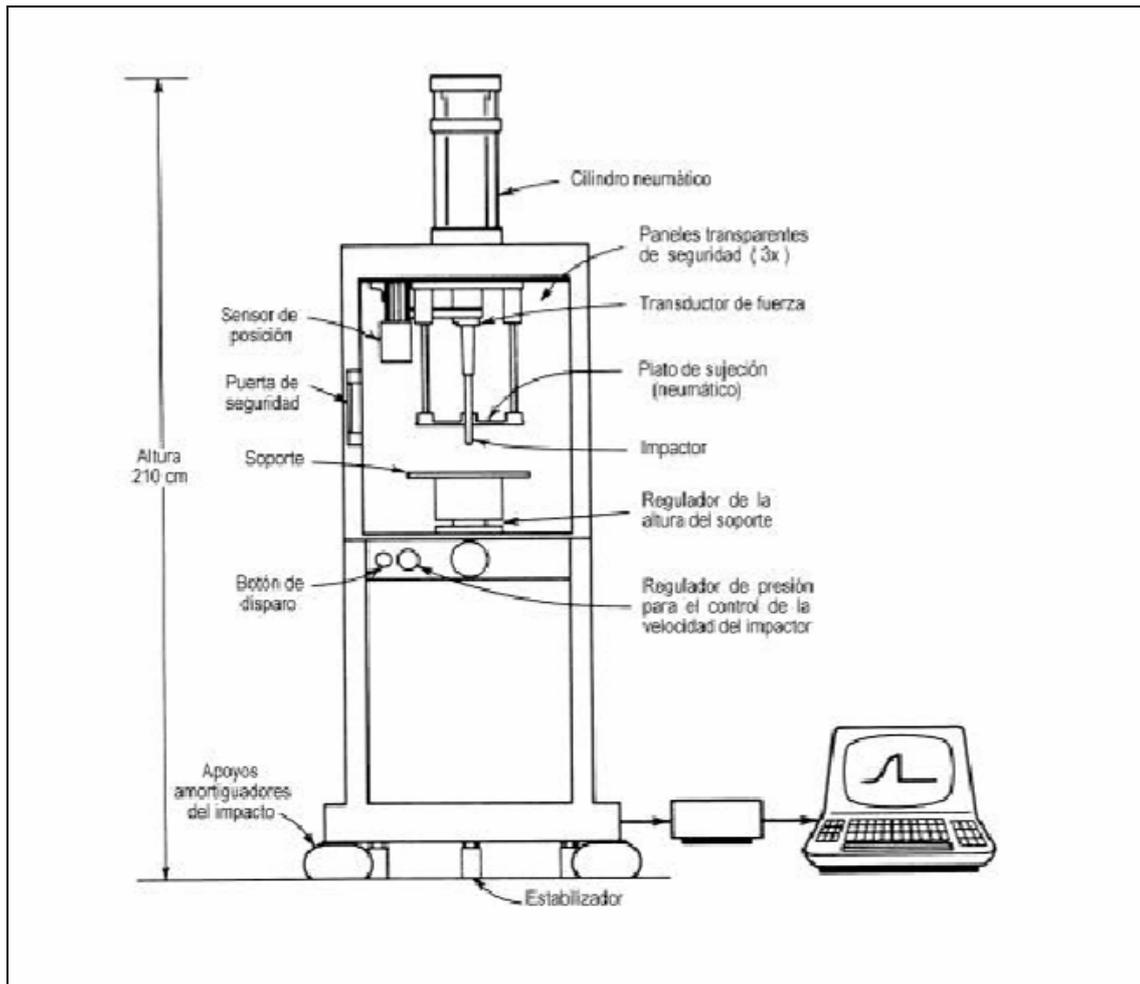


Figura 5.7: Esquema de un equipo neumático instrumentado de impacto por caída de dardo

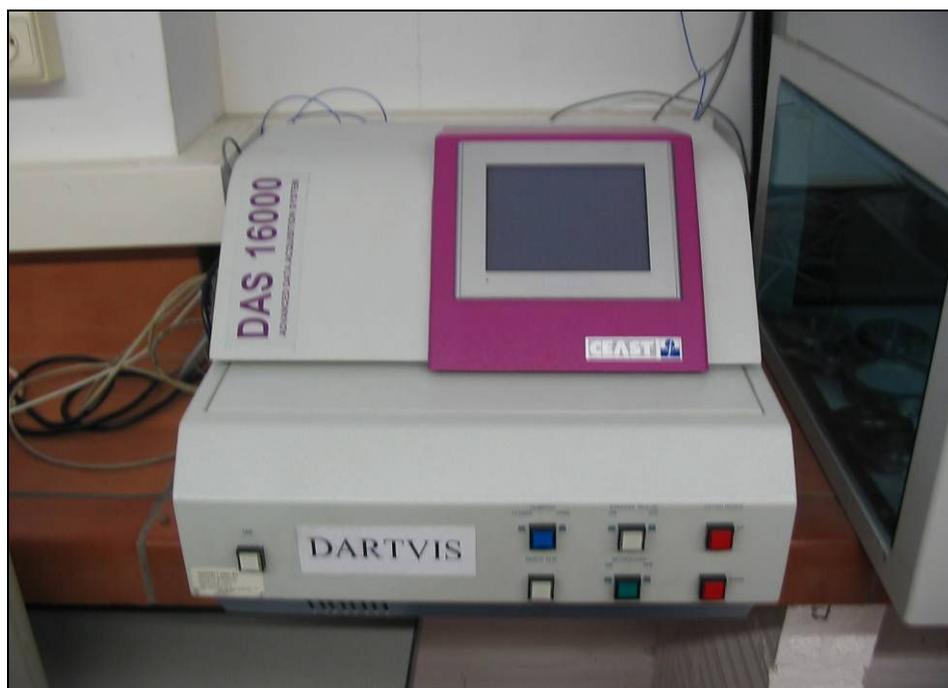


Figura 5.8: Sistema de adquisición de datos DAS16000



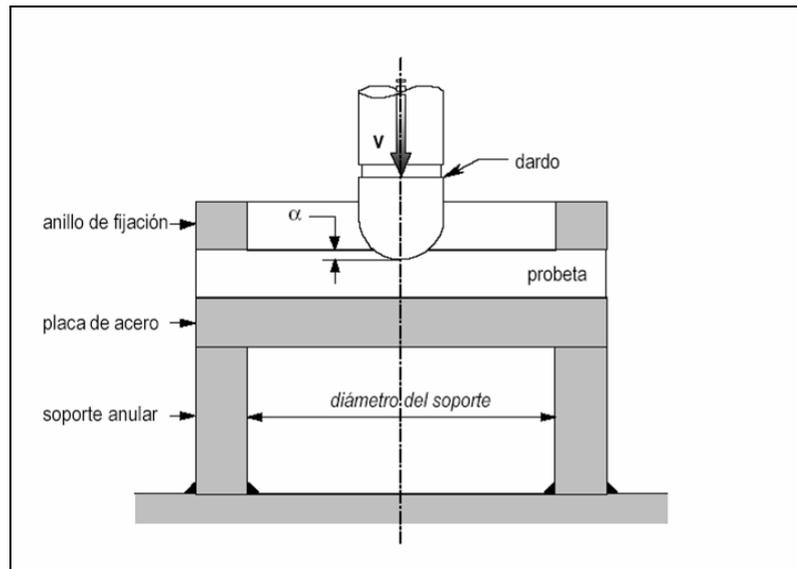


Figura 5.9: Geometría de indentación por impacto

5.3.2 Flexión de platos

De los ensayos de flexión de discos, placas o piezas acabadas, el más conocido y representativo es el ensayo de caída de dardo; el cual, como lo indica su nombre, consiste en la caída libre de un dardo que impacta sobre una probeta colocada en su trayectoria. Por tanto, el ensayo se basa en llevar el dardo (impactor o percutor) de masa conocida a una altura predeterminada para que, después de dejarlo caer por gravedad, golpee la probeta con una velocidad y energía bien definidas en el momento del impacto (figura 5.10).

El equipo es el mismo que para los ensayos de indentación. Las probetas utilizadas son discos inyectados de 80mm de diámetro y 4mm de espesor, los cuales están apoyados sobre un soporte anular de 80mm de diámetro externo y 60mm de diámetro interno. Para este tipo de ensayo, no se acciona el anillo neumático ya que restringiría en parte la flexión de la probeta, que en este caso, es lo que nos interesa. Se trabaja dentro de un rango de alturas de caída desde 20mm hasta 350mm. Aumentando esta altura, se incrementa la velocidad de impacto:

$$v_0 = \sqrt{2gh_0} \quad (5-12)$$

La velocidad de impacto real siempre será menor que la teórica ya que existen pérdidas por rozamiento.

Para cada material se escoge la masa de dardo adecuada para que, trabajando dentro de este rango, se observe deformación elástica, plástica y se llegue hasta la aparición y la propagación de unas



grietas, lo cual no se consigue con la PA6 no reforzada dado que es un material muy dúctil y que se superaría la fuerza máxima permisible por el equipo.

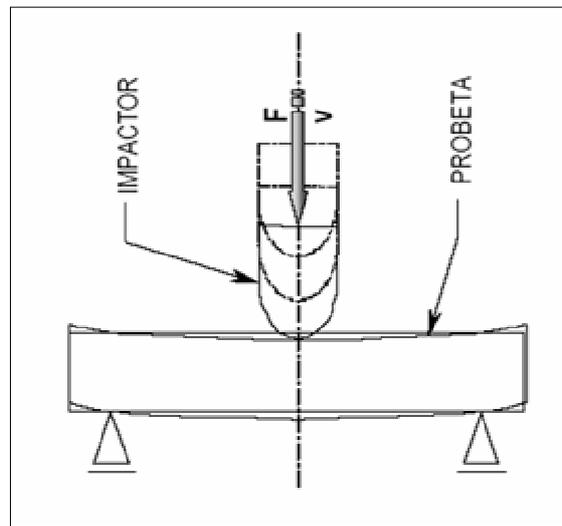


Figura 5.10: Geometría de flexión por impacto

5.3.3 Impacto-tracción

El ensayo de impacto-tracción consiste en aplicar a una probeta diseñada para este fin (generalmente en forma de "halterio"), un esfuerzo impulsivo de tracción, es decir una fuerza de tracción bastante elevada durante un intervalo de tiempo breve. Los ensayos de impacto-tracción se realizan mediante el péndulo RESIL (Ceast, Italia) (figura 5.11) que normalmente es el mismo utilizado para los ensayos Charpy e Izod, diferenciándose de éstos en el tipo de impactor y la base de apoyo de la probeta, diseñados de forma tal que se aplique dicho esfuerzo impulsivo de tracción sobre la probeta. Asimismo, el procedimiento de prueba -en sí mismo- es parecido al de las técnicas Charpy o Izod (figuras 5.12a y 5.12b).





Figura 5.11: Equipo instrumentado de impacto-tracción RESIL

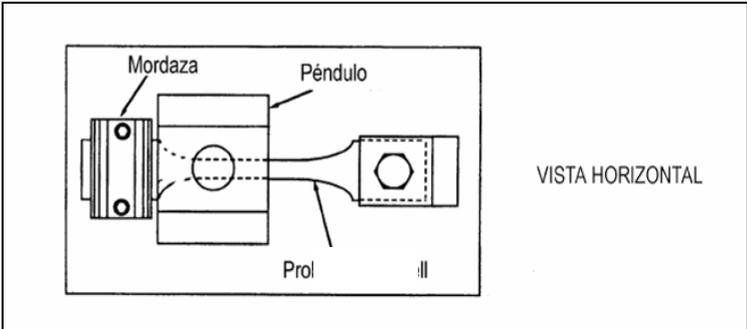


Figura 5.12a: Probeta y dispositivo de apoyo para un ensayo de impacto-tracción (vista horizontal)



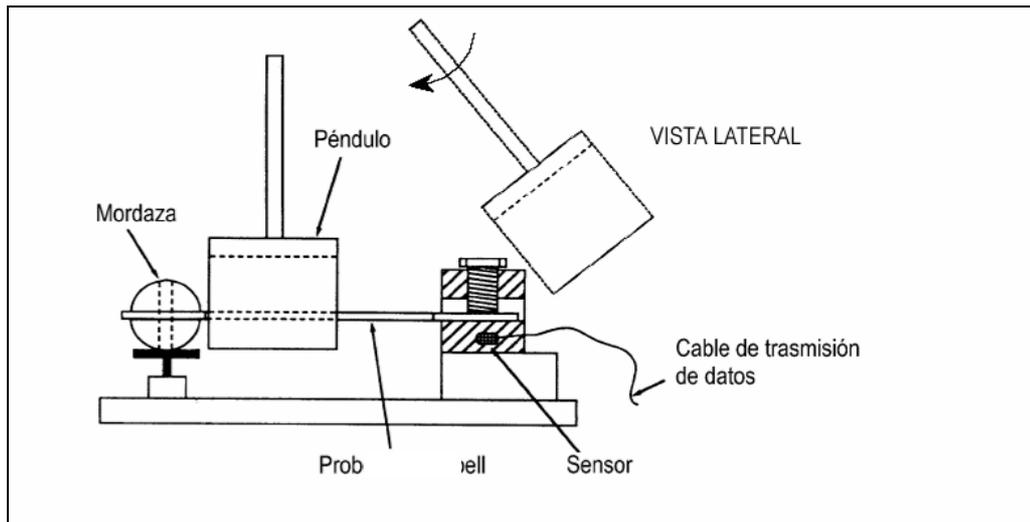


Figura 5.12b: Probeta y dispositivo de apoyo para un ensayo de impacto-tracción (vista lateral)

5.3.4 Flexión de barras prismáticas

Los ensayos de flexión de barras prismáticas consisten en someter a flexión probetas prismáticas del material en estudio previamente entalladas. Estas probetas pueden estar simplemente apoyadas y recibir el impacto en su centro (Charpy), o pueden estar empotradas en un extremo y recibir el golpe por el otro (Izod) (figura 5.13). De todos los ensayos de impacto, los ensayos normalizados de uso más difundido y cuya aplicación es más generalizada, son los ensayos Charpy e Izod, los cuales emplean equipos del tipo pendular. Para nuestro trabajo, se ensayaron probetas SENB (*Single Edge Notched Bend*) en configuración Charpy.

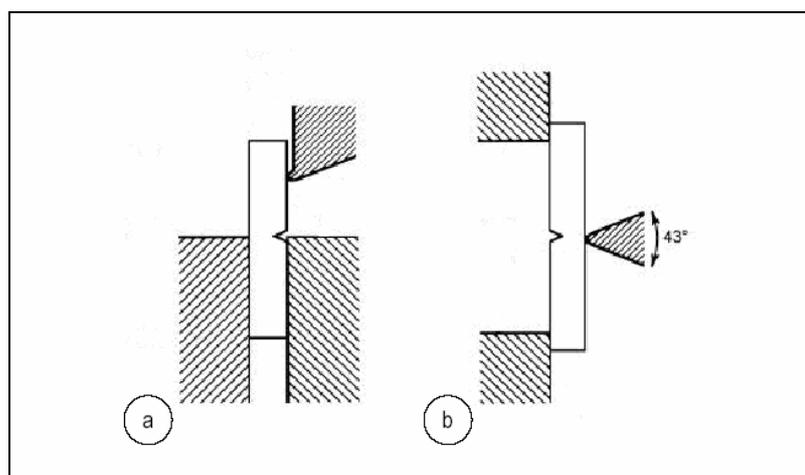


Figura 5.13: Geometría y probeta de ensayos a) Izod b) Charpy



a. Mecánica de la fractura lineal elástica

La mecánica de fractura y particularmente la mecánica de fractura lineal elástica [9] (“Linear Elastic Fracture Mechanics”, LEFM) es una ciencia que estudia los mecanismos y procesos de propagación de grietas en sólidos, así como la distribución de tensiones y deformaciones que ocurren en un material agrietado o con discontinuidades, sometido a cierta tensión externa. Esta ciencia surgió con los trabajos fundamentales de Griffith (1921, 1924) sobre criterios de propagación de grietas en sólidos, basados en conceptos de transformación de energía elástica en energía de superficie.

Irwin (1957) introdujo un avance importante en la mecánica de fractura ya que planteó el análisis en términos de tensiones (formulación tensional), lo cual no se había podido hacer anteriormente debido a que teóricamente en la punta de una grieta las tensiones tienden a infinito, independientemente de la magnitud de la carga aplicada. Para su formulación, Irwin plantea que el proceso de fractura no puede concentrarse en un solo punto, como se deduciría de un análisis netamente elástico, sino que se presenta en una zona pequeña pero finita, que denomina *zona plástica* en la cual, las tensiones ya dejan de ser infinitas porque parte de la energía elástica se consume en la deformación plástica del material próximo a la punta. El concepto principal introducido aquí es el de *factor de intensidad de tensiones* (K_Q), de gran aplicación en la mecánica de fractura. Para la condición de inicio de grieta se considera que el parámetro K_Q adquiere un valor crítico y por tal razón se denomina factor de intensidad de tensiones crítico o tenacidad a la fractura K_{Ic} .

b. Determinación del factor de intensidad de tensiones crítico (K_{Ic})

En la mayoría de estudios de fractura se ha trabajado con muestras que tienen geometrías típicas, para las cuales existen soluciones del factor de intensidad de tensiones que pueden ser obtenidas directamente de manuales. Entre las pruebas más utilizadas está la de tipo viga en flexión con entalladura simple (*single edge notched bend SENB*), también conocida como prueba de flexión con tres puntos (*three point bend, TPB*), indicada en la figura 5.14.



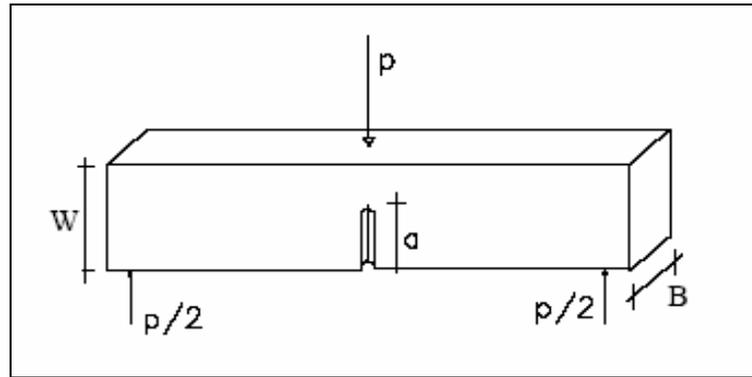


Figura 5.14: Viga en flexión con entalladura simple (SENB)

Para geometrías típicas, la expresión general de K_Q en función de la carga (P) aparece en manuales y en este caso, de acuerdo con la nomenclatura propuesta por Bazant y Planas (1998) se tiene:

$$K_Q = f \frac{P_Q}{B\sqrt{W}} \quad (5-13)$$

Para la muestra SENB que es la que se utilizó en el presente trabajo, f se evaluó por la ecuación:

$$f = 6\alpha^{\frac{1}{2}} \frac{[1.99 - \alpha(1 - \alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)]}{(1 + 2\alpha)(1 - \alpha)^{\frac{3}{2}}} \quad (5-14)$$

donde $\alpha = \frac{a}{W}$

c. Criterios de validez de los ensayos de LEFM

Para que las pruebas de LEFM sean válidas, se deben cumplir ciertos requisitos en la preparación de las muestras, en sus dimensiones y en los resultados que se obtienen. Tales requisitos están bien establecidos para metales, de acuerdo con la norma ASTM E-399 (1983), sin embargo, para otros materiales como polímeros, hormigón o suelos, los estándares de ensayo aún no han sido establecidos, por lo cual en general se hace necesario adoptar las normas disponibles para metales.

Los criterios fundamentales de validez de las pruebas establecidos en esta norma se basan en el cumplimiento de la elasticidad lineal para lo cual es necesario que la zona plástica, próxima a la punta de grieta tenga un tamaño pequeño con respecto a las dimensiones de la muestra y que se verifique la linealidad de la curva carga-desplazamiento. Las condiciones que se deben cumplir son:



→ **Dimensiones mínimas de la muestra:** aquí se busca que la dimensión mínima de la muestra sea un cierto número de veces mayor que el tamaño de la zona plástica. Para el caso de deformación plana en metales, la norma establece la siguiente condición:

$$B, a, (W - a) > 2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_y} \right)^2 \quad (5-15)$$

→ **Linealidad de la curva carga - desplazamiento:** Durante una prueba de mecánica de fractura se deben medir los desplazamientos (δ) y la tensión aplicada P y con estos datos se construye la curva P - δ que puede tener diferentes formas. De acuerdo con Broek (1986), el caso ideal corresponde a un comportamiento totalmente lineal, con rotura frágil, donde una vez alcanzada la tensión de fractura, la carga baja drásticamente (figura 5.15a). En algunos casos puede presentarse una pequeña extensión espontánea de la grieta a una carga menor (fenómeno denominado *pop-in*) después de la cual se alcanza la carga de fractura o carga máxima P_{max} (figura 5.15b) y finalmente, puede presentarse un comportamiento elastoplástico, con endurecimiento por deformación (figura 5.15c). Para que el ensayo sea válido en LEFM, se debe verificar que la deformación plástica no sea muy grande y esto es así cuando:

$$\frac{P_{max}}{P_Q} < 1.1 \quad (5-16)$$

donde P_Q corresponde a la carga determinada por la intersección entre la curva de tensión-deformación y una línea trazada desde el origen, con pendiente reducida en un 5% respecto a la tangente inicial. En caso de que esto se cumpla, P_Q se adopta como la carga de inicio de grieta.



