



Escuela  
Universitaria  
Ingeniería  
Técnica  
Industrial  
ZARAGOZA

## **MEMORIA**

Ensayo de fatiga en materiales poliméricos reforzados con nanopartículas mediante vibraciones mecánicas

## **AUTOR**

Yasmina Lario Perea

## **DIRECTOR**

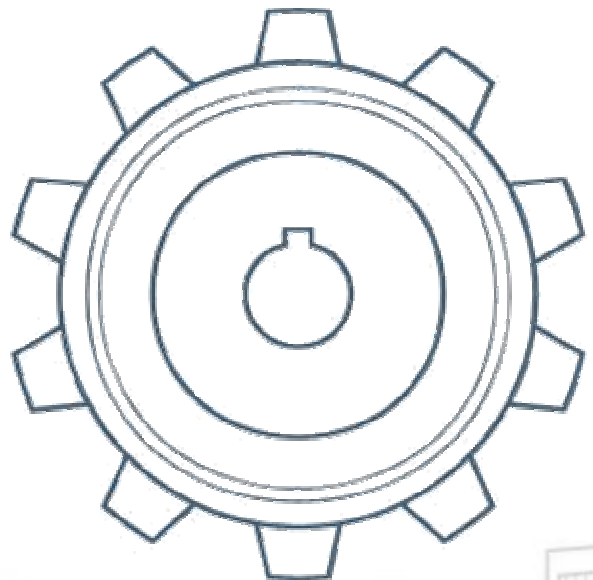
José Antonio Dieste Marcial

## **ESPECIALIDAD**

Mecánica

## **CONVOCATORIA**

Septiembre 2011





## **ÍNDICE GENERAL**

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>13</b>
1.1. NECESIDAD DEL PROYECTO .....	13
1.2. OBJETIVO Y ALCANCE .....	13
1.3. ELEMENTOS PREVIOS AL PROYECTO .....	14
1.3.1. MATERIALES DE ENSAYO .....	14
1.3.2. ENSAYOS CONVENCIONALES .....	15
1.3.3. MÁQUINA DE LEVA .....	15
1.3.4. EQUIPO DE MEDIDA .....	18
1.3.5. ENTORNO Y CONDICIONES DE TRABAJO .....	19
<b>2. DESCRIPCIONES .....</b>	<b>21</b>
2.1. FATIGA Y FLEXIÓN .....	21
2.2. ENSAYOS DE FATIGA .....	21
2.3. FALLO POR FATIGA EN MATERIALES POLIMÉRICOS .....	22
2.3.1. FATIGA TÉRMICA .....	23
2.3.2. FATIGA MECÁNICA .....	24
2.4. PLÁSTICO .....	24
2.5. POLIAMIDA 6 – NANOTUBOS DE HALLOYSITA .....	25
2.6. VIBRACIONES .....	26
2.6.1. ACCELERÓMETRO .....	27
2.6.2. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES .....	28
2.6.3. VIBRACIONES FORZADAS CON AMORTIGUAMIENTO .....	29



<b>3. ANÁLISIS DE COMPONENTES .....</b>	<b>33</b>
3.1. EQUIPO EXPERIMENTAL .....	33
3.1.1. MÁQUINA .....	33
3.1.2. SENSORES DE VIBRACIÓN.....	40
3.1.3. EQUIPO DE MEDIDA .....	41
3.2. TEMPERATURA .....	45
3.2.1. THERMOPOINT TPT40 .....	46
<b>4. ANÁLISIS DINÁMICO DE MATERIALES.....</b>	<b>47</b>
4.1. INTRODUCCIÓN .....	47
4.2. ANALISIS MODAL .....	47
4.3. SOFTWARE DE CÁLCULO .....	48
4.3.1. FIABILIDAD DE RESULTADOS .....	48
4.3.2. CONDICIONES DE CONTORNO .....	50
4.4. MODOS DE VIBRACIÓN .....	50
4.5. POLIAMIDA 6 NATURAL.....	51
4.5.1. PROPIEDADES DE LAS PROBETAS B.....	51
4.5.2. ANÁLISIS MODAL.....	51
4.5.3. ANÁLISIS DE VIBRACIONES .....	52
4.6. POLIAMIDA 6 CON 3% DE NANOTUBOS HALLOYSITA.....	56
4.6.1. PROPIEDADES DE LA PROBETA C.....	56
4.6.2. ANÁLISIS MODAL.....	56
4.6.3. ANÁLISIS DE VIBRACIONES .....	57