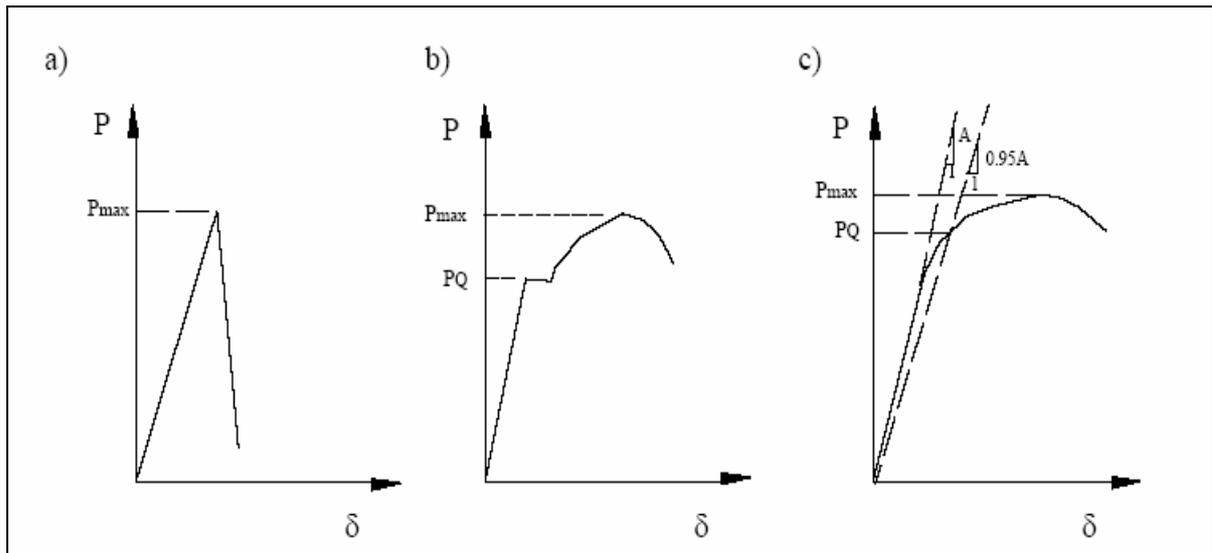


Figura 5.15: Curvas típicas de carga-desplazamiento: a) comportamiento lineal con rotura frágil, b) fenómeno de pop-in, c) comportamiento elastoplástico y criterio de linealidad

Si estos dos criterios se cumplen, tendremos que $K_Q = K_{Ic}$.

d. Preparación de las muestras

A partir de las probetas prismáticas obtenidas por inyección, se consiguen las probetas SENB haciendo entallas de distintas profundidades con una fresa circular. Se quitan las rebabas que deja la mecanización de la probeta. Luego, mediante una hoja de afeitar, se inicia una grieta en el fondo de la entalla. Medimos la profundidad (a) de la entalla con un proyector de perfil.



6- Resultados y discusiones



6.1 Tracción a baja velocidad

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de tracción a baja velocidad. Se hicieron pruebas con las probetas mecanizadas para impacto-tracción (longitudinales y transversales) y también con probetas ASTM obtenidas por inyección (ver apartado 3.3).

El objetivo de estos ensayos es poder estudiar los efectos sobre el comportamiento mecánico del contenido en fibra de vidrio, de la orientación de las fibras, de la velocidad del ensayo y del tamaño de las probetas.

6.1.1 Efectos del contenido en fibra

La fibra de vidrio se caracteriza por su alta resistencia a tracción (3450 MPa) y su alto módulo elástico (70 GPa) por lo cual un aumento del contenido en fibra de vidrio debe influir en las respuestas del material solicitado.

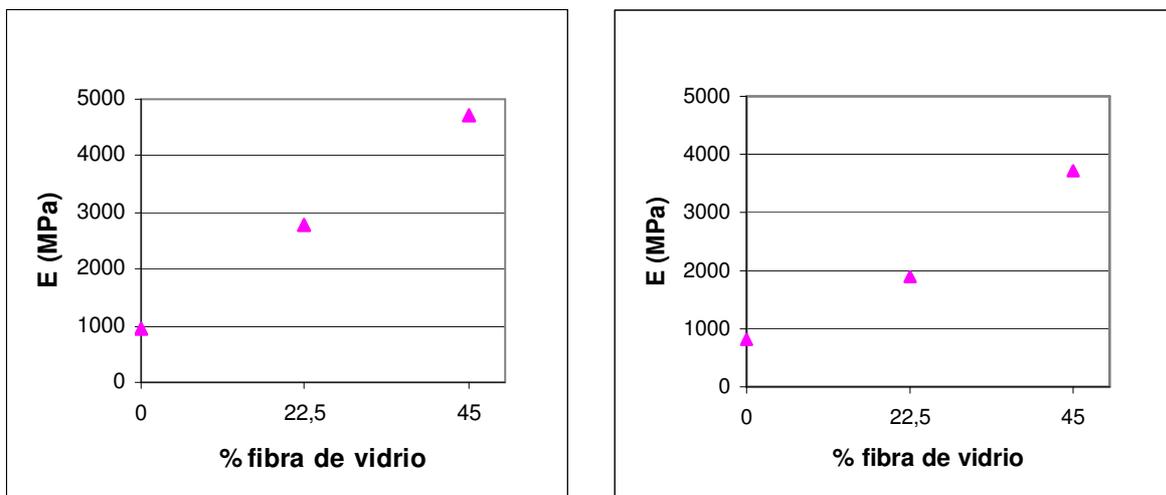


Figura 6.1: variación del módulo elástico en función del contenido en fibra de vidrio y de su orientación longitudinal (izda) o transversal (dcha)



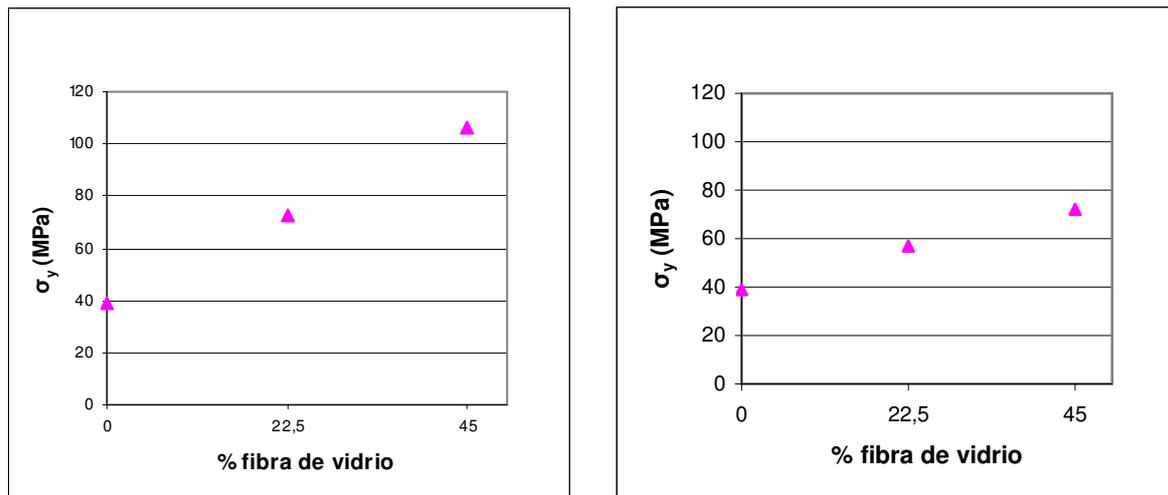


Figura 6.2: variación de la tensión máxima a fluencia en función del contenido en fibra de vidrio y de su orientación longitudinal (izda) o transversal (dcha)

En las figuras 6.1 y 6.2, se puede apreciar que a medida que aumenta el porcentaje de fibra de vidrio, aumentan tanto el módulo elástico como la tensión máxima a fluencia que soporta la probeta.

Aquellos resultados cumplen con lo que se cabía esperar ya que un material altamente cargado en fibra de vidrio tendrá mayor dificultad para alargarse debido a la muy poca deformabilidad de la fibra de vidrio y su resistencia se incrementará ya que el papel principal de la fibra es reforzar el material.

	PA6 Long	PA6+22,5 FV Long	PA6+45%FV Long
E promedio (MPa)	938	2797	4733
σ_y promedio (MPa)	39,14	72,91	106,42

Tabla 6.1: valores promedios del módulo elástico y de la tensión máxima a fluencia de las mezclas con orientación longitudinal

	PA6 Trans	PA6+22,5 FV Trans	PA6+45%FV Trans
E promedio (MPa)	813	1900	3720
σ_y promedio (MPa)	38,83	56,89	72,01

Tabla 6.2: valores promedios del módulo elástico y de la tensión máxima a fluencia de las mezclas con orientación transversal



Las tablas 6.1 y 6.2 nos permiten afirmar que también se cumple la ley de las mezclas.

6.1.2 Efectos de la orientación de las fibras

Como acabamos de ver, un material reforzado con fibra de vidrio ve su resistencia aumentar. Pero la magnitud de este incremento depende de la orientación de las fibras respecto a la dirección de los esfuerzos que sufre el material.

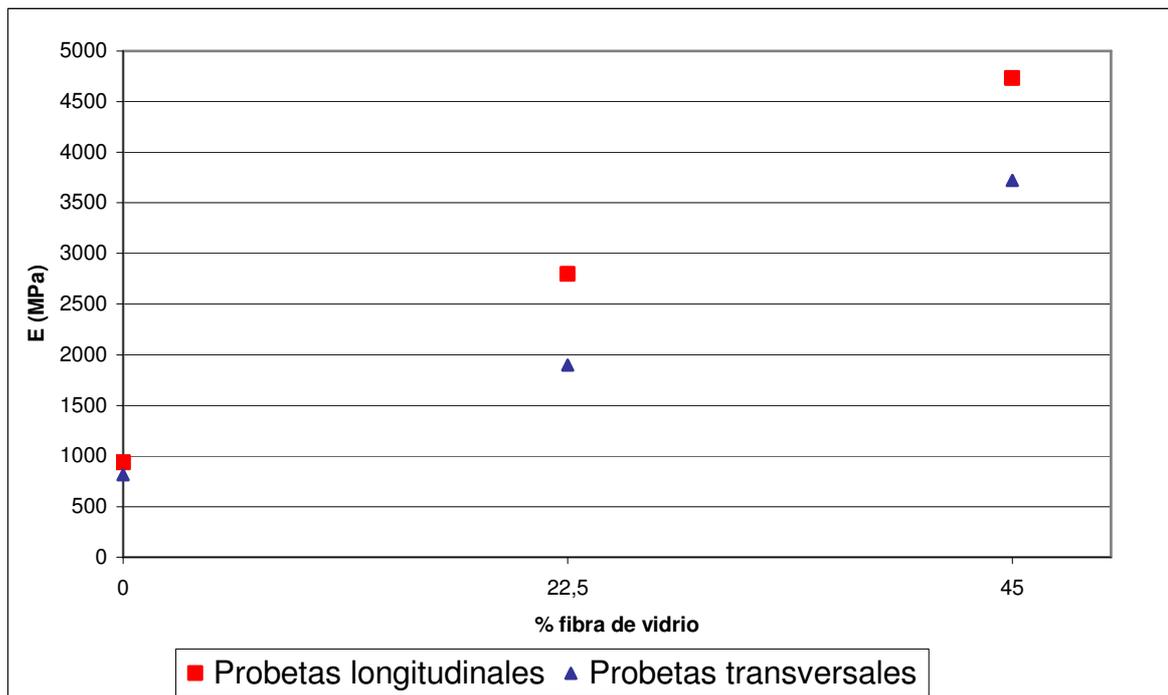


Figura 6.3: variación del módulo elástico en función de la orientación de la fibra



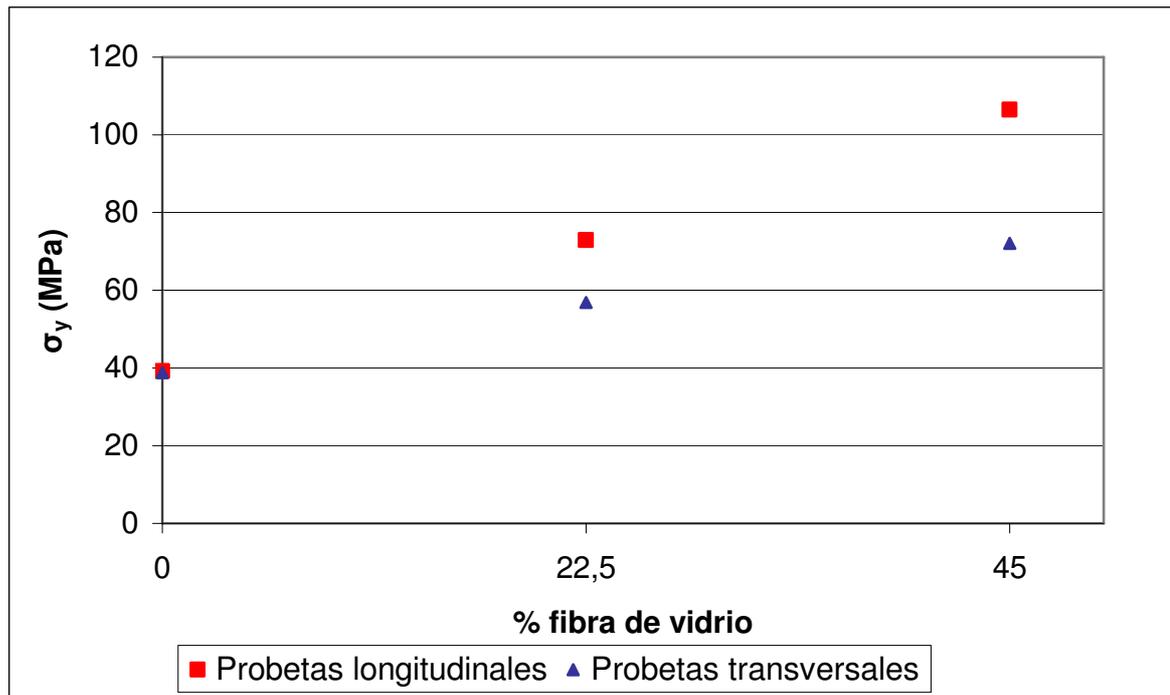


Figura 6.4: variación de la tensión máxima a fluencia en función de la orientación de la fibra

En las figuras 6.3 y 6.4, como se esperaba, se observa un incremento de E y σ_y cuando la fibra de vidrio está orientada en el sentido del esfuerzo aplicado. En el caso de la PA6 sin fibra, también se observa un ligero aumento de E y σ_y debido a la orientación del flujo y por lo tanto a la orientación de las cadenas poliméricas.

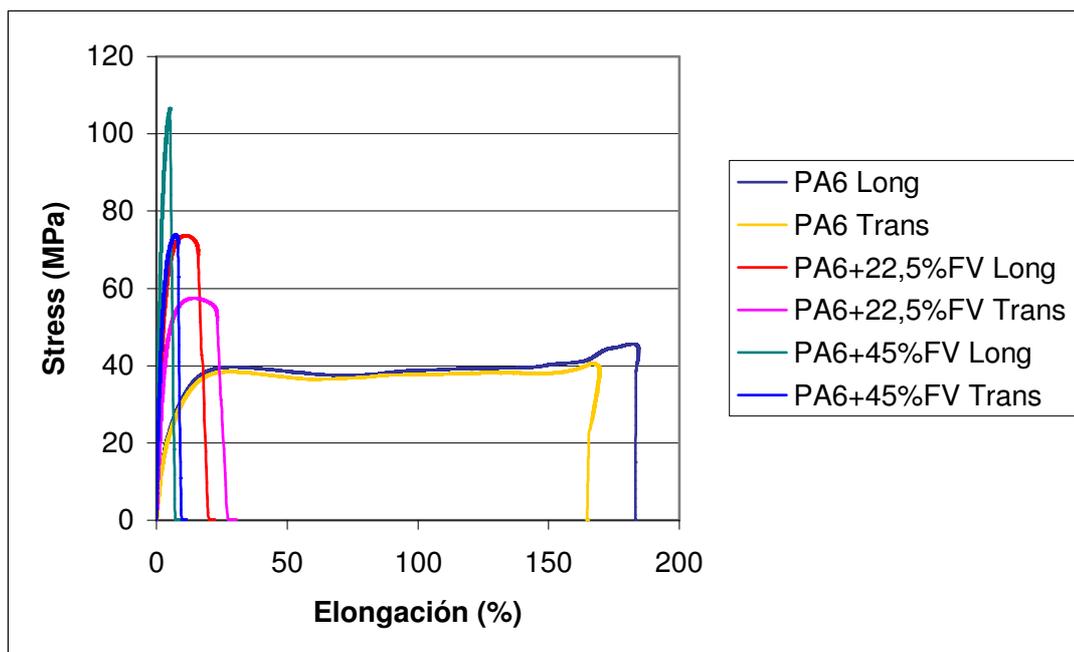


Figura 6.5: curvas experimentales σ - ϵ obtenidas para las 3 mezclas



En la figura 6.5, se representan unas curvas σ vs. elongación de las 3 mezclas con las 2 orientaciones: longitudinal y transversal. Además de comprobar lo que se dijo anteriormente sobre E y σ_y , se nota que para cada mezcla, la elongación a rotura ϵ_B es mayor en las muestras transversales. Eso se debe a que la fibra tiene su máxima influencia sobre las propiedades del material cuando está en la configuración longitudinal. Por lo tanto, cuando está orientada transversalmente, tiene menor efecto sobre las variaciones de E , σ_y y ϵ_B .

6.1.3 Efectos de la velocidad de ensayo

Además de los ensayos a 5mm/min., se hicieron unos ensayos a 100mm/min. sobre las probetas llevando fibra de vidrio orientada longitudinalmente.

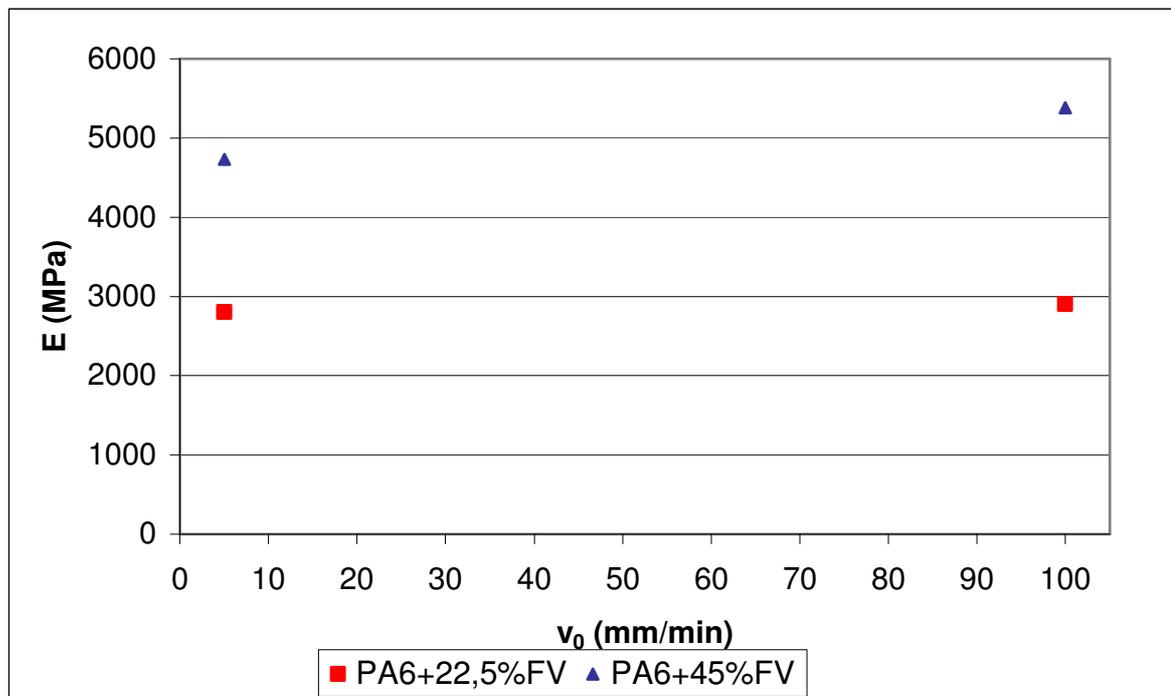


Figura 6.6: variación del módulo elástico en función de la velocidad de ensayo



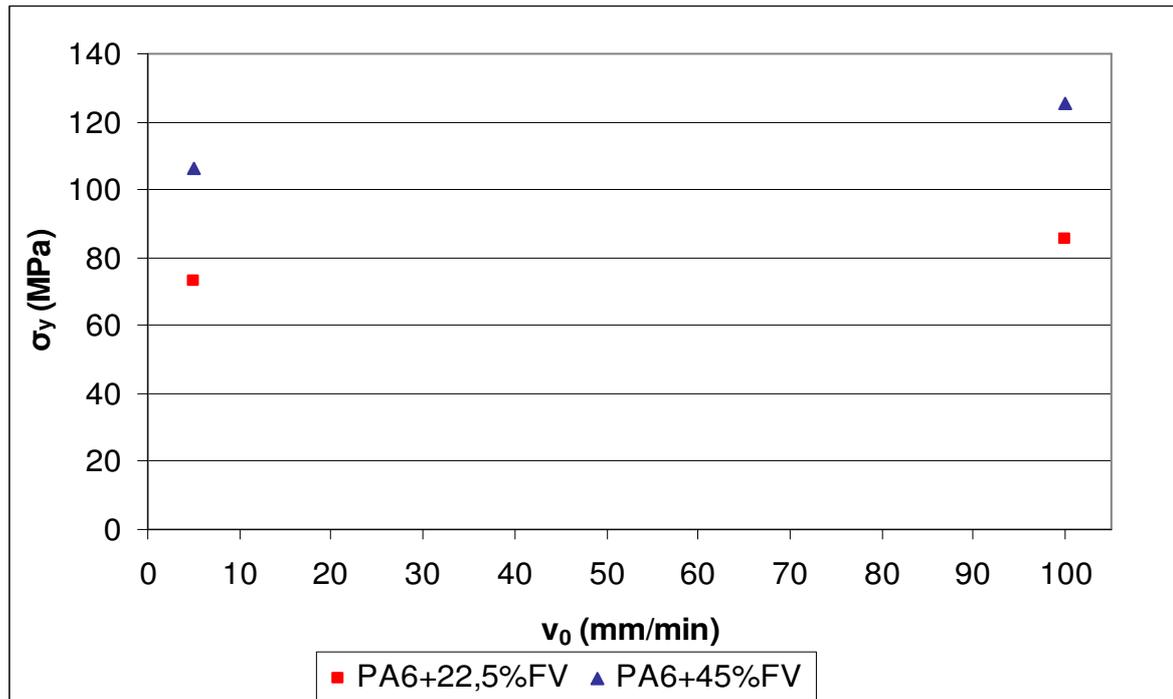


Figura 6.7: variación de la tensión máxima a fluencia en función de la velocidad de ensayo

En las figuras 6.6 y 6.7, se puede ver que con una velocidad de deformación mayor, tanto E como σ_y aumentan. Este fenómeno viene de la naturaleza viscoelástica de los materiales ensayados.

6.1.4 Efectos del tamaño de las probetas

Para ver como afecta el tamaño de las probetas en las propiedades mecánicas, se hicieron unos ensayos de tracción a 10mm/min con probetas ASTM obtenidas por inyección. Esas probetas tienen un tamaño mayor que las de impacto-tracción. En las figuras 6.8 y 6.9 se pueden comparar los valores de E y σ_y conseguidos con los de las pequeñas probetas.



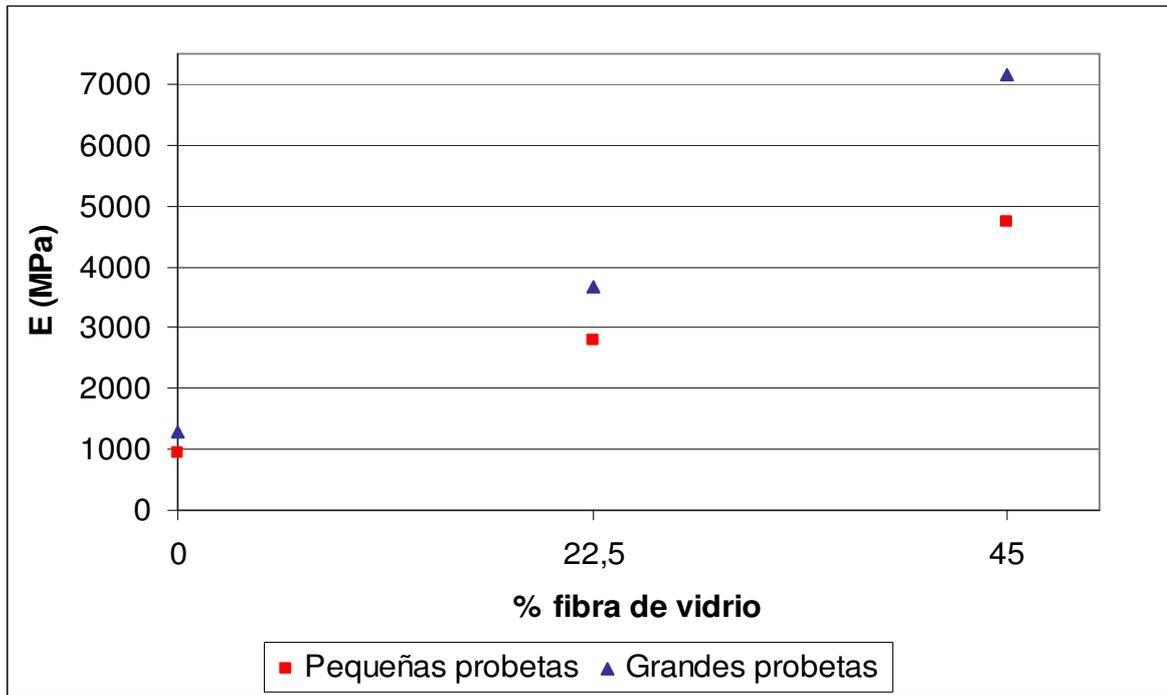


Figura 6.8: variación del módulo elástico en función del tamaño de la probeta

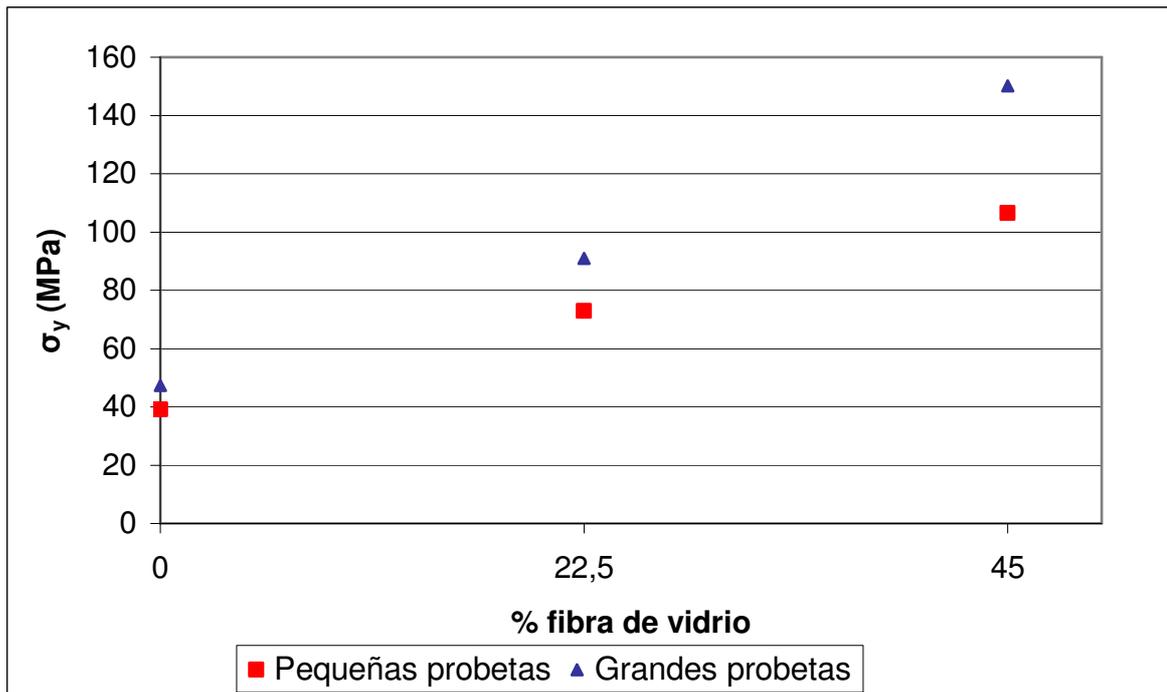


Figura 6.9: variación de la tensión máxima a fluencia en función del tamaño de la probeta

Se nota que se incrementa el valor de cada parámetro en el caso de las grandes probetas. Este fenómeno se explica porque siendo más gruesas las probetas, durante el proceso de inyección se enfrían más lentamente por lo cual las fibras tienen más tiempo para orientarse en la dirección del flujo. El punto de inyección de dichas probetas está situado en un extremo lo que implica una dirección de flujo longitudinal y por lo tanto una orientación de fibras según el eje de la probeta.



6.2 Indentación

Para cada material se hicieron 3 pruebas a distintas alturas de caída: 50, 65 y 100mm. La masa del dardo era de 0,503 Kg. Los ensayos se hicieron a temperatura ambiente.

Las curvas fuerza vs. tiempo registradas experimentalmente se muestran en las figuras 6.10a, 6.10b y 6.10c.

Para cada prueba, se busca el módulo de indentación E_i . Para ello, se intenta ajustar la curva numérica, obtenida por el algoritmo de Runge Kutta de 4º orden (ver apartado 4.1.2), para que se parezca lo más posible a la curva experimental. Este ajuste se hace variando los valores de K_i y C_i , que corresponden a las constantes de los elementos muelle y amortiguador del modelo utilizado. Como tenemos que:

$$K_i = \frac{4E_i\sqrt{R}}{3(1-\nu^2)} = cte \times E_i \quad (6-1)$$

el valor de K_i que consigamos nos permite sacar el módulo a indentación del material ensayado.

Como lo hemos visto en la validación del modelo, las variaciones del coeficiente C_i actúa sobre el valor de la fuerza máxima así como sobre la forma de la curva. Por otra parte, las variaciones de K_i influyen sobre el valor del tiempo de contacto.

Entonces, para conseguir el ajuste, se trabaja en 2 etapas: primero se ajusta el tiempo de contacto con el coeficiente K_i y luego, una vez ajustado ese parámetro, se toca el valor de C_i para ajustar el valor de la fuerza máxima.

Las curvas experimentales fuerza-tiempo superpuestas con sus respectivos ajustes numéricos se muestran en las figuras 6.10a, 6.10b y 6.10c.



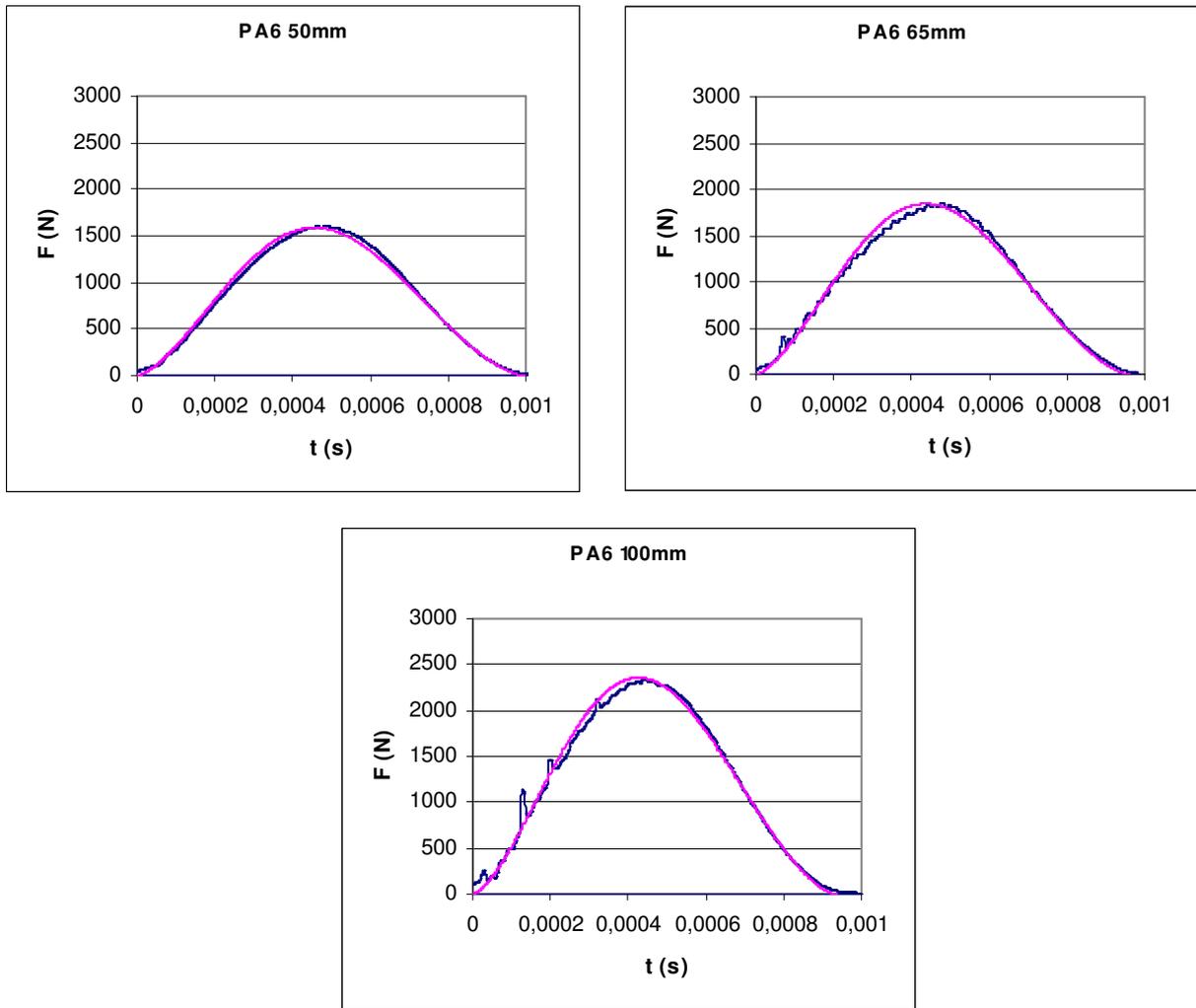
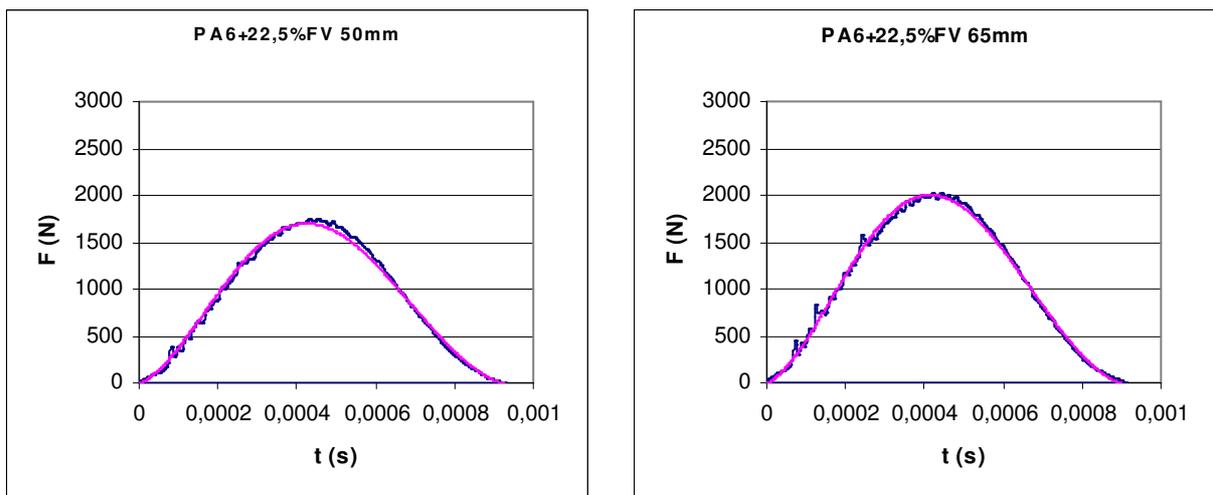


Figura 6.10a: — curvas experimentales de indentación para la PA6, — ajustes numéricos



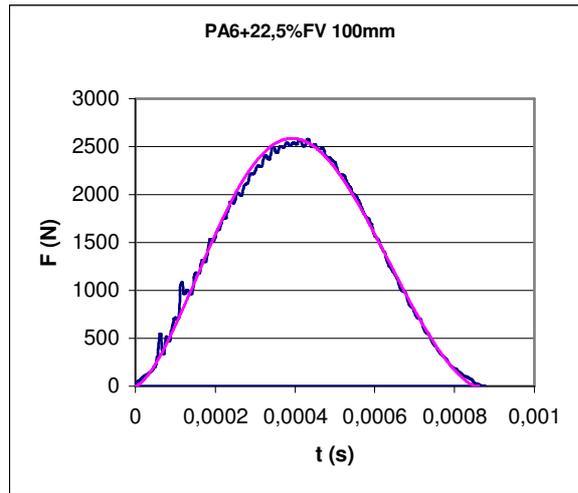


Figura 6.10b: — curvas experimentales de indentación para la PA6+22,5% de fibra de vidrio, — ajustes numéricos

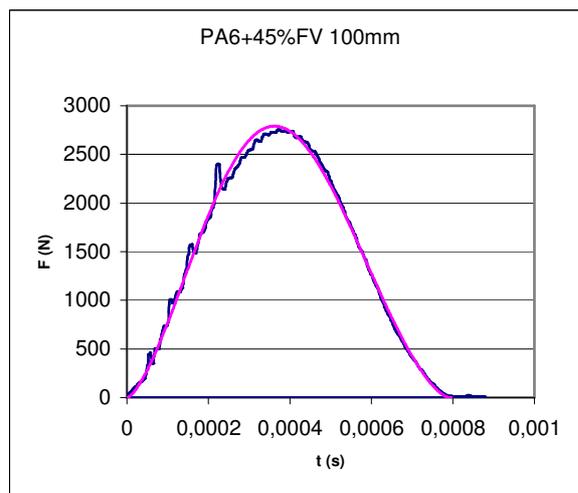
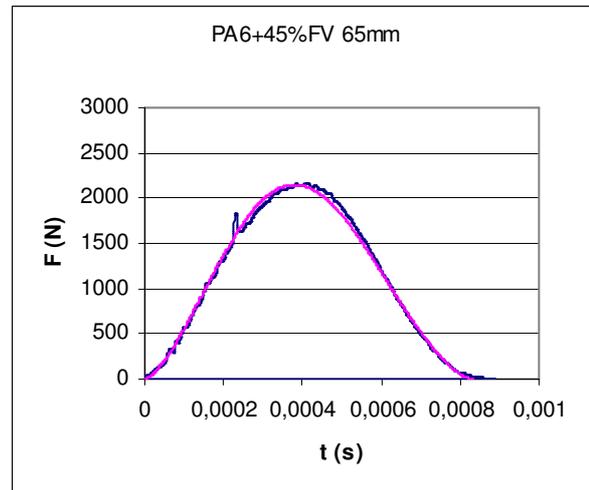
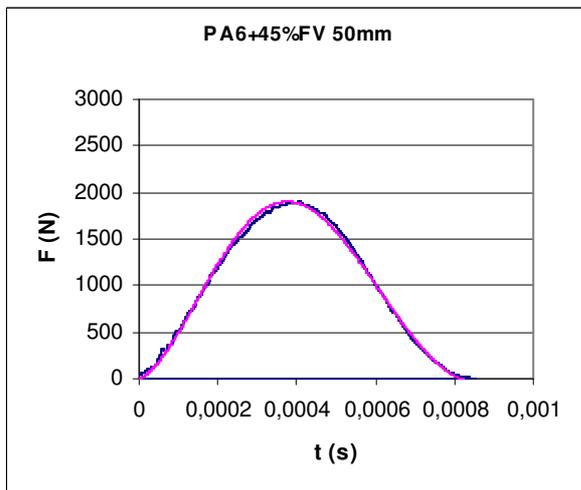


Figura 6.10c: — curvas experimentales de indentación para la PA6+45% de fibra de vidrio, — ajustes numéricos



Se puede apreciar que para cada prueba se consigue un ajuste bastante bueno por lo que la validez del modelo serie parece justificada.

Los valores de los módulos elásticos a indentación se grafican en la figura 6.11.

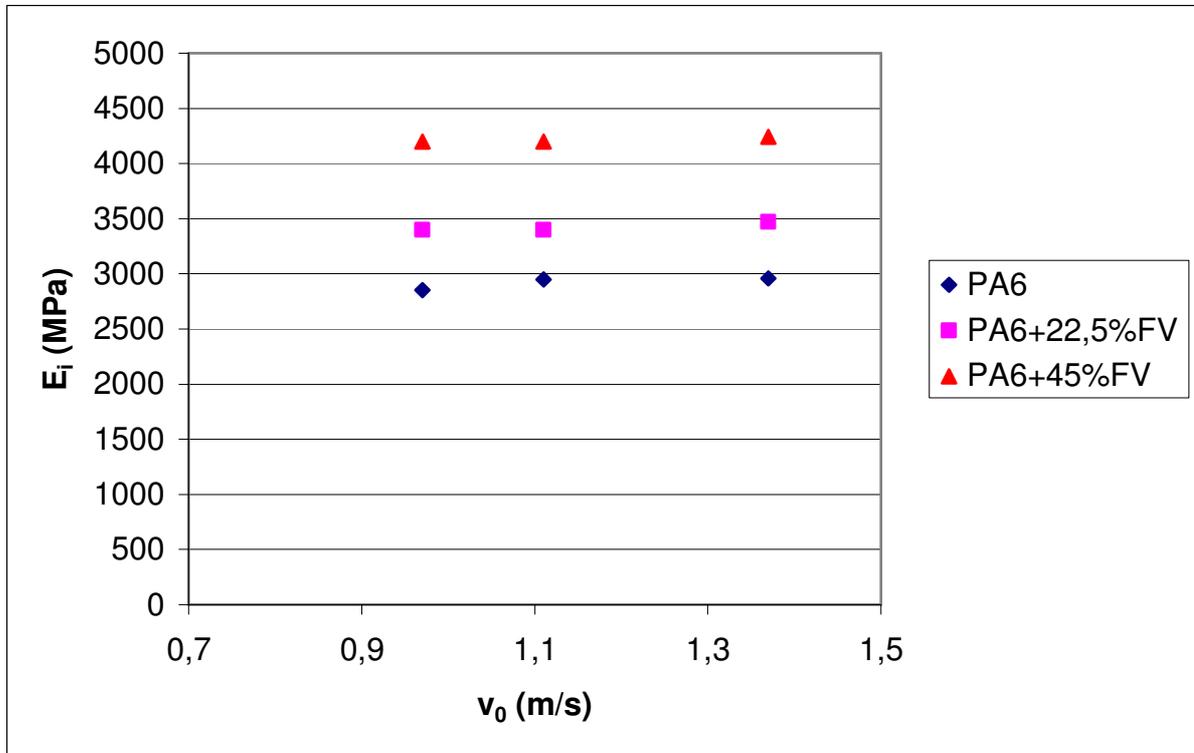


Figura 6.11: módulos elásticos a indentación de cada mezcla

Como se suponía, se puede notar un ligero aumento del módulo con la velocidad de impacto debido a la naturaleza viscoelástica de los materiales ensayados.