4.7. POLIAMIDA 6 CON 6% DE NANOTUBOS DE HALLOYSITA.....	62
4.7.1. PROPIEDADES DE LA PROBETA D .....	62
4.7.2. ANÁLISIS MODAL.....	62
4.7.3. ANÁLISIS DE VIBRACIONES .....	63
4.8. PLEXIMER.....	69
4.8.1. PROPIEDADES DE LA PROBETA E.....	69
4.8.2. ANÁLISIS MODAL.....	69
4.8.3. ANÁLISIS DE VIBRACIONES .....	70
<b>5. ANÁLISIS DE TIEMPO Y COSTE DE ENSAYOS CONVENCIONALES .....</b>	<b>76</b>
5.1. ANÁLISIS DE TIEMPO EN ENSAYOS CONVENCIONALES DE FATIGA.....	76
5.2. ANÁLISIS DE COSTES EN ENSAYOS CONVENCIONALES .....	76
<b>6. ANÁLISIS DE TIEMPO Y COSTE .....</b>	<b>78</b>
6.1. TIEMPO DE REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS.....	78
6.2. COSTES.....	78
6.2.1. COSTES DE INVERSIÓN .....	78
6.2.2. COSTES DE FUNCIONAMIENTO .....	81
<b>7. ANALISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>83</b>
7.1. COMPARACIÓN DE DATOS .....	83
7.1.1. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DEL MATERIAL.....	83
7.1.2. AMORTIGUAMIENTO.....	83
7.1.3. FRECUENCIAS NATURALES .....	84
7.1.4. FLEXIÓN .....	84





7.2. COMPARACIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS SOPORTADOS .....	85
7.3. REDUCCIÓN DE TIEMPO .....	86
7.4. REDUCCIÓN DE COSTE.....	86
7.5. CONCLUSIONES GENERALES.....	87
7.5.1. MATERIALES ESTUDIADOS .....	87
7.5.2. PROYECTO .....	87
<b>8. MÉTODO DE ENSAYO.....</b>	<b>88</b>
8.1. ELEMENTOS NECESARIOS.....	88
8.2. CONEXIONES.....	88
8.3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.....	89
8.3.1. COLOCACIÓN DE LA PROBETA.....	89
8.3.2. CONEXIONES.....	90
8.3.3. COLOCACIÓN DE LOS SENSORES .....	90
8.3.4. PC Y CONFIGURACIÓN .....	91
8.3.5. COMUNICACIÓN PC-DETECT X1. ....	95
8.3.6. MÁQUINA DE LEVA.....	95
8.3.7. PUESTA EN MARCHA DEL ENSAYO .....	96
<b>10. AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>98</b>
<b>11. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>99</b>
11.1. LIBROS, DOCUMENTOS Y PROYECTOS .....	99
11.2. INTERNET .....	100
11.3. NORMAS.....	100



## **ÍNDICE DE FIGURAS**

<i>Figura 1: Dimensiones y geometría de las probetas .....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2: Esquema del amarre de la probeta y la flexión que se produce .....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3: Esquema de la máquina vibratoria sin amarres.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 4: Motor eléctrico y variador de frecuencia .....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 5: Leva .....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 6: Máquina de Leva .....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 7: Equipo Dtect X1 .....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 8: Conjunto del acelerómetro.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 9: Thermopoint TPT40 .....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 10: Esfuerzo mecánico de flexión .....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 11: Máquina de ensayos de fatiga de R.R.Moore y probeta necesaria .....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 12 : Tipos de fractura por fatiga en polímeros.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 13: Poliamida 6.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 14: Nanotubos de halloysita.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 15: Acelerómetro piezoeléctrico.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 16: Ejemplo de espectro de frecuencias .....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 17: Ejemplo análisis de onda .....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 18: Tipos de amortiguamiento .....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 19: Modelado 3D de la máquina de leva en Pro Engineer 5.0 .....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 20: Caracterización de muelles .....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 21: Parametrización de los muelles.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 22: Parametrización del motor eléctrico .....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 23: Punto de análisis en ProE .....</i>	<i>38</i>