En la tabla 6.3 se listan los valores promedios de E_i para cada mezcla.

2 puntos nos permiten afirmar la coherencia de estos valores:

- E_i aumenta con el aumento de la tasa de fibra.

- se sigue la ley de las mezclas:
$$E_{i(PA6+22,5\%FV)} = \frac{E_{i(PA6)} + E_{i(PA6+45\%FV)}}{2}$$



Material	E_i promedio (MPa)
PA6	2920
PA6+22,5%FV	3420
PA6+45%FV	4210

Tabla 6.3: valores promedios de los módulos elásticos a indentación de cada mezcla

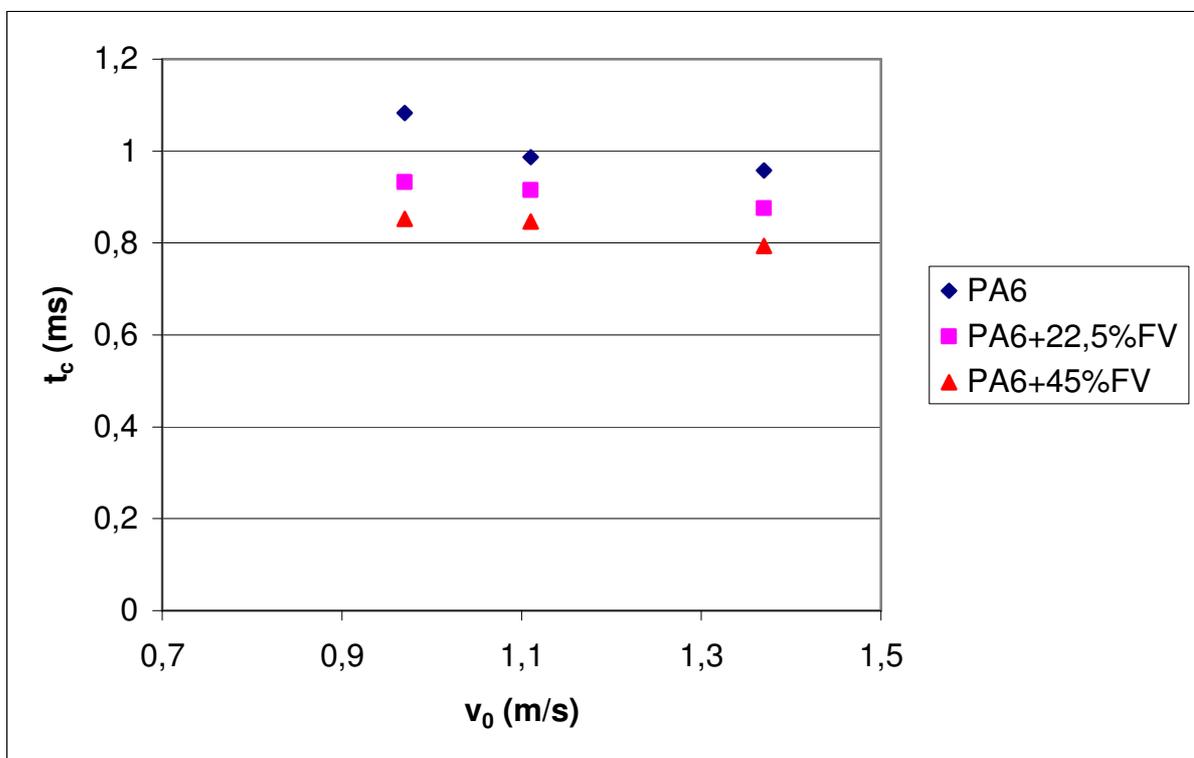


Figura 6.12: tiempo de contacto entre impactor y probeta en función de la velocidad de impacto



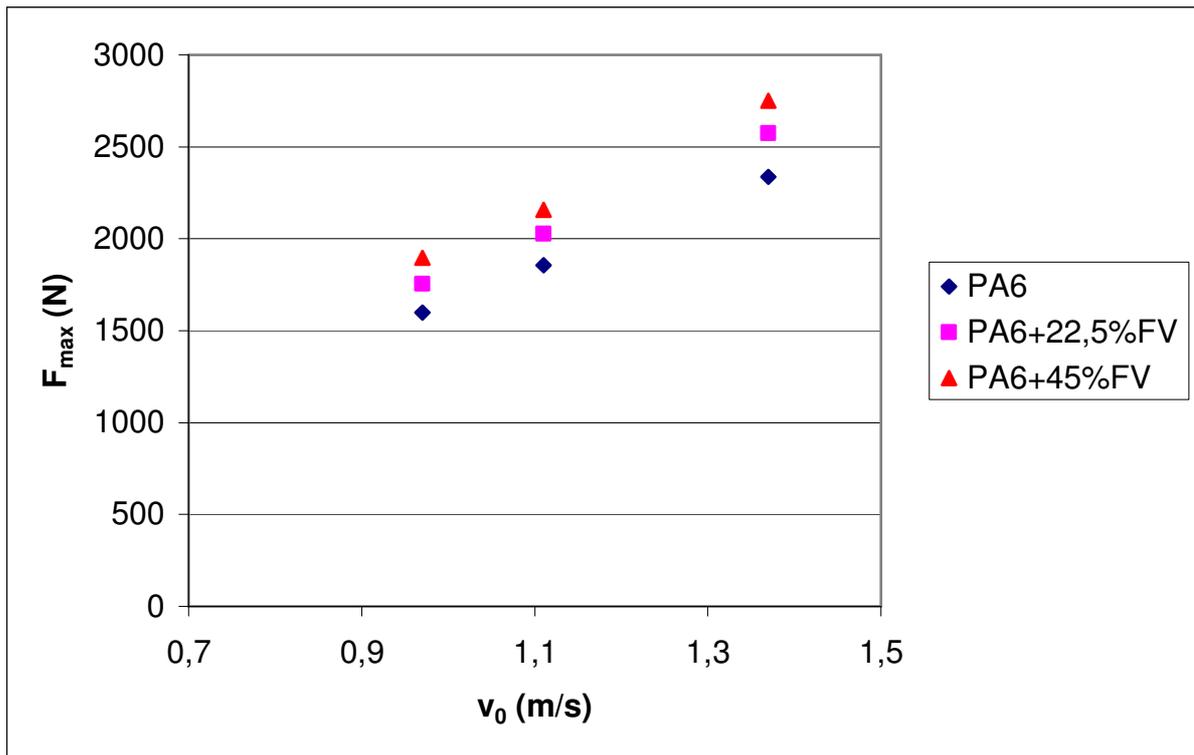


Figura 6.13: fuerza máxima registrada en función de la velocidad de impacto

En las figuras 6.12 y 6.13, se pueden observar las gráficas de tiempo de contacto entre el impactor y la probeta y de la fuerza máxima registrada, ambos en función de la velocidad de impacto v_0 . Aquí también los valores son coherentes ya que, como se puede prever, un incremento de la velocidad de impacto produce una disminución del tiempo de contacto y un aumento de la fuerza máxima.



6.3 Flexión + indentación

Para caracterizar el comportamiento a flexión + indentación de los 3 materiales que nos interesan, se hicieron varias pruebas variando la altura de caída del dardo teniendo cuidado a no alcanzar el límite de fuerza permisible por el equipo.

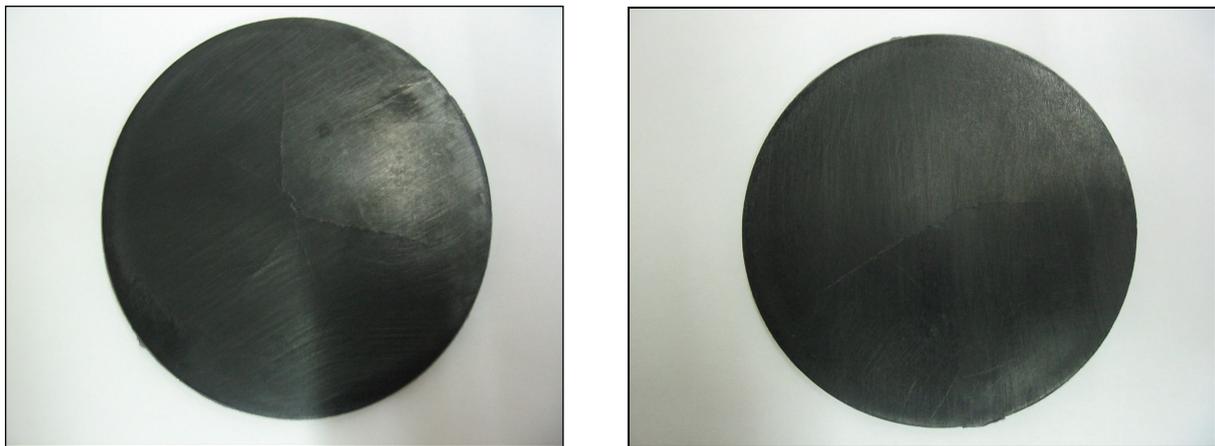


Figura 6.14: visualización de los daños provocados por el impacto

Cada prueba nos permite registrar una curva de fuerza en función del tiempo. Como para los ensayos de indentación, se intenta ajustar la curva numérica calculada a partir del modelo indentación serie + flexión paralelo (ver apartado 4.2).

Para lograr el ajuste deseado, se pueden cambiar los valores de varios parámetros: E_i , E_f , C_i , C_f , K_i y K_f .

De estos seis parámetros, ya conocemos dos: los ensayos de indentación nos han permitido determinar E_i y K_i para cada material. Nos quedan 4 parámetros pero como K_f y E_f están ligados con la relación:

$$K_f = \frac{4\pi e^3 E_f}{3(1-\nu)(3+\nu)r^2} \quad (6-2)$$

se puede lograr el ajuste haciendo variar los 3 parámetros E_f , C_f y C_i .

En las figuras 6.15, 6.16 y 6.17 se pueden ver los ajustes obtenidos mediante este modelo en diferentes ensayos realizados.



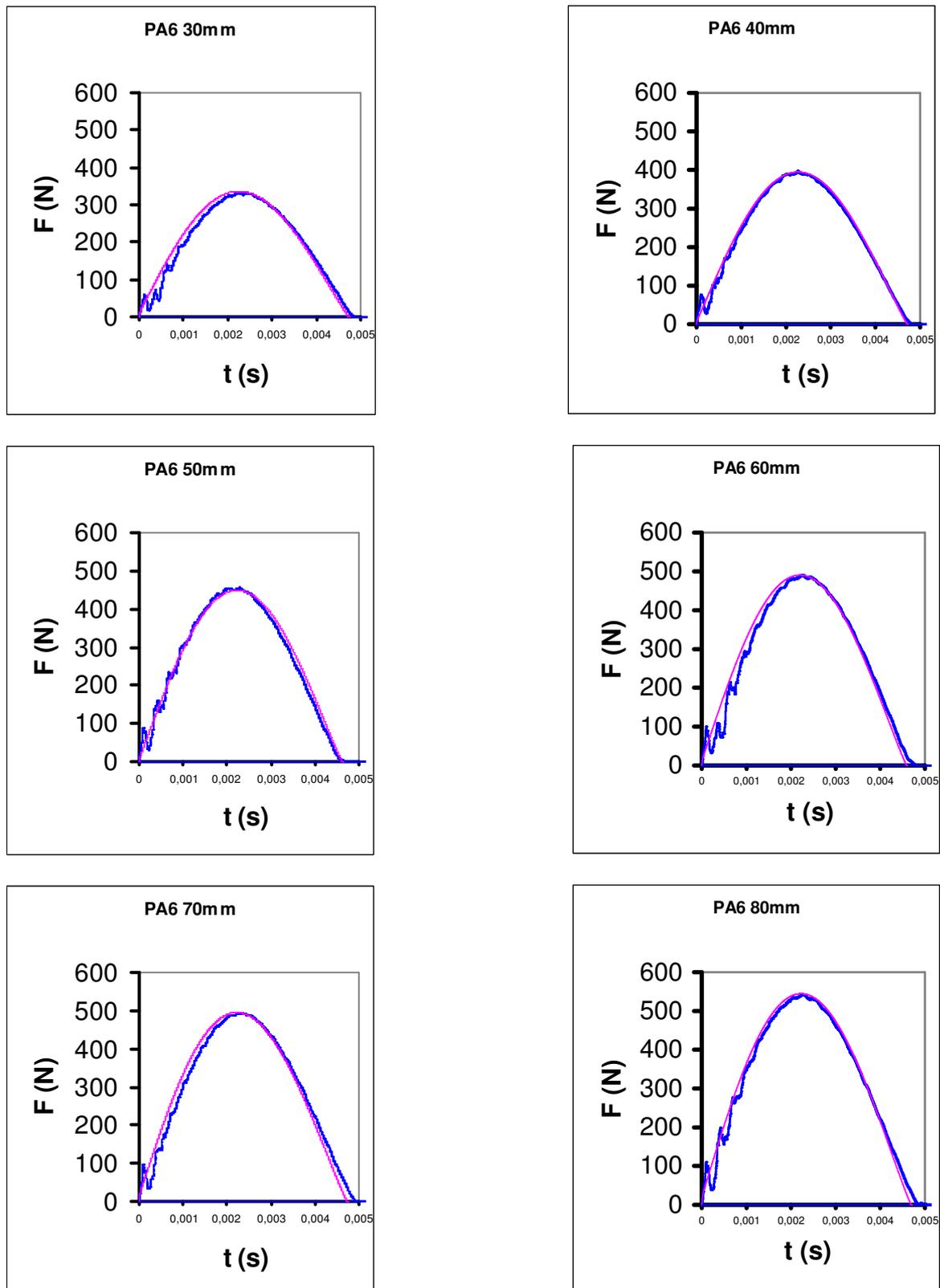


Figura 6.15: — curvas experimentales de flexión indentación para la PA6 a diferentes alturas de caída del dardo, — ajustes numéricos



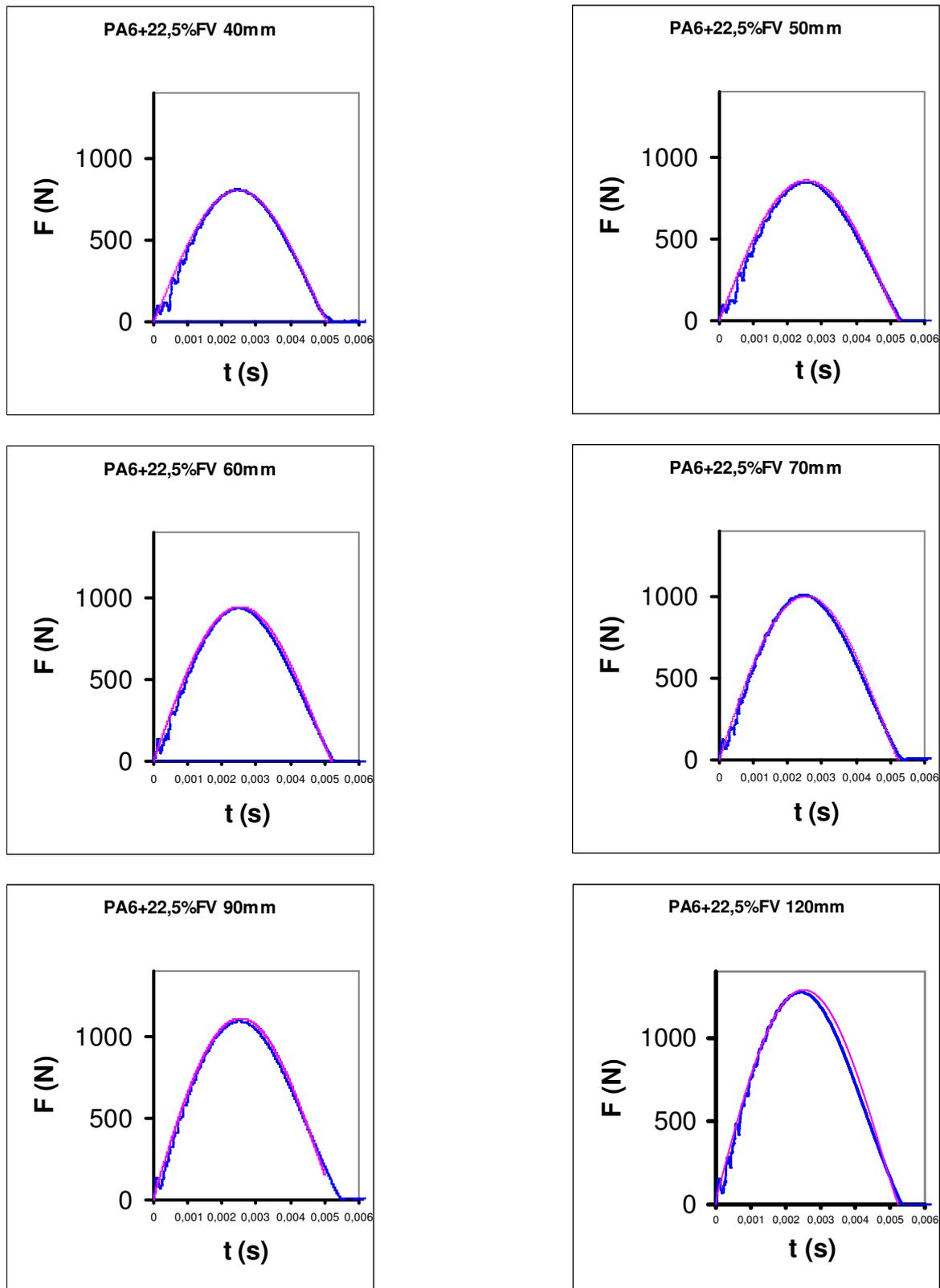


Figura 6.16: — curvas experimentales de flexión indentación para la PA6+22,5% FV a diferentes alturas de caída del dardo, — ajustes numéricos



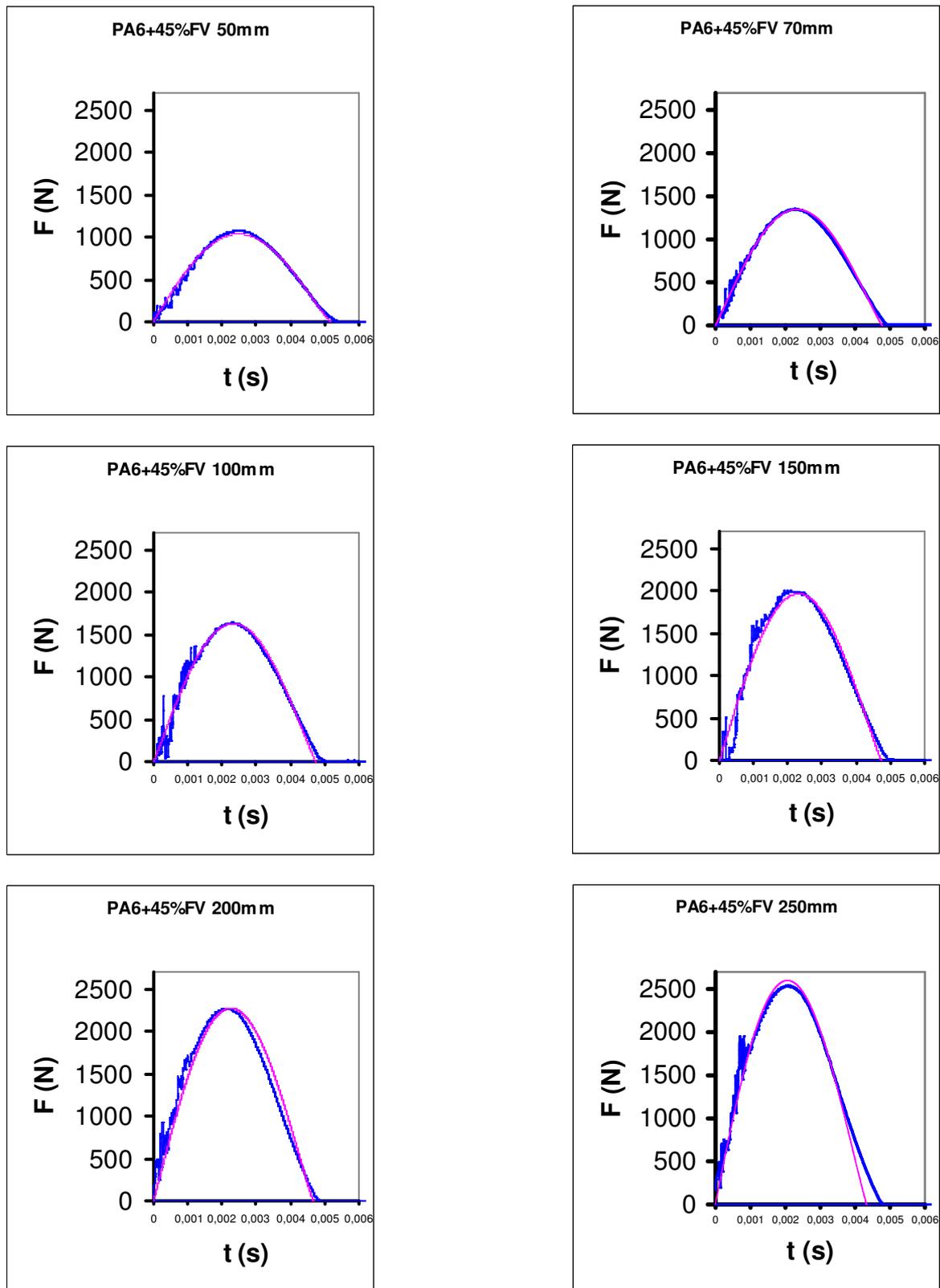


Figura 6.17: — curvas experimentales de flexión indentación para la PA6+45% FV a diferentes alturas de caída del dardo, — ajustes numéricos



Se puede apreciar en estas figuras que el ajuste obtenido es bastante aceptable, en especial en los valores de velocidades bajas. Para mayores velocidades, el comportamiento presenta un cierto separamiento de la fase de recuperación en las curvas debido a una deformación plástica demasiado importante que el modelo no tiene en cuenta.

De los ajustes realizados, se consiguieron los parámetros representativos de cada material. En la figura 6.18 se representa la variación del módulo de flexión E_f en función del contenido en fibra del material.

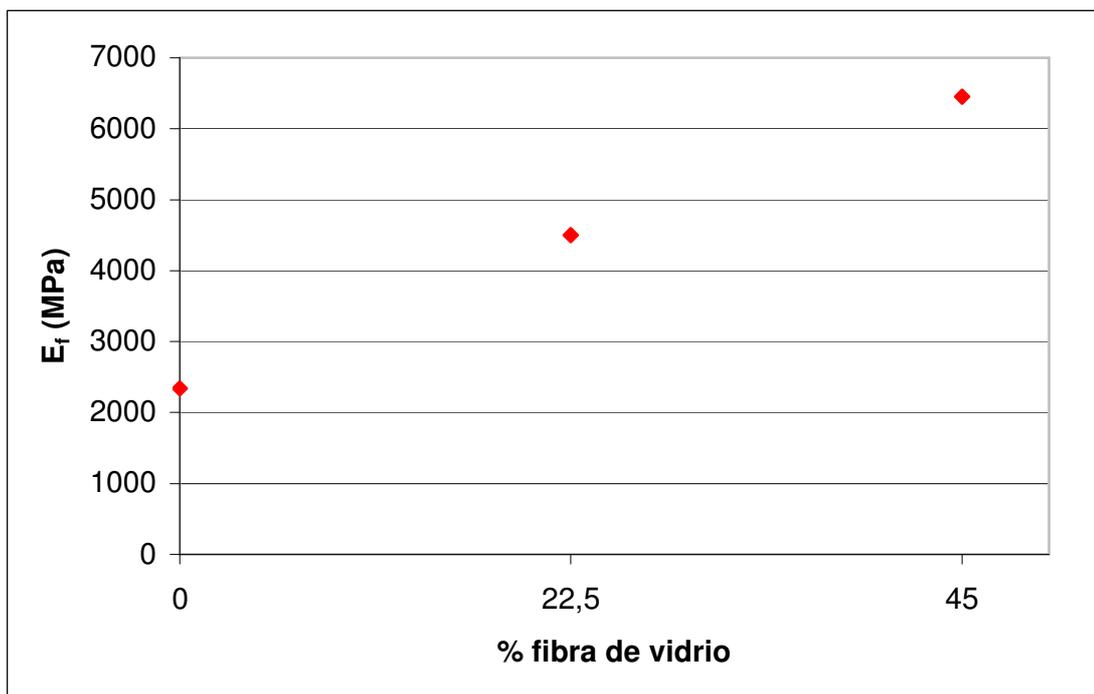


Figura 6.18: variación del módulo de flexión en función del contenido en fibra de vidrio

Como cabía esperar, el módulo a flexión aumenta con el contenido en fibra de material. Aquí también notamos que se cumple perfectamente la ley de las mezclas. Se ve que existe una variación mayor del módulo de flexión con el contenido en fibra respecto al módulo de indentación. Eso se debe a que en flexión hay una componente de tracción mientras en indentación el material trabaja a compresión y por lo tanto la fibra no actúa.

En las figuras 6.19, 6.20 y 6.21 se puede apreciar la evolución de los diferentes parámetros para los distintos materiales en función de la velocidad de impacto.



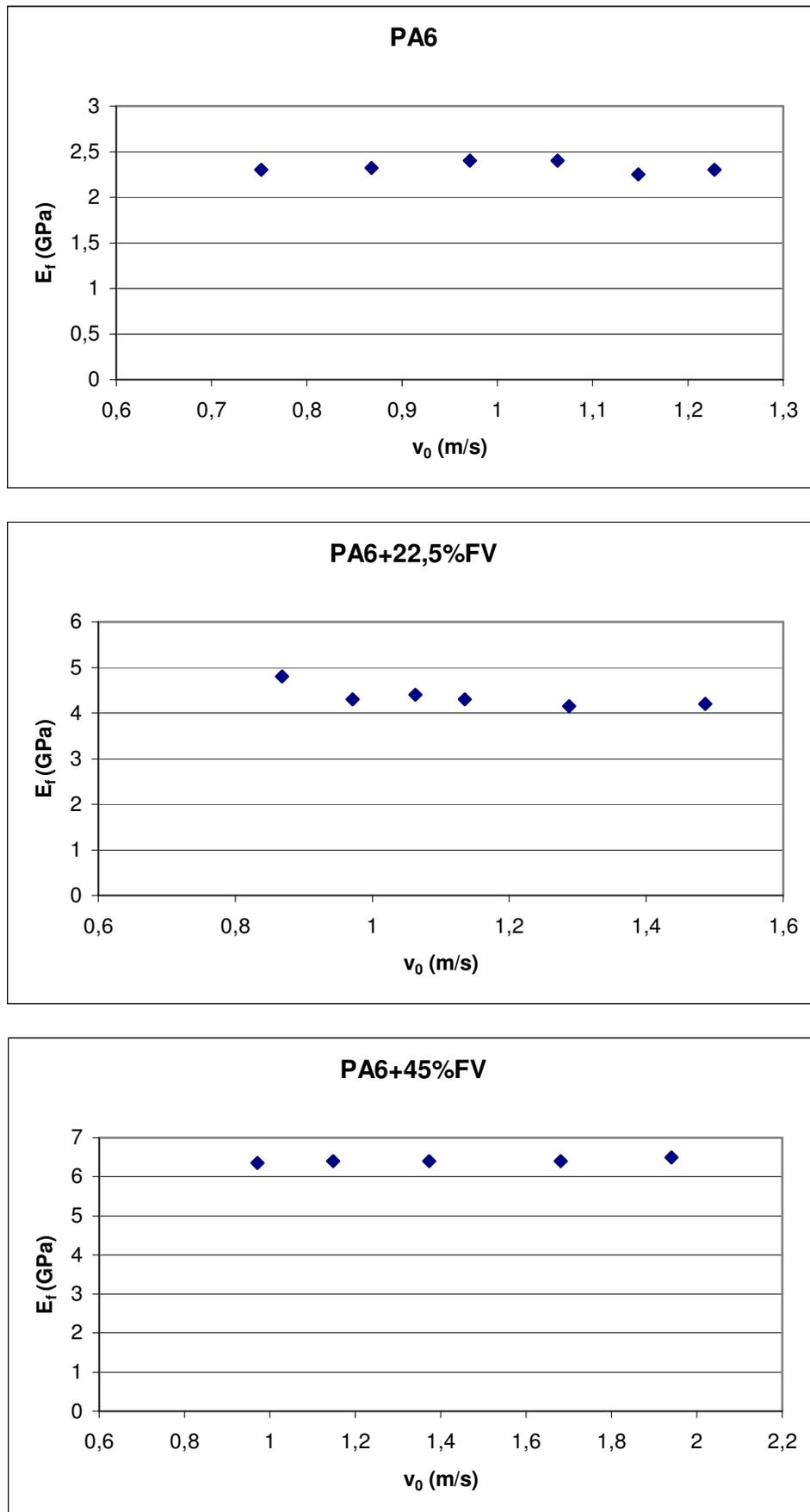


Figura 6.19: variación del módulo de flexión en función de la velocidad de impacto



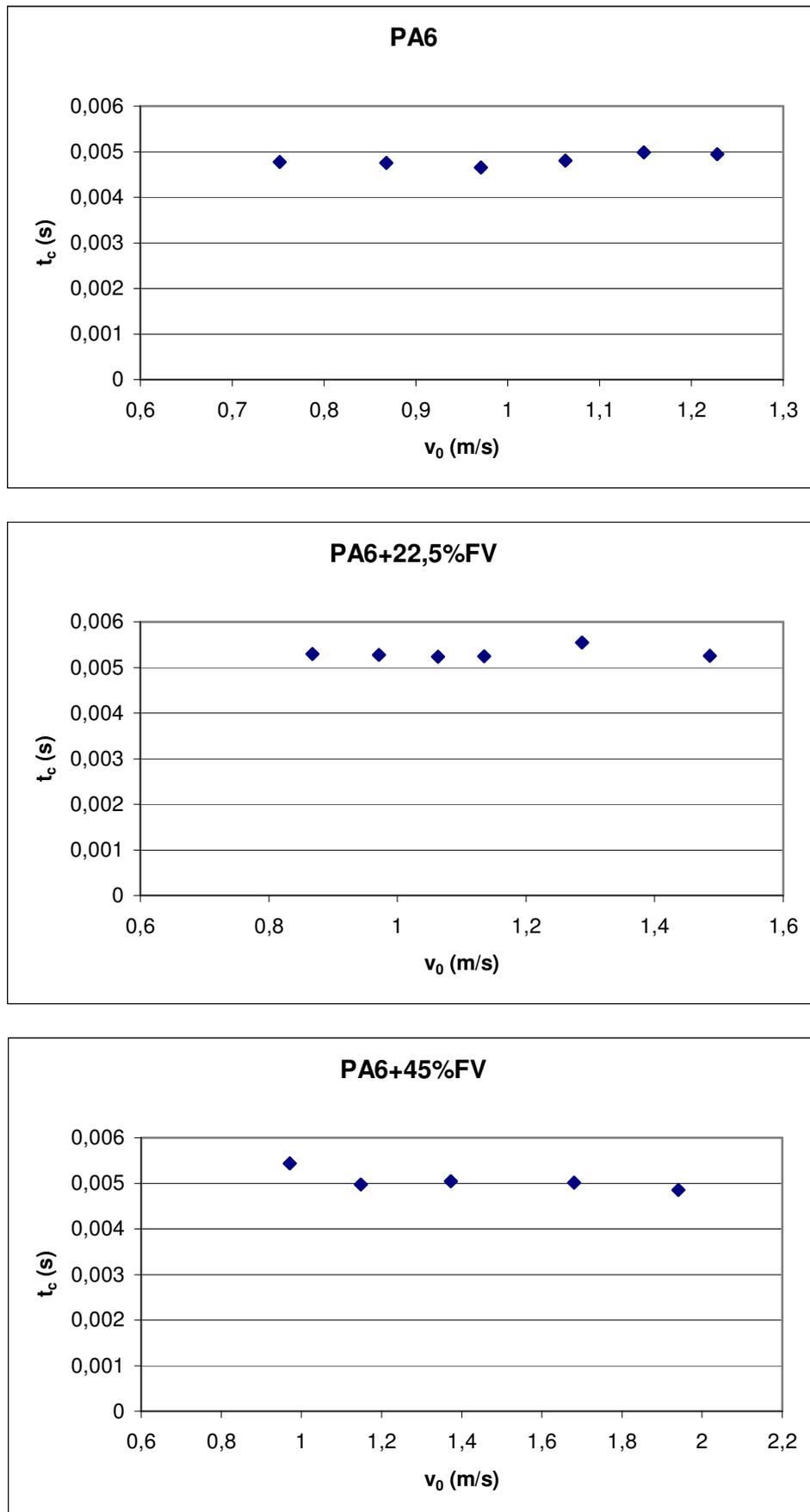


Figura 6.20: variación del tiempo de contacto en función de la velocidad de impacto



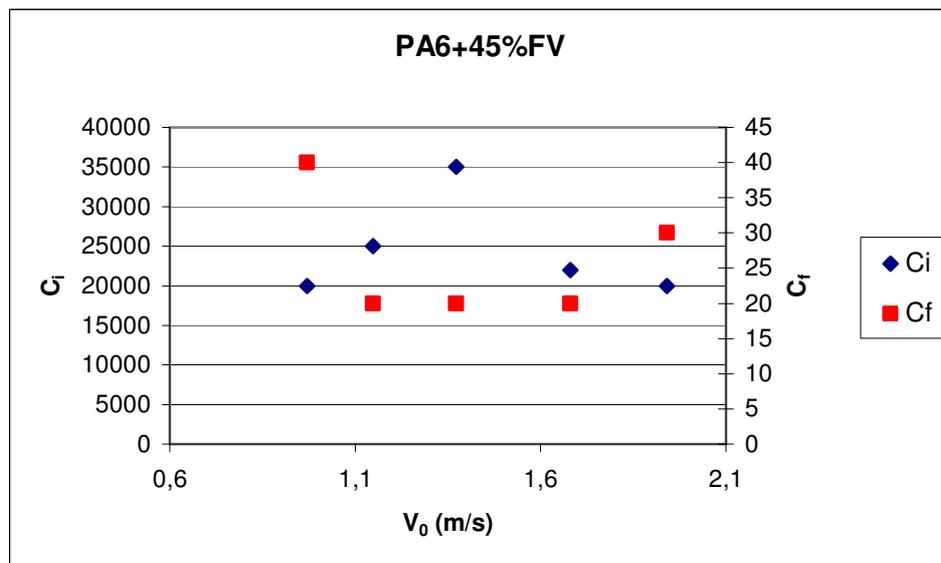
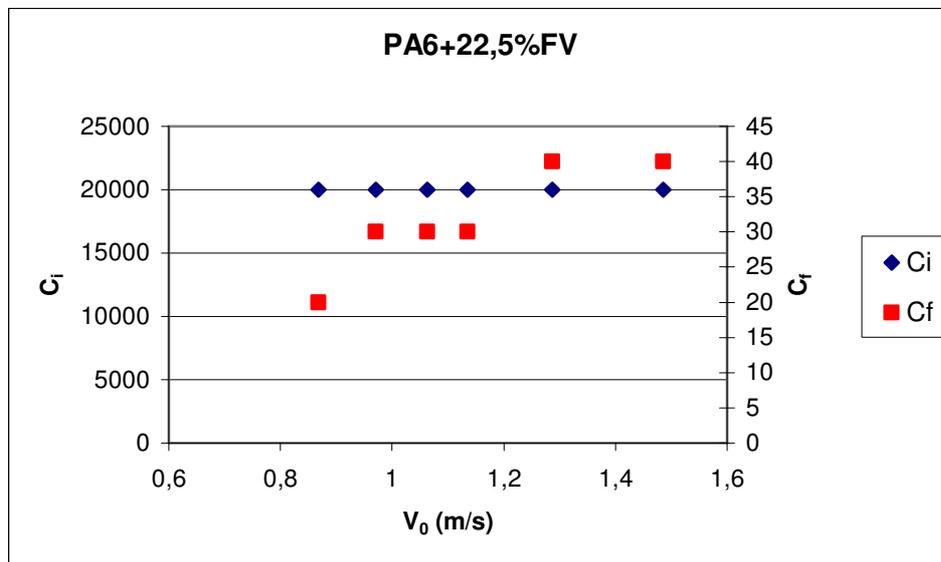
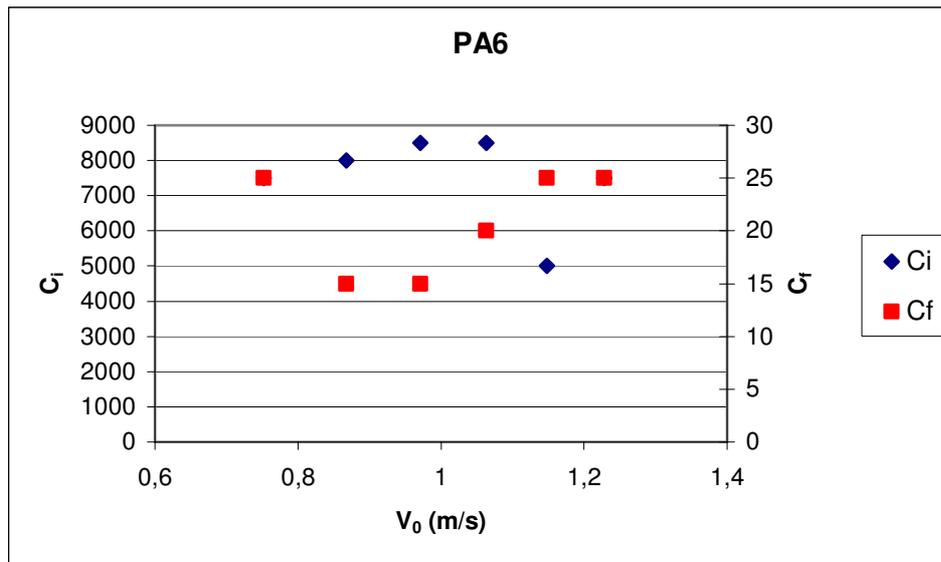


Figura 6.21: variación de C_i y C_f en función de la velocidad de impacto



Respecto al módulo de flexión y al tiempo de contacto, se aprecia un valor constante.

Respecto a C_f y C_i , cabe destacar que el valor de C_i es considerablemente mayor que el de C_f , lo que nos indica que las mayores pérdidas se deben a los efectos de flexión.

En la PA6 no reforzada, la diferencia entre C_i y C_f es mucho menor que para las poliamidas reforzadas. Eso nos indica que la influencia de la indentación es mayor cuando el material no lleva carga; lo que parece lógico ya que la poliamida no reforzada es más blanda que la que lleva fibra.



6.4 Impacto-tracción

Los primeros ensayos de impacto-tracción se hicieron con un ángulo de caída del péndulo de 150° lo que corresponde a una velocidad de impacto de 3,70 m/s. En la figura 6.22 se pueden ver algunas de las curvas fuerza vs. Tiempo registradas. Se puede apreciar que aparecen muchas oscilaciones. Aquellas oscilaciones se deben principalmente a los efectos dinámicos que se producen a esta velocidad ya que al recibir el impacto, la mordaza móvil tiende a salir mas de prisa que el péndulo generando un contacto discontinuo entre los 2 elementos.

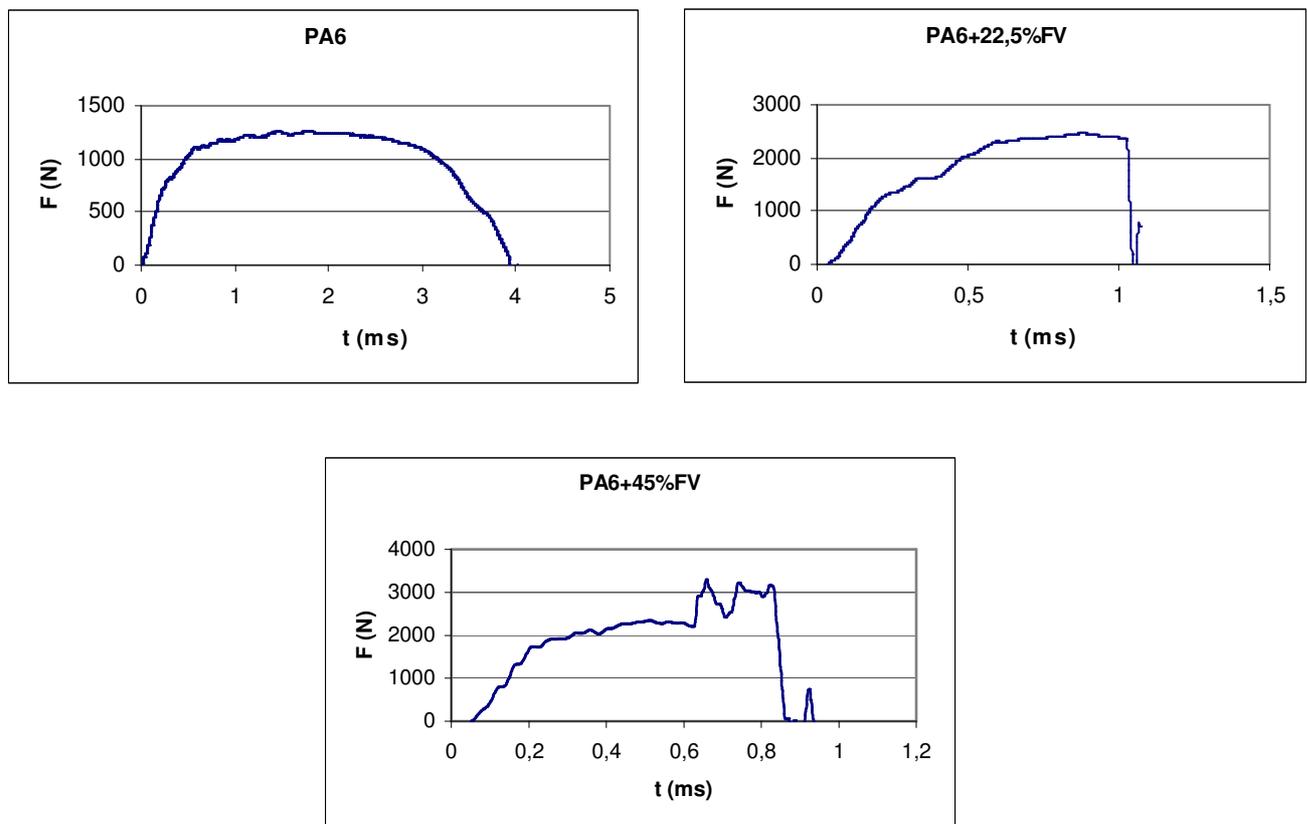


Figura 6.22: curvas típicas registradas con un ángulo de caída de 150°

Estas importantes oscilaciones pueden inducir en error a la hora de buscar el modulo elástico del material ensayado. Por lo tanto, no se pueden procesar los datos procedentes de estos ensayos.