<i>Figura 24: Ejemplo de "Aliasing"</i> .....	42
<i>Figura 25: Ejemplo de "leakage"</i> .....	42
<i>Figura 26: Efecto ventana "hanning"</i> .....	43
<i>Figura 27: Dependencia de parámetros</i> .....	44
<i>Figura 28: Orden de configuración</i> .....	44
<i>Figura 29: Tamaño de mallado de las probetas en Ansys Workbench 12.1</i> .....	49
<i>Figura 30: Condiciones de apoyo para el análisis dinámico</i> .....	50
<i>Figura 31: Modos de vibración</i> .....	50
<i>Figura 32: PA6 natural a) Punto de rotura b) Deformación plástica de apoyos</i> .....	54
<i>Figura 33: Sección de falla, PA6 natural</i> .....	55
<i>Figura 34: PA6 3%NTH, a) Punto de fractura, b) Deformación plástica de apoyos</i> .....	60
<i>Figura 35: Fractura PA6 3%NTH</i> .....	61
<i>Figura 36: PA6 6%NTH, a) Punto de falla, b) Deformación plástica de apoyos</i> .....	68
<i>Figura 37: Sección de fractura de PA6 6%NTH</i> .....	68
<i>Figura 38: Pleximer, a) Punto de rotura, b) Deformación plástica de apoyos</i> .....	74
<i>Figura 39: Sección de fractura Pleximer</i> .....	74
<i>Figura 40: Esquema de conexiones del ensayo</i> .....	88
<i>Figura 41: Colocación de la probeta</i> .....	90
<i>Figura 42: Configuración de la medida, device properties</i> .....	91
<i>Figura 43: Configuración de la medida, Overview</i> .....	92
<i>Figura 44: Configuración de la medida, General settings</i> .....	92
<i>Figura 45: Configuración de la medida, Sensors</i> .....	92
<i>Figura 46: Configuración de la medida, Data</i> .....	93
<i>Figura 47: Configuración de la medida, General Data</i> .....	93



<i>Figura 48: Configuración de la medida, Window options .....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 49: Configuración de la descarga de datos, saving options .....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 50: Configuración de la descarga de datos, remote .....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 51: Configuración de la medida, conexcion con Dtect X1 .....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 52: Inicio de Remote Server .....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 53: Inicio de Data Link .....</i>	<i>97</i>



## **ÍNDICE DE TABLAS DE CONTENIDO**

<i>Tabla 1: Esquema del objetivo y alcance del proyecto</i> .....	13
<i>Tabla 2: Masa de componentes dinámicos</i> .....	34
<i>Tabla 3: Datos experimentales, muelle superior</i> .....	35
<i>Tabla 4: Datos experimentales, muelle inferior</i> .....	35
<i>Tabla 5: Características de los muelles</i> .....	36
<i>Tabla 6: Fiabilidad del software de trabajo: comparativa general</i> .....	48
<i>Tabla 7: Fiabilidad del software de trabajo: comparativa tamaño de malla</i> .....	49
<i>Tabla 8: Propiedades de la probeta de PA6 natural</i> .....	51
<i>Tabla 9: Frecuencias naturales PA 6 natural</i> .....	51
<i>Tabla 10: Datos de ensayo, PA 6 natural</i> .....	55
<i>Tabla 11: Propiedades de la probeta de PA6 3%NHT</i> .....	56
<i>Tabla 12: Frecuencias naturales PA6 3%NTH</i> .....	56
<i>Tabla 13: Datos de ensayo, PA 6 3%NTH</i> .....	61
<i>Tabla 14: Propiedades de la probeta de PA6 6%NHT</i> .....	62
<i>Tabla 15: Frecuencias naturales PA6 6% NTH</i> .....	62
<i>Tabla 16: Datos de ensayo, PA6 6%NTH</i> .....	68
<i>Tabla 17: Propiedades de la probeta de Pleximer</i> .....	69
<i>Tabla 18: Frecuencias naturales Pleximer</i> .....	69
<i>Tabla 19: Datos de ensayo, Pleximer</i> .....	75
<i>Tabla 20: Tiempo de ensayo según la frecuencia de trabajo</i> .....	76
<i>Tabla 21: Coste de un ensayo convencional (2Hz) para <math>10^6</math> ciclos</i> .....	76
<i>Tabla 22: Coste del ensayo convencional para las pruebas específicas del proyecto</i> .....	77
<i>Tabla 23: Tiempo de ensayo</i> .....	78