Para reducir la aparición de los efectos dinámicos, decidimos trabajar con velocidades de impacto menores (entre 0,5 y 1,6 m/s). Además de reducir la altura de caída del péndulo, se colocó unas cintas de plastilina sobre la parte del impactor que entra en contacto con la mordaza móvil. Estos elementos juegan un papel de amortiguadores en el momento del impacto y así permiten que se mantenga el contacto entre mordaza e impactor.



El efecto de la amortiguación se puede ver en la figura 6.23 donde se muestran las curvas registradas para 2 ensayos hechos en las mismas condiciones, uno con amortiguación y otro no.

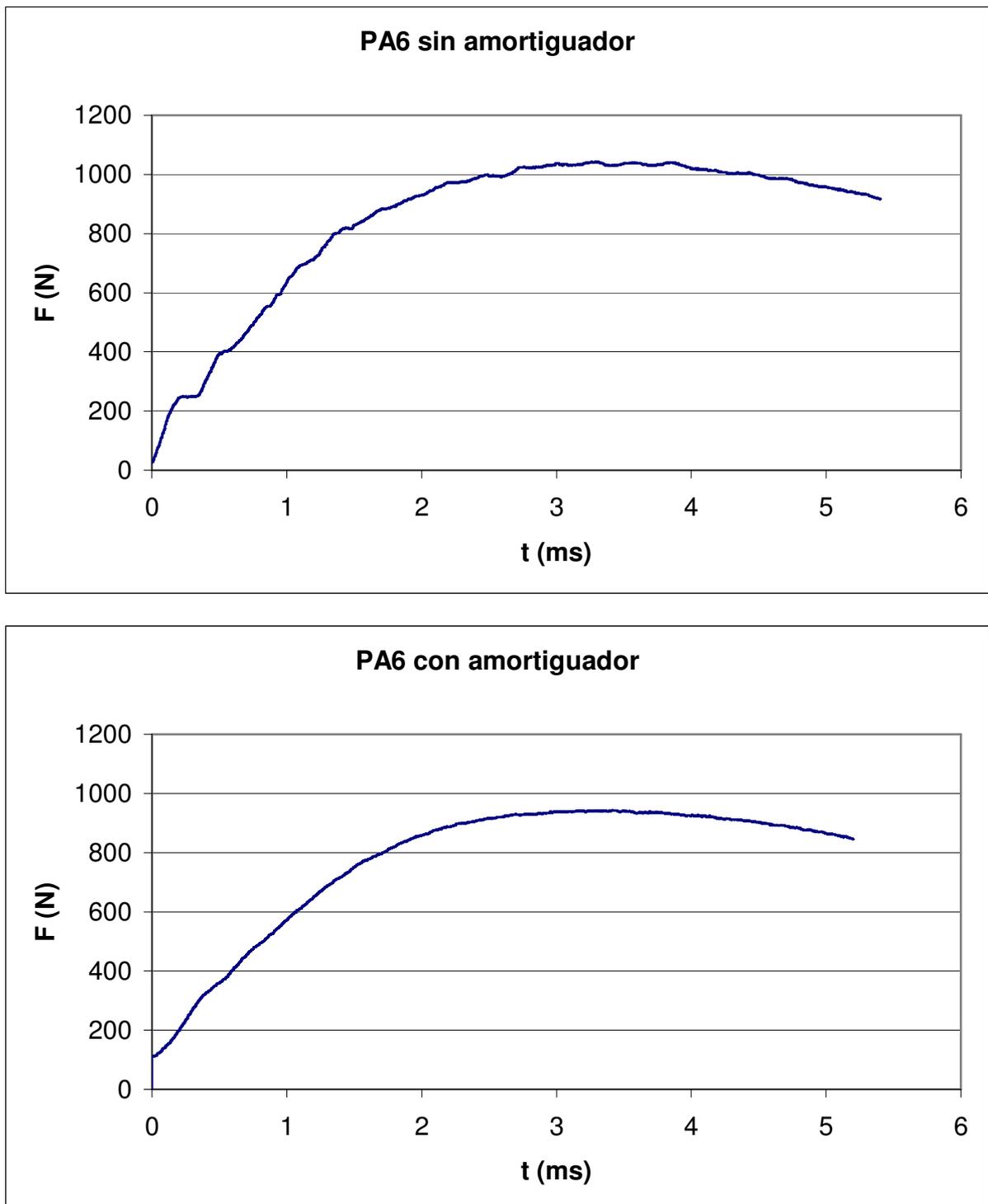


Figura 6.23: visualización del efecto de la amortiguación en un ensayo de impacto-tracción



Se nota que las oscilaciones se atenúan con el amortiguador y eso nos permite sacar con más precisión informaciones de los ensayos realizados. También se ha de notar que la presencia de un amortiguador no afecta a los valores de fuerza registrada ya que la célula que mide la fuerza se encuentra en la mordaza fija del dispositivo y no en el impactor.

Como lo hemos visto en el apartado 5.1.1, las probetas de impacto-tracción fueron instrumentados mediante galgas extensométricas. Así, de cada ensayo pudimos sacar las informaciones siguientes:

- la fuerza que sufre la probeta,
- la deformación de la probeta dada por la maquina (calculada por doble integración de la fuerza),
- la tensión de salida en el puente de Wheatstone que se relaciona directamente con la elongación de la probeta medida por las galgas extensométricas.

En la figura 6.24 se pueden ver algunas curvas típicas que se obtuvieron.



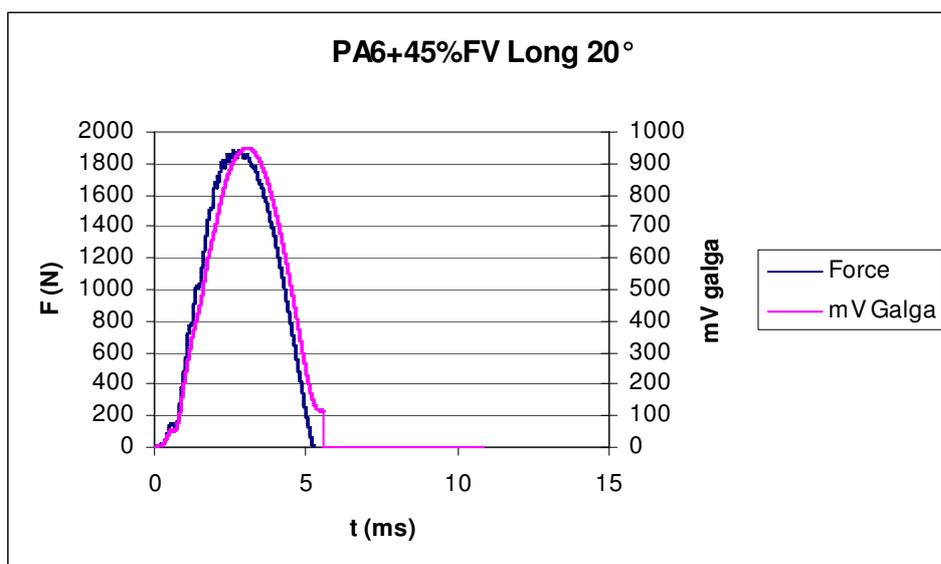
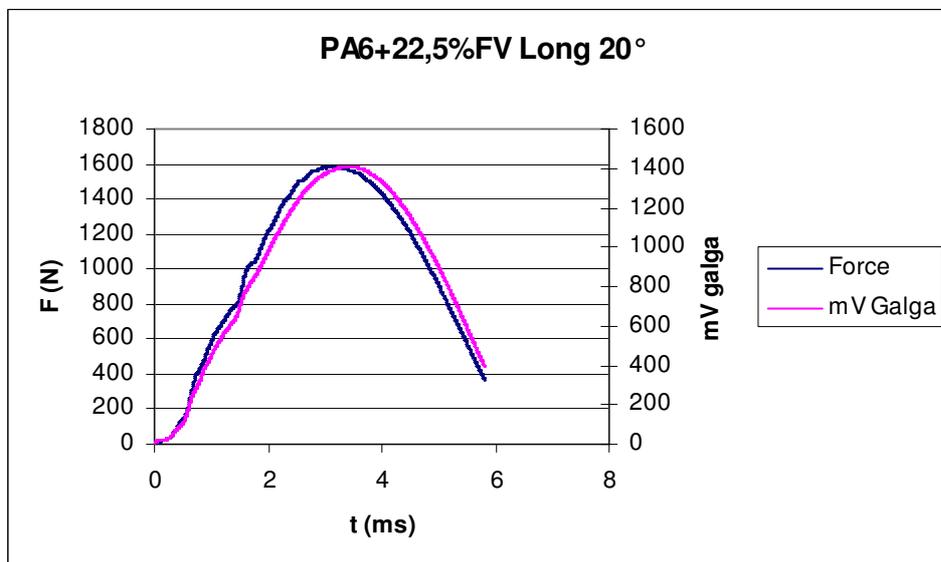
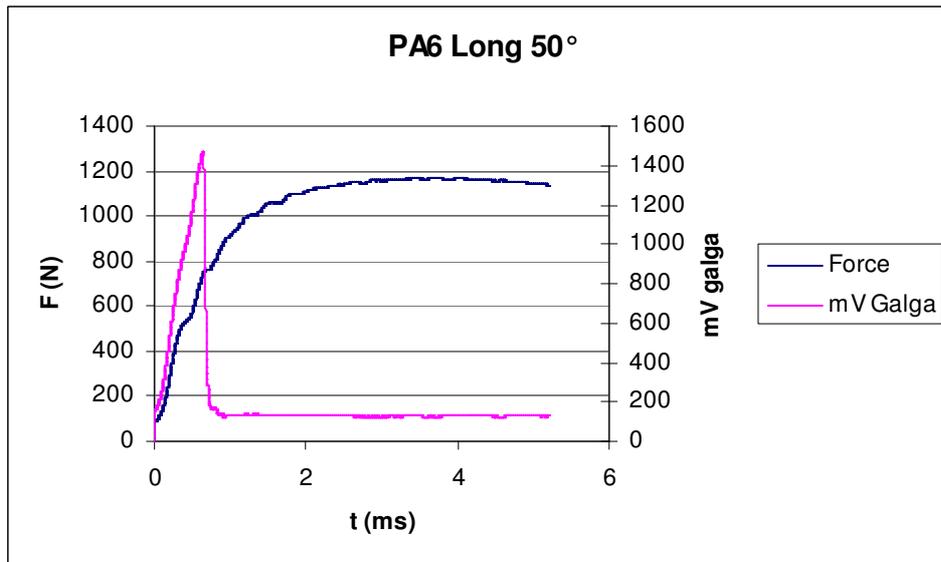


Figura 6.24: curvas típicas obtenidas con probetas de tipo longitudinal



Se puede apreciar que en el caso de la PA6, la señal de la tensión de salida del puente de Wheatstone cae de repente al cabo de un cierto tiempo. Eso se explica porque las galgas empleadas tienen un límite de elongación dado por el fabricante de 3%.

Una vez exportados los datos, se procesan y se pueden representar las curvas de tensión en función de la elongación dada por la maquina por un lado y dada por las galgas por otro lado, como se puede ver en la figura 6.25.

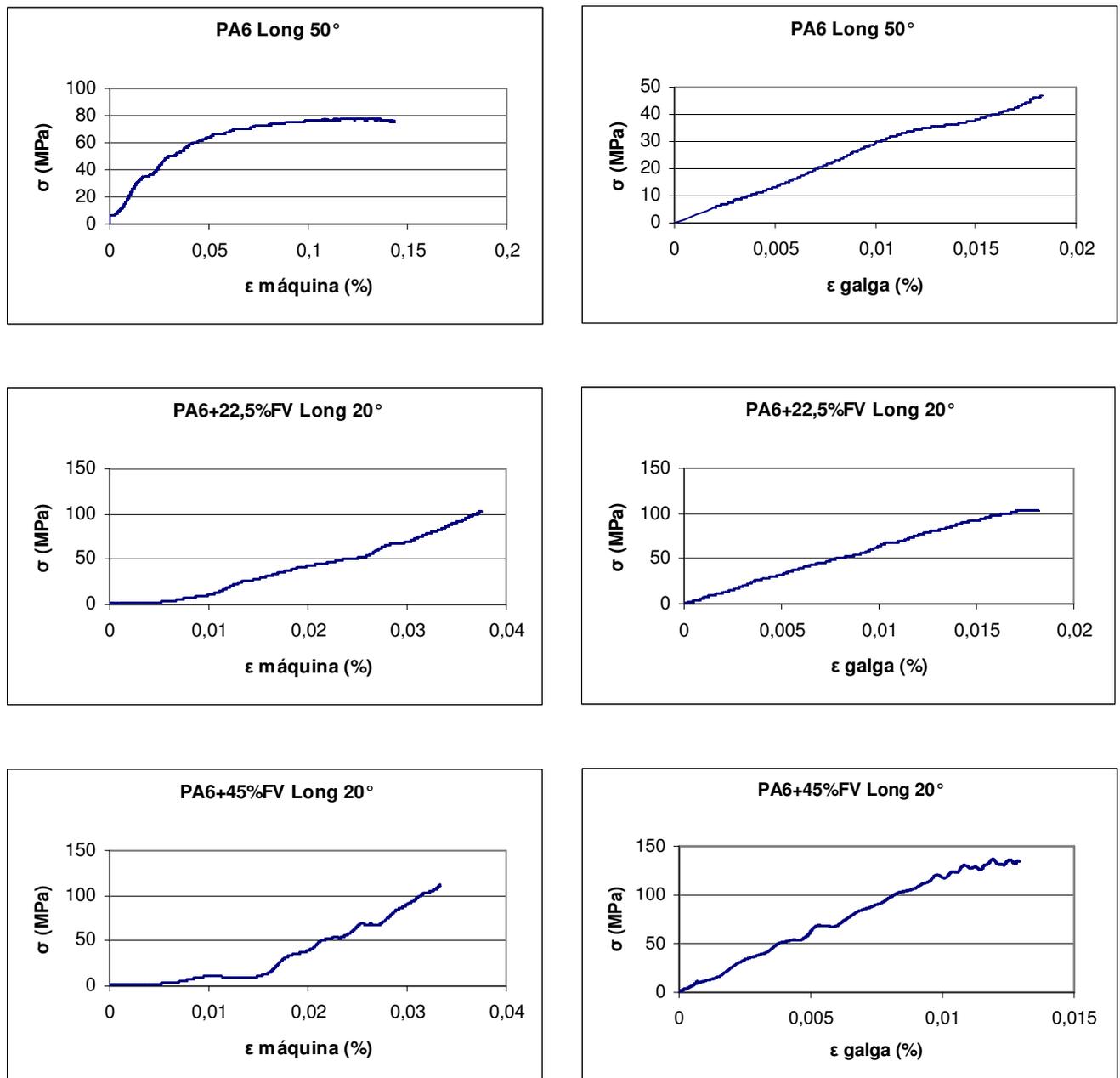


Figura 6.25: curvas stress vs. elongación dada por la maquina (izda) y stress vs. elongación dada por las galgas (dcha)



A partir de estas curvas podemos encontrar el modulo elástico dado por cada medio de medición. En el caso de la curva tensión vs. elongación de la galga, a veces la curva no es completa ya que como lo hemos visto antes, la elongación de la galga tiene un límite. Sin embargo, como nos interesa encontrar el modulo elástico, el principio de la curva es suficiente.

Los valores promedios de los módulos elásticos juntos con la tensión máxima se listan en la tabla 6.4.

	E máquina (GPa)	E galga (GPa)	σ max (MPa)
PA6 Long	1,29	2.3	60
PA6+22,5%FV Long	3,1	6.04	99
PA6+45%FV Long	5,4	11.6	130,5

Tabla 6.4: módulos y tensión máxima encontrados para cada material

Lo que destacamos de estos valores es que el modulo elástico calculado a partir de las mediciones extensométricas es 2 veces mayor que el modulo calculado a partir de los valores que nos da la maquina.

Si calculamos la velocidad de elongación $\dot{\epsilon}$ de cada probeta, podemos ver en la tabla 6.5 que dicha velocidad baja cuando para una altura de caída dada se amortigua el impacto. Eso tiene su lógica ya que antes de que empiece a deformarse la probeta, la cinta colocada sobre el impactor se deforma y por lo tanto la velocidad baja. También vemos, como cabía esperar, que la velocidad de elongación baja cuando el ángulo inicial del péndulo es más pequeño. Ahora, si comparamos la velocidad de elongación dada por la maquina con la velocidad de elongación dada por la galga, vemos que esta ultima es siempre menor, lo que explica las diferencias en los valores de los módulos.

Material	Ángulo	Amortiguado	$\dot{\epsilon}$ máquina ($^{\circ}$)	$\dot{\epsilon}$ galga ($^{\circ}$)
PA6	20°	Si	0,0173	0,0089
	20°	No	0,0183	0,0096
PA6+22,5%FV	20°	Si	0,0116	0,0072
	17°	No	0,0153	0,0061
PA6+45%FV	20°	Si	0,0168	0,0064
	17°	No	0,0156	0,0055

Tabla 6.5: velocidades de elongación en función de las condiciones de los ensayos



Si analizamos los valores de los módulos calculados a partir de los valores medidos por el equipo, se nota una cierta coherencia. En efecto, los valores se parecen a los valores conseguidos con los ensayos de tracción a 100mm/min lo que tiene su lógica ya que cuando hay mucha fibra orientada longitudinalmente, restringe el movimiento de la matriz y por lo tanto reduce los efectos de la componente viscosa del material. Es por eso que el modulo no se incrementa mucho aunque la velocidad del ensayo sea mucho mayor.

Ahora, el problema esta con los valores obtenidos a partir de las mediciones de las galgas. Unas de las causas que pueden explicar esta divergencia y que en el futuro habrá que investigar para conseguir solucionar el problema son las siguientes:

- los efectos dinámicos que aunque sean reducidos pueden hacer que las galgas midan mal,
- un problema de software al utilizar 2 canales de medidas,
- una mala calibración del equipo de impacto-tracción.



6.5 Flexión de probetas SENB

Aquí se presentan los resultados de los ensayos de mecánica de la fractura realizados sobre las mezclas de PA6 + fibra de vidrio. Se hicieron ensayos con especímenes de prueba SENB (Single Edge Notched Bend).

6.5.1 Determinación del factor K_{IC}

Para determinar el factor K_{IC} para cada mezcla, hicimos varios ensayos sobre probetas SENB variando la profundidad (a) de la entalla. La velocidad de impacto era de 1 m/s y la distancia entre los apoyos del soporte donde se coloca la probeta era de 70mm.

En la figura 6.26 se pueden ver las curvas conseguidas después de haber ensayado probetas sin ninguna amortiguación del golpe. Se puede apreciar que las oscilaciones son importantes y por lo tanto la determinación de la pendiente resulta ser difícil y el riesgo de errores es muy alto.

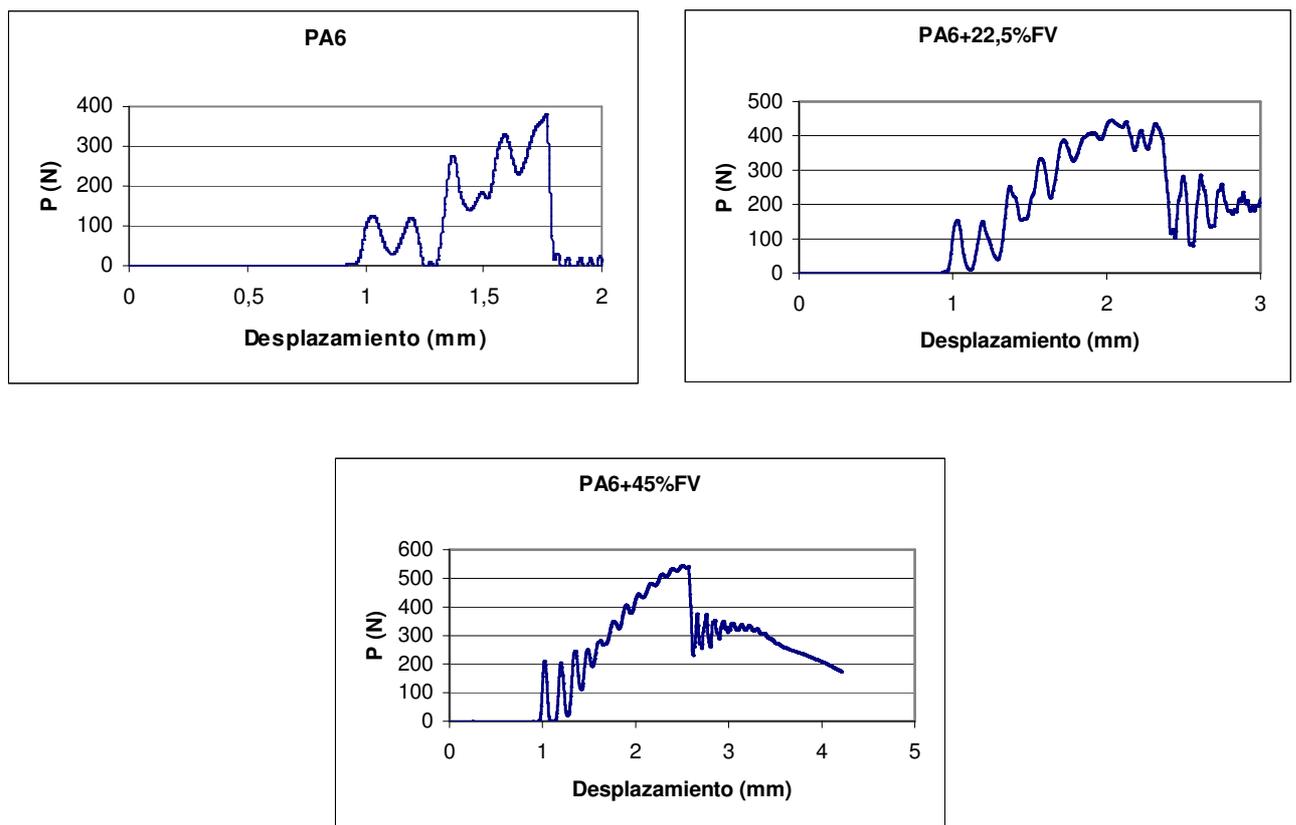


Figura 6.26: curvas típicas obtenidas con ensayos sin amortiguación



Para atenuar estas oscilaciones pusimos una cinta amortiguadora sobre la probeta, en el lugar donde impacta el péndulo.