<i>Tabla 24: Resumen de costes de inversión .....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 25: Costes de elementos comerciales .....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 26: Costes de mano de obra .....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 27: Costes de elementos fabricados .....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 28: Costes de seguridad, conexión y medida .....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 29: Costes del sistema de refrigeración - lubricación .....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 30: Coste de funcionamiento (40Hz) para <math>10^6</math> ciclos .....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 31: Costes de funcionamiento de las pruebas específicas del proyecto .....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 32: Resultados: reducción de tiempo .....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 33: Comparación: costes .....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 34: Resultados: reducción de costes .....</i>	<i>86</i>



## **ÍNDICE DE GRÁFICOS**

<i>Gráfico 1: Relación Peso(N)-Elongación (m) muelle superior .....</i>	<i>35</i>
<i>Gráfico 2: Relación Peso(N)-Elongación (m) muelle inferior .....</i>	<i>35</i>
<i>Gráfico 3: Posición, resultado del análisis en ProE .....</i>	<i>38</i>
<i>Gráfico 4: Velocidad, resultado del análisis en ProE .....</i>	<i>38</i>
<i>Gráfico 5: Aceleración, resultado del análisis en ProE .....</i>	<i>39</i>
<i>Gráfico 6: Fuerza de muelles, resultado del análisis en ProE. ....</i>	<i>39</i>
<i>Gráfico 7: Valor característico RMS, PA6 natural ensayo I .....</i>	<i>52</i>
<i>Gráfico 8: FFT, PA6 natural ensayo I .....</i>	<i>53</i>
<i>Gráfico 9: Señal temporal PA6 natural.....</i>	<i>54</i>
<i>Gráfico 10: Valor característico RMS, PA6 3%NTH ensayo I .....</i>	<i>57</i>
<i>Gráfico 11: Valor característico RMS, PA6 3%NTH ensayo II .....</i>	<i>58</i>
<i>Gráfico 12: FFT, PA6 3%NTH ensayo I .....</i>	<i>59</i>
<i>Gráfico 13: FFT, PA6 3%NTH ensayo II .....</i>	<i>59</i>
<i>Gráfico 14: Señal temporal, PA6 3%NTH.....</i>	<i>60</i>
<i>Gráfico 15: Valor característico RMS, PA6 6%NTH ensayo I .....</i>	<i>63</i>
<i>Gráfico 16: Valor característico RMS, PA6 6%NTH ensayo II .....</i>	<i>64</i>
<i>Gráfico 17: Valor característico RMS, PA6 6%NTH ensayo III .....</i>	<i>64</i>
<i>Gráfico 18: FFT, PA6 6%NTH ensayo I .....</i>	<i>65</i>
<i>Gráfico 19: FFT, PA6 6%NTH ensayo II .....</i>	<i>66</i>
<i>Gráfico 20: FFT, PA6 6%NTH ensayo III .....</i>	<i>66</i>
<i>Gráfico 21: Señal temporal, PA6 6%NTH.....</i>	<i>67</i>
<i>Gráfico 22: Valor característico RMS, Pleximer ensayo I.....</i>	<i>70</i>



<i>Gráfico 23: Valor característico RMS, Pleximer ensayo II.....</i>	<i>71</i>
<i>Gráfico 24: Valor característico RMS, Pleximer ensayo III.....</i>	<i>71</i>
<i>Gráfico 25: FFT, Pleximer ensayo I.....</i>	<i>72</i>
<i>Gráfico 26: FFT, Pleximer ensayo II.....</i>	<i>72</i>
<i>Gráfico 27: FFT, Pleximer ensayo III.....</i>	<i>72</i>
<i>Gráfico 28: Pleximer, a) Señal temporal, b) Impactos a 20Hz, c) Impactos a 40Hz. ....</i>	<i>73</i>
<i>Gráfico 29: Comparación entre materiales: Módulo de Young y Densidad .....</i>	<i>83</i>
<i>Gráfico 30: Comparación entre materiales: Constante de amortiguamiento.....</i>	<i>83</i>
<i>Gráfico 31: Comparación entre materiales: Frecuencias naturales .....</i>	<i>84</i>
<i>Gráfico 32: Comparación entre materiales: Flexión.....</i>	<i>84</i>
<i>Gráfico 33: Comparación entre materiales: Nº ciclos soportados .....</i>	<i>85</i>





# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. NECESIDAD DEL PROYECTO

La evaluación de la vida útil de los materiales en ingeniería es un aspecto fundamental para el diseño de productos, este aspecto, unido al creciente uso de materiales plásticos en la industria, hace que se presente la necesidad de ensayar a fatiga estos elementos.

Hasta el momento los ensayos convencionales son largos y complicados, debido a que se trata de un proceso estocástico y trabajado a bajas frecuencias (1-3 Hz), pudiendo aumentar este factor únicamente realizando una alta inversión en el equipo de ensayo.

Cómo alternativa a estas dos opciones se plantea el concepto de vibraciones mecánicas cómo medio para valorar este esfuerzo aminorando la duración y el gasto en este tipo de pruebas.

## 1.2. OBJETIVO Y ALCANCE

El objetivo de este proyecto es adaptar y monitorizar una máquina, previamente diseñada, que provoca esfuerzos cíclicos de flexión sobre una probeta, para realizar ensayos de fatiga en materiales poliméricos reforzados con nanopartículas, proporcionando resultados coherentes y comparables entre muestras, que permitan llegar a conclusiones de las características de los materiales ensayados, disminuyendo en la medida de lo posible el tiempo y el coste de la realización de este tipo de ensayos.

La producción de nanocompuestos, permiten dotar a materiales comunes, de propiedades nuevas o mejoradas; con este trabajo se pretende alcanzar una comparación de la resistencia a fatiga, entre muestras de compuestos nanoaditivados. Esto proporcionará un nuevo dato para el diseño de los materiales en función de los requerimientos técnicos de los productos a los que van destinados.

NECESIDADES OBSERVADAS	SOLUCIONES	RESULTADOS BUSCADOS
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Datos de fatiga de materiales</li> <li>▪ Utilización creciente de materiales poliméricos</li> <li>▪ Mejora de las propiedades de los materiales poliméricos</li> <li>▪ Disminución de la duración y coste de los ensayos a fatiga</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ensayo a fatiga de materiales poliméricos</li> <li>▪ Nanoaditivado</li> <li>▪ Elevar la frecuencia y el esfuerzo de ensayo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Comparación de la vida útil de los materiales del proyecto</li> <li>▪ Disminución del coste del ensayo de fatiga</li> <li>▪ Disminución de la duración del ensayo de fatiga</li> </ul>

*Tabla 1: Esquema del objetivo y alcance del proyecto*



### 1.3. ELEMENTOS PREVIOS AL PROYECTO

#### 1.3.1. MATERIALES DE ENSAYO

Cómo materiales de ensayo se van a seleccionar cuatro tipos de polímeros, debido a la creciente utilización de este material en el ámbito de la ingeniería en aplicaciones de responsabilidad, acreditado por sus múltiples ventajas.

Los polímeros presentan propiedades excelentes para el aislamiento térmico y eléctrico, y alta relación resistencia/densidad. Ofrecen buena resistencia a la corrosión y a diferentes agentes químicos, además de ser normalmente impermeables y aislantes acústicos.

Su facilidad de trabajo y moldeo por varios métodos siendo además muy competitivo económicamente, hace del polímero un material conveniente para la confección de gran variedad de productos.

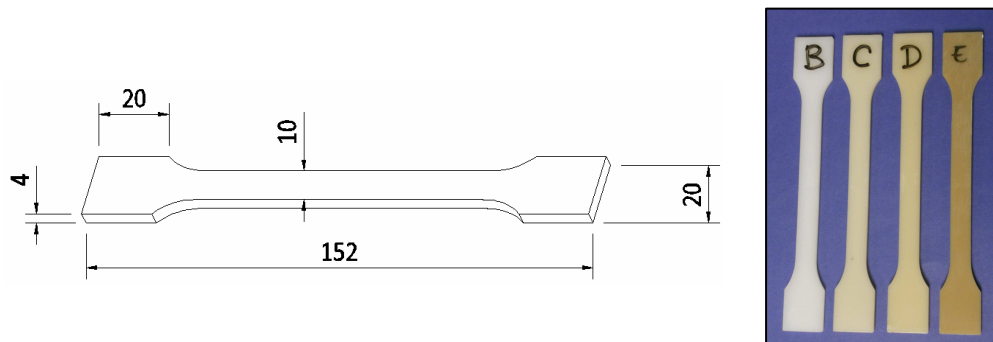
Además la combinación con aditivos de estos materiales les hace adecuados para gran variedad de utilidades, incluso en esfuerzos de alta exigencia.