Las curvas que se registran entonces no tienen tantas oscilaciones como se puede apreciar en la figura 6.27.

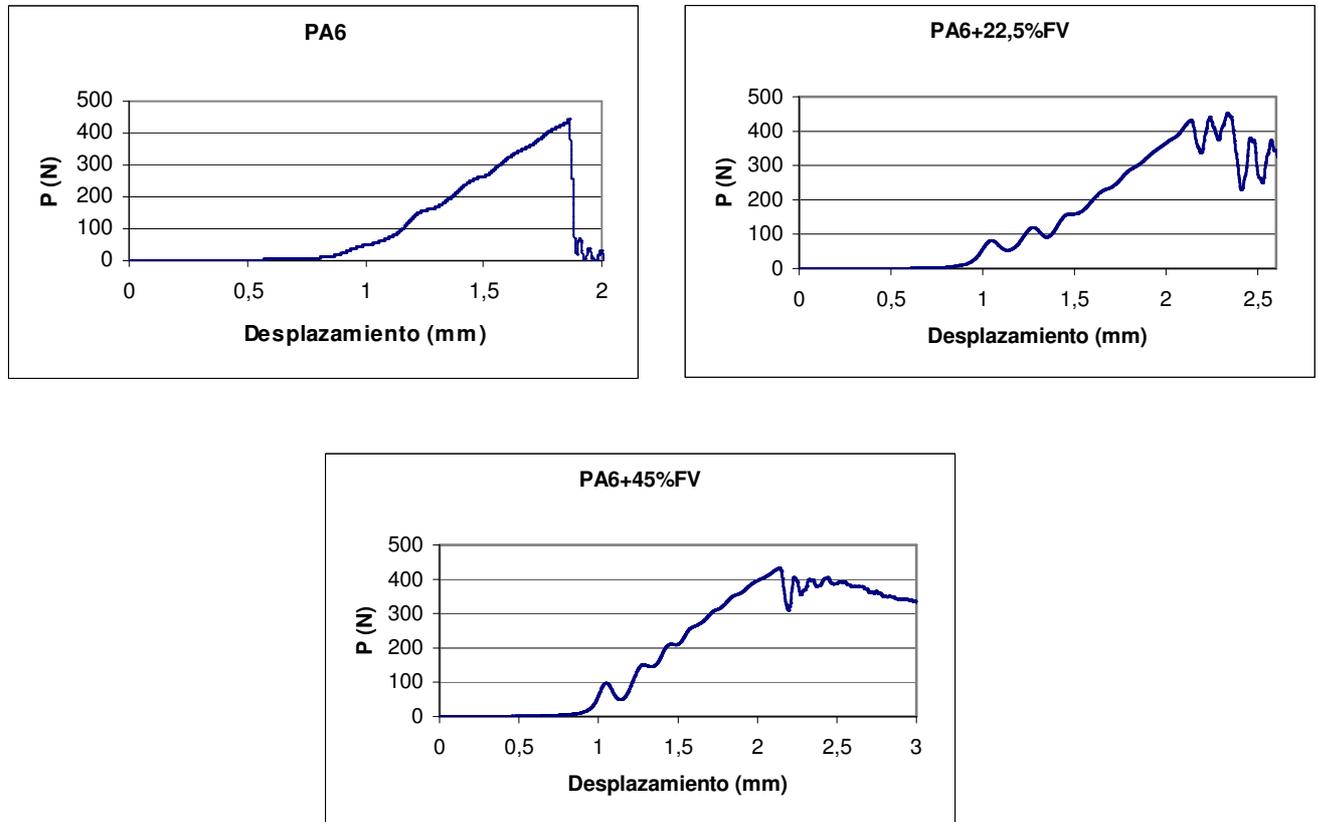


Figura 6.27: curvas típicas obtenidas con ensayos con amortiguación

Por lo tanto, la pendiente de la parte inicial de la curva se puede dibujar con menos errores. Para cada ensayo se grafica la curva de carga en función del desplazamiento. Luego, se grafican la pendiente de la parte inicial de la curva y la pendiente reducida de un 5% respecto a la tangente inicial. Tenemos 2 casos posibles :

- si como en la figura 6.28a el punto que corresponde a la carga máxima se encuentra entre las dos pendientes, tomamos $P_Q = P_{\max}$.
- si como en la figura 6.28b la carga máxima se encuentra fuera de la zona delimitada por las 2 pendientes, tomamos como valor de la carga en el punto de intersección entre la curva y la pendiente reducida del 5%.



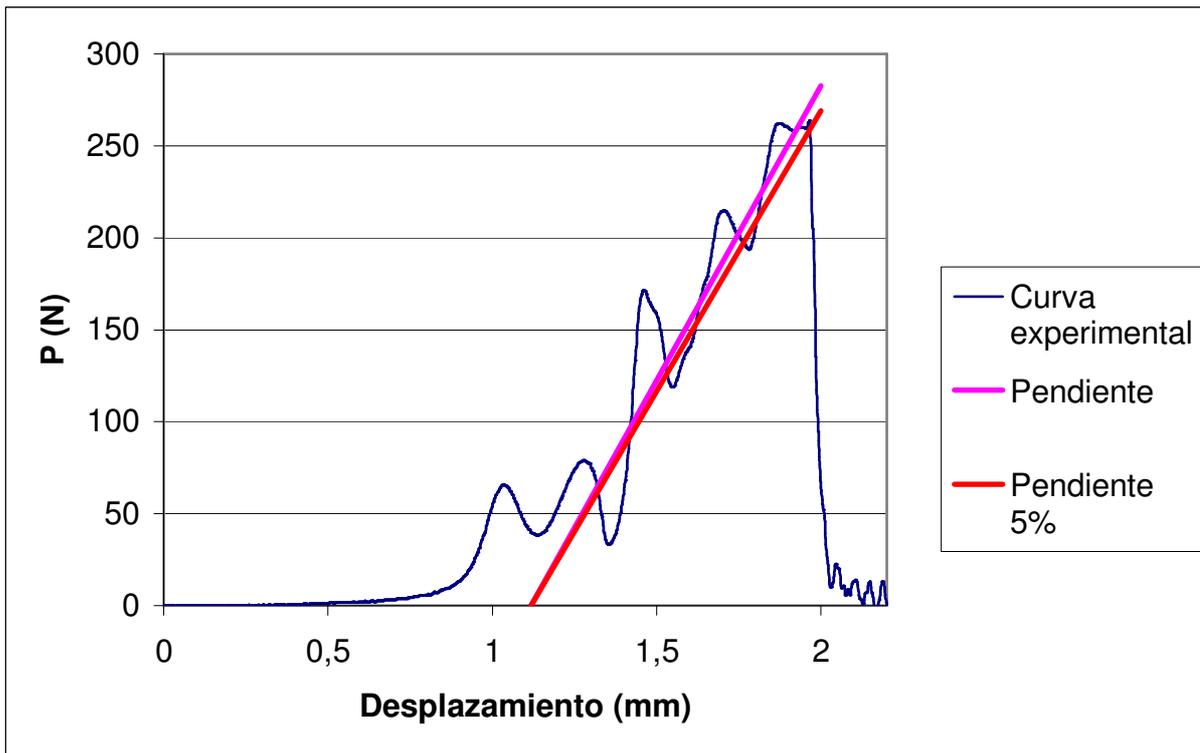


Figura 6.28a: caso $P_Q = P_{max}$

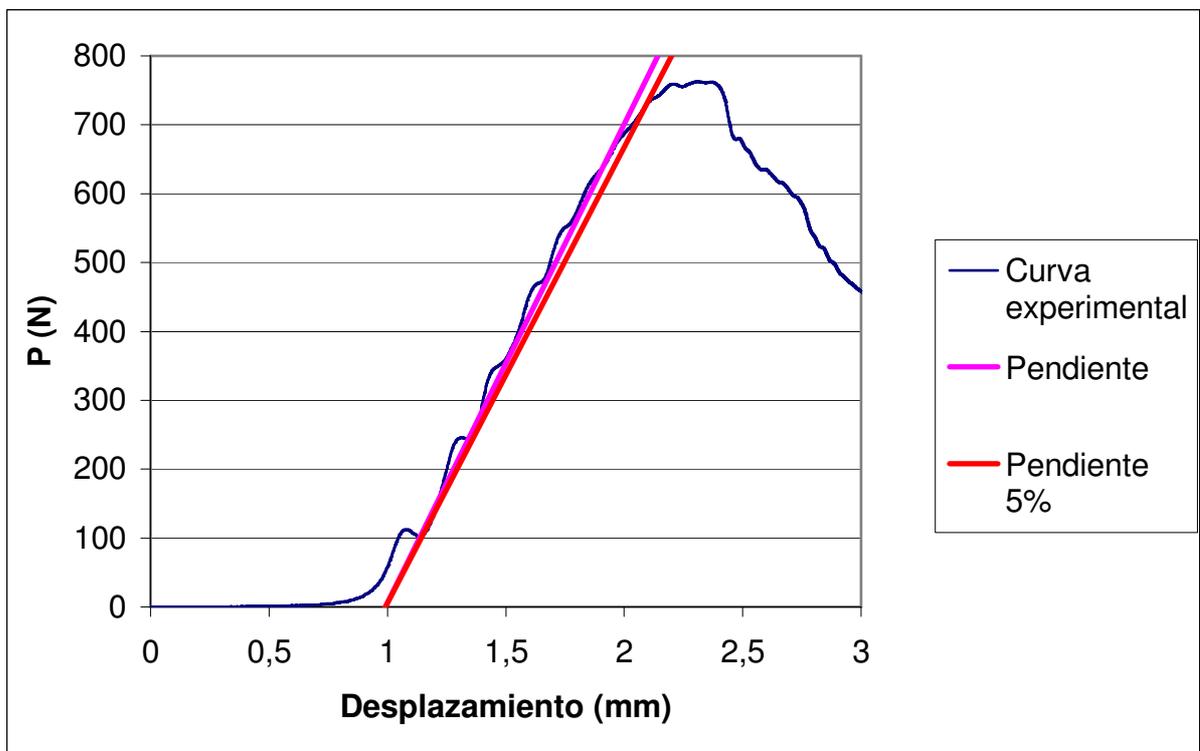


Figura 6.28b: caso $P_Q \neq P_{max}$



Una vez procesadas todas las curvas, se listan en unas tablas (6.6, 6.7 y 6.8) los valores de los parámetros de cada probeta (B, W, a, f) y los valores conseguidos de los ensayos (P_Q y P_{max}).

Probeta n°	B (mm)	W (mm)	a (mm)	f	P_Q (N)	P_{max} (N)	$\frac{P_{max}}{P_Q}$
1	9,06	18,07	6,335	6,95806568	443,86908	443,86908	1
3	9,16	18,14	7,835	8,67354161	298,778687	298,778687	1
4	9,08	18,11	4,426	5,27970427	611,529053	611,529053	1
7	9,07	18,08	4,443	5,29797464	610,454346	610,454346	1
10	9,08	18,06	9,809	12,2756595	187,54274	187,54274	1
12	9,06	18,05	8,961	10,5311852	252,027359	252,027359	1
14	9,07	18,08	9,128	10,8164346	222,471909	222,471909	1
16	9,11	18,1	9,185	10,9066592	262,237427	262,237427	1
17	9,14	18,11	8,306	9,3788863	314,362488	314,362488	1
18	9,07	18,07	9,379	11,3241529	247,19101	247,19101	1
19	9,14	18,12	11,74	18,3437218	150,464096	150,464096	1
21	9,14	18,17	11,505	17,2312122	176,257935	176,257935	1
23	9,14	18,12	10,13	12,9738431	221,93454	221,93454	1

Tabla 6.6: parámetros de las probetas de PA6



Probeta n°	B (mm)	W (mm)	a (mm)	f	P _Q (N)	P _{max} (N)	$\frac{P_{max}}{P_Q}$
1	9,08	18,15	4,786	5,54677386	924,816833	924,816833	1
2	9,09	18,14	9,64	11,7984247	432,046906	432,046906	1
5	9,04	18,15	9,27	11,0227004	443,331696	443,331696	1
6	9,11	18,19	6,518	7,08145455	670,639954	670,639954	1
7	9,08	18,14	9,152	10,8044437	444,406464	444,406464	1
12	9,04	18,13	9,236	10,9761364	492,769897	492,769897	1
14	9,09	18,17	11,815	18,5317021	291,792877	291,792877	1
16	9,01	18,16	13,264	27,5120969	159,599411	159,599411	1
20	9,07	18,15	8,367	9,44490144	582,510986	582,510986	1
21	9,04	18,15	4,739	5,51025907	991,450928	991,450928	1
22	9,02	18,19	13,597	30,3796041	185,393265	185,393265	1
23	9,12	18,19	11,606	17,586011	354,127991	354,127991	1
24	9,11	18,17	6,775	7,36192741	664,728882	664,728882	1

Tabla 6.7: parámetros de las probetas de PA6+22,5%FV

Probeta n°	B (mm)	W (mm)	a (mm)	f	P _Q (N)	P _{max} (N)	$\frac{P_{max}}{P_Q}$
5	9,09	18,19	13,471	29,1611342	269,223267	285,881775	1,06
7	9,08	18,17	9,251	10,9656739	731,90033	780,801147	1,067
8	9,09	18,18	9,263	10,9791113	788,324402	860,332214	1,09
10	9,02	18,13	11,671	18,0174741	433,659027	433,659027	1
14	9,03	18,12	10,029	12,7224644	644,84613	685,148987	1,06
15	9,02	18,09	9,178	10,9029308	747,484131	801,758667	1,07
17	9,06	18,12	9,054	10,6388185	734,587219	762,530518	1,04
18	9,02	18,14	13,322	28,1419393	260,625305	285,166595	1,09
20	9	18,1	8,461	9,63014487	827,015137	827,015137	1
21	9,1	18,19	9,866	12,2442911	648,070374	696,433777	1,07

Tabla 6.8: parámetros de las probetas de PA6+45%FV

Hemos de notar que se cumple perfectamente el criterio de linealidad de la curva carga-

desplazamiento ya que para cada ensayo tenemos $\frac{P_{max}}{P_Q} < 1,1$.



Como sabemos que $K_Q = f \frac{P_Q}{BW^{1/2}}$, graficamos P_Q en función de $\frac{BW^{1/2}}{f}$ y como cabía esperar,

los puntos son bastante alineados y la regresión lineal nos da una pendiente que corresponde al K_Q buscado. (figuras 6.28a, 6.28b y 6.28c)

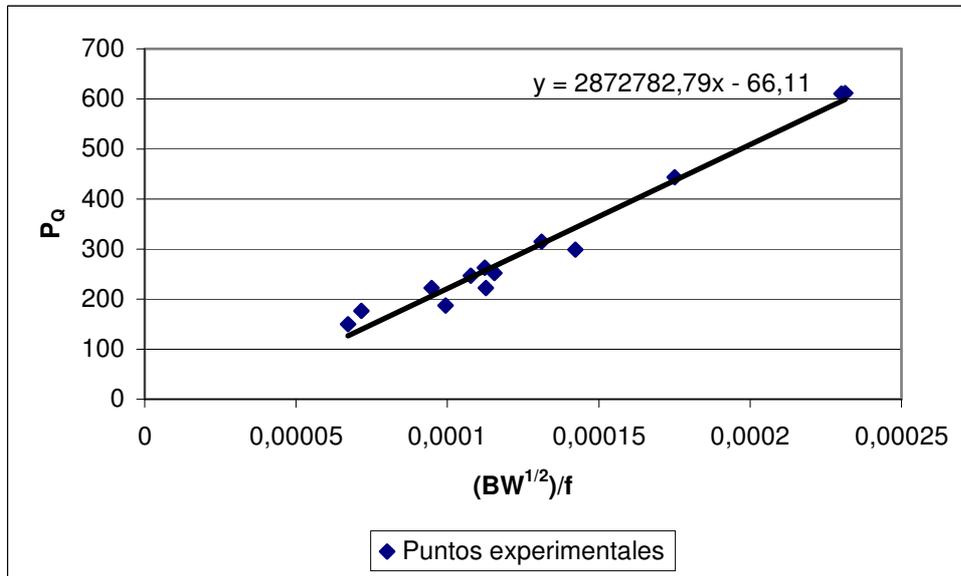


Figura 6.28a: P_Q vs. $\frac{(BW)^{1/2}}{f}$ para la PA6

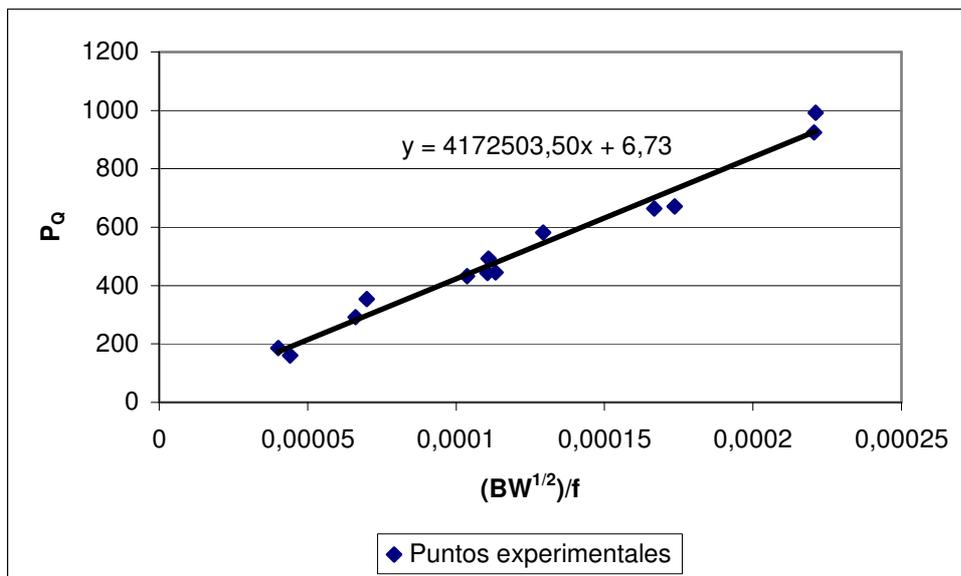


Figura 6.28b: P_Q vs. $\frac{(BW)^{1/2}}{f}$ para la PA6+22,5%FV



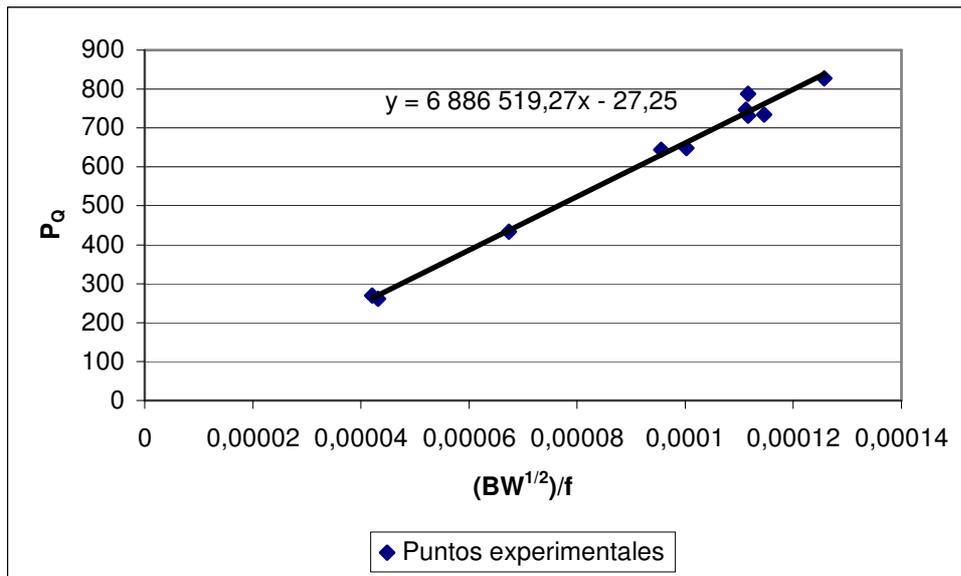


Figura 6.28c: P_Q vs. $\frac{(BW)^{1/2}}{f}$ para la PA6+45%FV

Los valores obtenidos son coherentes en el sentido de que el valor de K_Q va aumentando con el contenido en fibra de vidrio. Eso parece lógico ya que la intensidad necesaria para iniciar una grieta tiene que estar mayor cuando un material lleva fibra.

Las tablas 6.9, 6.10 y 6.11 permiten comprobar el segundo criterio de validez de la LEFM:

$$B, a, (W - a) > 2,5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_y} \right)^2 \quad (6-3)$$

donde cogemos como σ_y la tensión máxima a fluencia dada por los ensayos de impacto-tracción.