Por todo ello, aparece la necesidad de conocer las propiedades mecánicas de estos materiales y más concretamente la de evaluar su resistencia a fatiga, lo que justifica la elección de los materiales a estudiar en este proyecto.

Los cuatro polímeros seleccionados son:

- Poliamida 6 con concentraciones de 0%, 3% y 6% de nanotubos halloysita.
- Pleximer: Poliamida 6 con una concentración del 30% de nanotubos de halloysita.

Se dispondrá de cinco probetas de cada material de la geometría mostrada en la *fig.1*.



*Figura 1: Dimensiones y geometría de las probetas*



### 1.3.2. ENSAYOS CONVENCIONALES

Con el fin de poder llegar a resultados coherentes y comparativos, estudiando exhaustivamente los materiales seleccionados, se utilizarán los datos obtenidos de ensayar mecánicamente a flexión y tracción, las probetas objeto de estudio de este proyecto; extrayendo los datos característicos para cada material. Estos datos se recogen en el *Anexo I: Ensayos Mecánicos de Materiales* y más resumidamente en propiedades de la probeta para cada uno de los materiales, en este mismo documento (4.5.1., 4.6.1., 4.7.1., 4.8.1.).

### 1.3.3. MÁQUINA DE LEVA

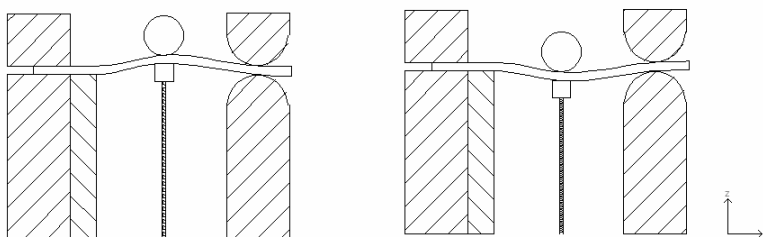
La máquina necesaria para la ejecución de ensayos ha sido diseñada y construida en la Asociación de Investigación Taller de Inyección de la Industria de los Plásticos (Aitiip centro tecnológico) por David Santos Dueñas, jefe de mantenimiento del departamento de mecanizado, y servirá como mecanismo de excitación de la probeta.

Los planos se adjuntan en el *Anexo II: Planos de la Máquina de Leva*.

Antes de la ejecución de los ensayos se realizaron pruebas y ajustes en la máquina de leva que se especifican en el *Anexo III: Acondicionamiento de la Máquina de Leva*.

#### 1.3.3.1. ESFUERZO DE LA MÁQUINA DE LEVA

La máquina diseñada para realizar los ensayos produce la vibración sometiendo una probeta plana a un esfuerzo de flexión (*fig.2*), amarrando sus extremos y realizando un empuje cíclico mediante un empujador.



*Figura 2: Esquema del amarre de la probeta y la flexión que se produce*

La probeta se asemejará a una viga empotrada/apoyada en un extremo y articulada en el otro, ya que podrá realizar los giros en los ejes Y, Z y su desplazamiento quedará restringido sólo en el Z, gracias a unas mordazas, que la sujetarán firmemente mientras recibe el esfuerzo del mecanismo de pulsación.



### 1.3.3.2. FUNCIONAMIENTO BÁSICO DE LA MÁQUINA DE LEVA

Un motor eléctrico hace girar un eje unido a una leva que desplaza verticalmente un cilindro horizontal empujador, que transmite el movimiento a la probeta por su cara superior; ésta a su vez, es presionada por su cara inferior por un cilindro vertical.