Probeta n°	B (mm)	a (mm)	W-a (mm)	σ_y (MPa)	K_Q (N.m ^{-3/2})	$2,5\left(\frac{K_Q}{\sigma_y}\right)^2$ (mm)
1	9,06	6,335	11,735	60	2872782,79	5,73
2	9,16	7,835	10,305	60	2872782,79	5,73
5	9,08	4,426	13,684	60	2872782,79	5,73
6	9,07	4,443	13,637	60	2872782,79	5,73
7	9,08	9,809	8,251	60	2872782,79	5,73
12	9,06	8,961	9,089	60	2872782,79	5,73
14	9,07	9,128	8,952	60	2872782,79	5,73
16	9,11	9,185	8,915	60	2872782,79	5,73
20	9,14	8,306	9,804	60	2872782,79	5,73
21	9,07	9,379	8,691	60	2872782,79	5,73
22	9,14	11,74	6,38	60	2872782,79	5,73
23	9,14	11,505	6,665	60	2872782,79	5,73
24	9,14	10,13	7,99	60	2872782,79	5,73

Tabla 6.9: comprobación del segundo criterio de la LFM para la PA6

Probeta n°	B (mm)	a (mm)	W-a (mm)	σ_y (MPa)	K_Q (N.m ^{-3/2})	$2,5\left(\frac{K_Q}{\sigma_y}\right)^2$ (mm)
1	9,08	4,786	13,364	99	4172503,5	4,44
3	9,09	9,64	8,5	99	4172503,5	4,44
4	9,04	9,27	8,88	99	4172503,5	4,44
7	9,11	6,518	11,672	99	4172503,5	4,44
10	9,08	9,152	8,988	99	4172503,5	4,44
12	9,04	9,236	8,894	99	4172503,5	4,44
14	9,09	11,815	6,355	99	4172503,5	4,44
16	9,01	13,264	4,896	99	4172503,5	4,44
17	9,07	8,367	9,783	99	4172503,5	4,44
18	9,04	4,739	13,411	99	4172503,5	4,44
19	9,02	13,597	4,593	99	4172503,5	4,44
21	9,12	11,606	6,584	99	4172503,5	4,44
23	9,11	6,775	11,395	99	4172503,5	4,44

Tabla 6.10: comprobación del segundo criterio de la LFM para la PA6+22,5%FV



Probeta n°	B (mm)	a (mm)	W-a (mm)	σ_y (MPa)	K_Q (N.m ^{-3/2})	$2,5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_y} \right)^2$ (mm)
5	9,09	13,471	4,719	130,5	6886519,27	6,96
7	9,08	9,251	8,919	130,5	6886519,27	6,96
8	9,09	9,263	8,917	130,5	6886519,27	6,96
10	9,02	11,671	6,459	130,5	6886519,27	6,96
14	9,03	10,029	8,091	130,5	6886519,27	6,96
15	9,02	9,178	8,912	130,5	6886519,27	6,96
17	9,06	9,054	9,066	130,5	6886519,27	6,96
18	9,02	13,322	4,818	130,5	6886519,27	6,96
20	9	8,461	9,639	130,5	6886519,27	6,96
21	9,1	9,866	8,324	130,5	6886519,27	6,96

Tabla 6.11: comprobación del segundo criterio de la LEFM para la PA6+45%FV

Vemos que casi para cada ensayo se cumple el criterio. Por lo tanto el valor K_Q conseguido es en realidad el factor de intensidad de tensión crítico K_{IC} .

6.5.2 Determinación del punto de inicio de la grieta

Haciendo el mismo ensayo que para determinar K_{IC} , mediante galgas extensométricas se puede ver exactamente en que momento se inicia la grieta.

Para ello hemos galgado las probetas SENB de 2 maneras. Cuando la galga esta en el camino de la grieta, las curvas registradas son las siguientes (figura 6.29):



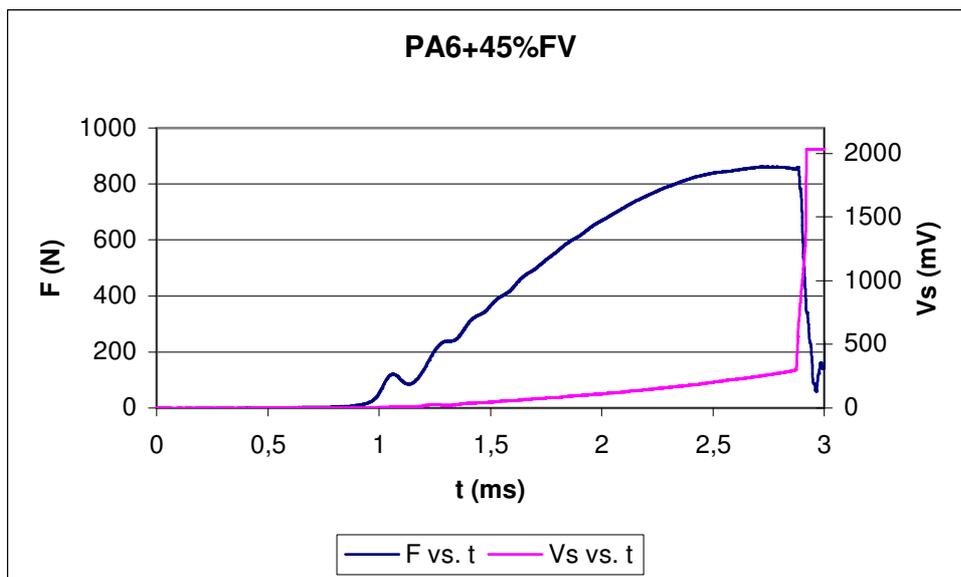
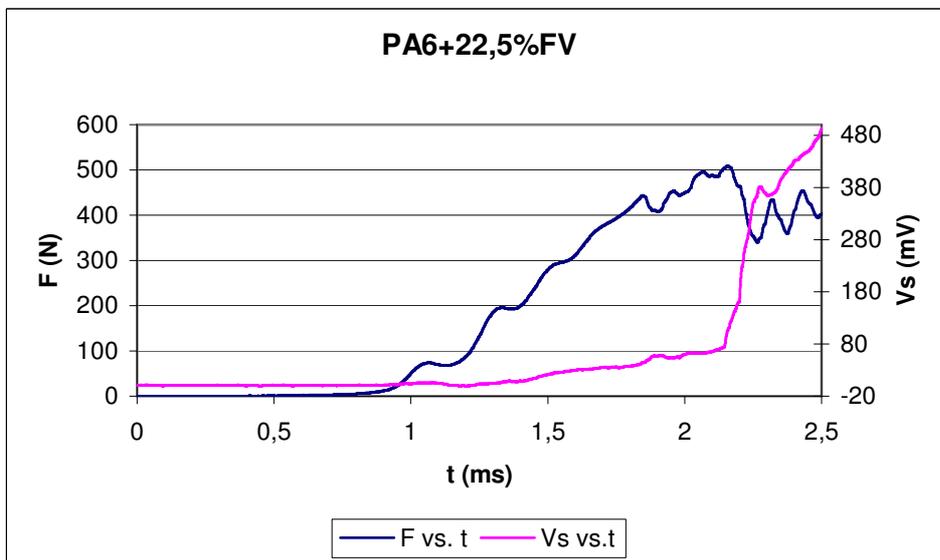
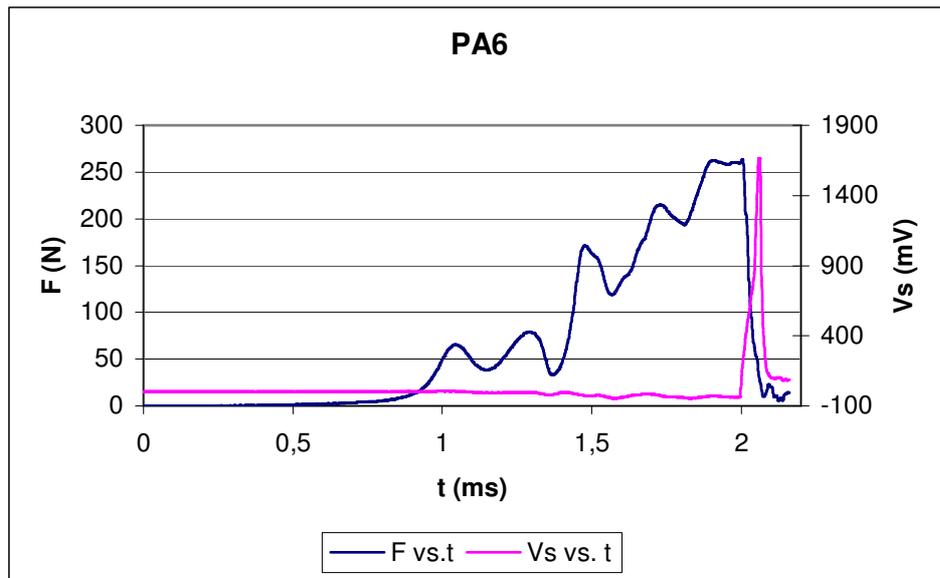


Figura 6.29: curvas experimentales obtenidas con la galga puesta en el camino de la grieta



Se ve que a partir de un cierto tiempo, la señal de salida del puente se dispara lo que corresponde a la rotura de la galga. Por lo tanto la información que nos da la galga no es la que deseamos ya que solo nos indica cuando la grieta alcanza la rejilla de la galga y no cuando empieza a propagarse.

En el otro caso, cuando la galga esta por un lado de la grieta, no se ve saturación en la señal registrada pero se puede notar que existe un momento donde la tensión de salida del puente empieza a bajar (figura 6.30). Eso se debe al hecho que cuando se inicia la grieta en la probeta, existe una relajación de tensión. Entonces la información que nos da la galga corresponde al inicio de la grieta ya que la caída de la señal registrada es consecuencia de la relajación de tensión que se produce en el material.



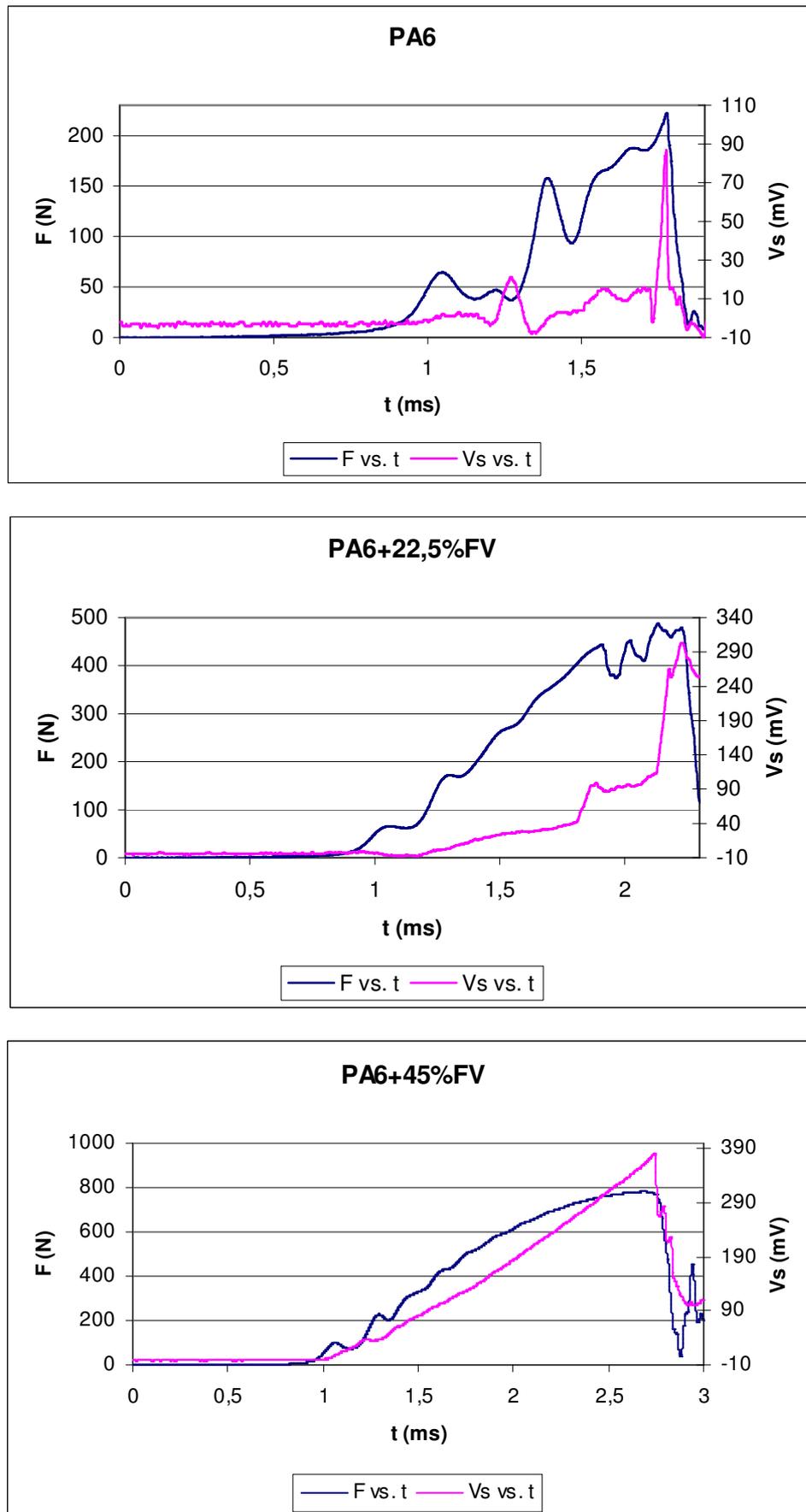


Figura 6.30: curvas experimentales obtenidas con la galga puesta por un lado de la grieta



Lo que hemos de notar es que el máximo en la señal de la galga coincide con el máximo de fuerza que se registra en el impactor. Por lo tanto la grieta se inicia en le momento donde la tensión en la probeta es máxima.



7- Impacto ambiental y coste del proyecto



En este capítulo se determina el impacto medioambiental y el coste de este proyecto.

Gracias al sistema de gestión medioambiental del CCP, se tiene un control de los impactos medioambientales asociados a los diferentes proyectos finales de carrera que se realizan en el centro.

7.1 Impacto ambiental

El funcionamiento consiste en que; al inicio del proyecto de un nuevo estudiante de PFC, se le entrega un modelo para que vaya cumplimentando a medida que va realizando su proyecto y utilizando las diferentes máquinas del centro. Se tomará nota de los tiempos de uso y las fechas, para posteriormente averiguar los consumos eléctricos y de agua. Así se tiene una idea aproximada del impacto que provoca el proyecto sobre el medio ambiente.

Objetivos:

- Determinar el impacto ambiental de cada PFC realizados en el CCP.
- Sensibilizar a los estudiantes sobre el impacto ambiental de su proyecto y la implantación del sistema de gestión medioambiental.

7.1.1 Consumo Eléctrico

1 KWh = 0,264 KG DE CO₂

Cantidad de CO₂ absorbida por hectárea y año = 4,58 Tn de CO₂

Fecha	Sección	Material	Máquinas/Aparatos	Horas	Potencia KW	Consumo KWh
14/02/2006	Inyección	PA6+FV	Inyectora METEOR 440/90	2	33,6	67,2
14/02/2006	Inyección	PA6+FV	PIOVAN CH 180	2	9	18
03/03/2006	Inyección	PA6+FV	Inyectora METEOR 440/90	3	33,6	100,8
03/03/2006	Inyección	PA6+FV	PIOVAN CH 180	3	9	27
03/03/2006	Inyección	PA6+FV	PIOVAN (deshum.)	4	6,8	27,2
06/03/2006	Inyección	PA6+FV	Inyectora METEOR 440/90	2,5	33,6	84
Fecha	Sección	Material	Máquinas/Aparatos	Horas	Potencia KW	Consumo KWh
06/03/2006	Inyección	PA6+FV	PIOVAN CH 180	2,5	9	22,5
06/03/2006	Inyección	PA6+FV	J. P. SELECTA (Estufa)	4	6	24



06/03/2006	Inyección	PA6+FV	CRAMER-TROCKNER	4	2,5	10
07/03/2006	Inyección	PA6+FV	Inyectora METEOR 440/90	3,5	33,6	117,6
07/03/2006	Inyección	PA6+FV	PIOVAN CH 180	3,5	9	31,5
07/03/2006	Inyección	PA6+FV	PIOVAN (deshum.)	4	6,8	27,2
07/03/2006	Inyección	PA6+FV	J. P. SELECTA (Estufa)	4	6	24
08/03/2006	Inyección	PA6+FV	J. P. SELECTA (Estufa)	15	6	90
10/03/2006	Inyección	PA6+FV	CRAMER-TROCKNER	4	2,5	10
10/03/2006	Inyección	PA6+FV	PIOVAN CH 180	2,5	9	22,5
10/03/2006	Inyección	PA6+FV	Inyectora METEOR 440/90	2,5	33,6	84
14/03/2006	Inyección	PA6+FV	J. P. SELECTA (Estufa)	15	6	90
15/03/2006	Inyección	PA6+FV	J. P. SELECTA (Estufa)	4,5	6	27
15/03/2006	Inyección	PA6+FV	Inyectora METEOR 440/90	4	33,6	134,4
15/03/2006	Inyección	PA6+FV	PIOVAN CH 180	4	9	36
03/02/2006 – 28/07/2006	Oficina		Ordenador	800	0.17	136

TOTAL ESTIMADO	KWh	Kg CO2	Hectáreas
	1210,9	318,6776	0,0697986



7.1.2 Movilidad

Fecha	Medio de Transporte	Km.	MJ/Km.	MJ	Equivalente L. gasolina	Kg CO2
03/02/2006 - 28/07/2006	Tren	10800	0,35	3780	94,5	83,16
03/02/2006 - 28/07/2006	Bus	1440	0,39	561,6	14,04	12,3552
03/02/2006 - 28/07/2006	Caminando	120	0,16	19,2	0,48	0,4224

TOTAL ESTIMADO	MJ	Kg CO2	Hectáreas
	4360,8	95,9376	0,02094707

7.1.3 Datos Finales

Aspecto ambiental	m3/Proyecto	Kg CO2/Proyecto	Hectáreas
CONSUMO ELÉCTRICO		318,6776	0,0697986
MOBILIDAD		95,9376	0,02094707
TOTAL ESTIMADO		414,6152	0,09074567

7.2 Coste del proyecto

7.2.1 Consumo eléctrico

Consumo (KWh)	Precio (€/KWh)
1210,9	0,1
TOTAL	121,09 €



7.2.2 Materiales

Material	Cantidad	Precio unitario (€)
Galgas extensométricas	100	4,40
Pegamento	1	50
Diversos		50
TOTAL		540 €

Coste total del proyecto: 661,9 €



8- Conclusiones



- 1- El modulo elástico y la resistencia a la tracción aumentan con el contenido en fibra de vidrio.**
- 2- El modulo elástico y la resistencia a la tracción aumentan cuanto más la fibra esta orientada en el sentido de aplicación del esfuerzo.**
- 3- El modulo elástico aumenta con la velocidad del ensayo. No obstante, este incremento es menor cuando la tasa de fibra es importante ya que se disminuye el efecto de la matriz y por lo tanto de la componente viscosa del material.**
- 4- En ensayos de impacto-tracción y de flexión de probetas SENB, la amplitud de las oscilaciones parasitas aumenta con la velocidad de impacto.**
- 5- Una solución a este problema es disminuir la velocidad de impacto y también amortiguar el golpe mediante la colocación de una cinta amortiguadora.**
- 6- En impacto-tracción, la amortiguación no afecta los valores de fuerza registrada ni de deformación. Eso se debe al hecho que la medición se hace en la mordaza fija del equipo.**
- 7- No obstante, en flexión de probetas SENB, la amortiguación afecta esos valores ya que el elemento de medida (cuchillo) entra en contacto con la cinta amortiguadora. Eso no nos impide determinar K_{IC} pero no se puede calcular la energía necesaria para iniciar la grieta (G_C) ya que no se sabe cuanta energía se disipa durante la compresión del amortiguador.**
- 8- El valor de K_{IC} aumenta con el contenido en fibra del material.**



Referencias

- [1] Martínez, A.B., *Las técnicas de impacto instrumentado*, in Fetraplast.
- [2] Hellerich/Harsch/Haenle (1989), *Guía de materiales plásticos*, Hanser
- [3] Michaeli/Wegener/Capella (1989), *Tecnología de los composites / plásticos reforzado*, Hanser
- [4] Margarit JSW, *Lecciones sobre maquinas de moldeo por inyección, Nociones básicas*
- [5] Sullcahuaman, J.A., *Fractura de materiales poliméricos a altas velocidades de sollicitación*, 2001, Universitat Politècnica de Catalunya: Barcelona.
- [6] Omar Aconeltzin Jiménez Arevalo, *Comportamiento a la fractura de composites con matriz de poliestireno*, 2001, Universitat Politècnica de Catalunya: Barcelona.
- [7] Norma ISO 527-1:1994, *Plastics: Determination of tensile properties. Part 1: General principles*
- [8] A.B. Martínez, *Técnicas de impacto de materiales plásticos y compuestos*, Universitat Politècnica de Catalunya
- [9] Testing protocol, *A linear elastic fracture mechanics (LEFM) standard for determining K_C and G_C for plastics*, 1990



Agradecimientos

Simplemente quiero agradecer a mi tutor Antonio Martínez Benassat para ayudarme durante este proyecto, guiarme y para toda su paciencia e interés.

Por otro lado darle mi agradecimiento a toda la gente del CCP por su disponibilidad, y para darme la oportunidad de haber podido realizar mi proyecto final de carrera en las instalaciones del CCP.

También agradezco al personal de las relaciones internacionales del ETSEIB por atender siempre a mis dudas.