Todo este movimiento se lleva a cabo verticalmente arriba y abajo de una manera cíclica según la posición de la leva y gracias a unos muelles colocados en el sistema de pulsación (*fig.3*).

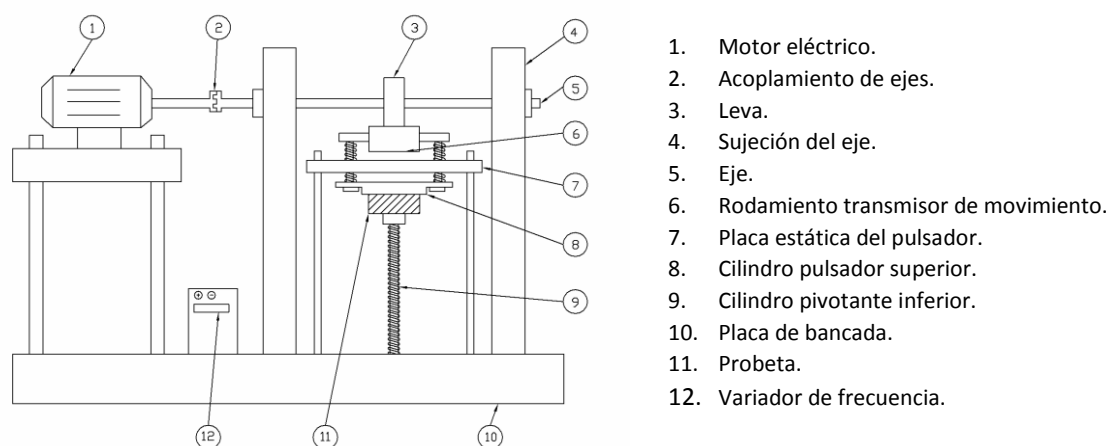


Figura 3: Esquema de la máquina vibratoria sin amarres

El juego de eje-leva, gracias al motor eléctrico, y regulado por el variador de frecuencia, puede girar alrededor de 3000 rpm (50Hz). Teniendo en cuenta que realizará 2 ciclos de desplazamiento en la probeta por cada revolución, la frecuencia de ensayo se podrá aumentar de manera considerable en comparación con ensayos de fatiga convencionales, que trabajan a 1Hz (60 rpm), de esta manera, se disminuirá el tiempo de ensayo.

### 1.3.3.3. ELEMENTOS DESTACADOS DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS

El **motor eléctrico**, es un motor asíncrono trifásico, de potencia 0,37 kW y que trabaja a 2830 rpm en 50 Hz, al que se le conectó un **variador de frecuencia** compacto, con una potencia de 4 kW y un rango de frecuencia programado de 1- 50 Hz, (*fig.4*).

La opción de poder regular la frecuencia es un aspecto fundamental, para controlar el funcionamiento de la máquina de ensayo y disminuir el tiempo de realización con respecto a los ensayos convencionales.

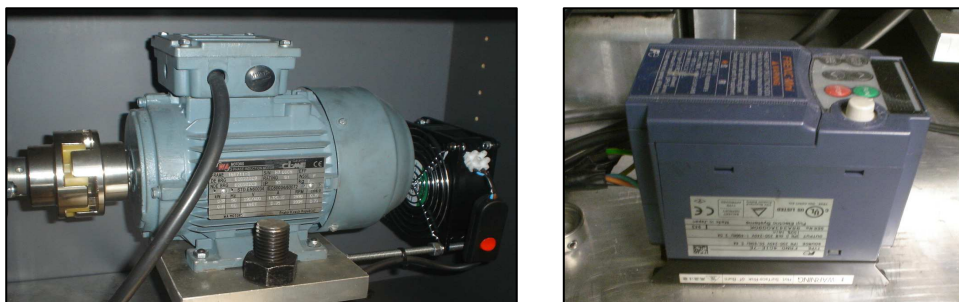


Figura 4: Motor eléctrico y variador de frecuencia

El **eje** con un diámetro de 20 mm está fabricado en acero F-114, y se sujeta en él la leva mediante una chaveta. Este elemento está unido al eje del motor eléctrico mediante un **acoplamiento mecánico**.

La **leva** inicial fue fabricada en aluminio, con forma elíptica de manera que producía un desplazamiento vertical de 2 mm (*fig.5, A*); pero según las pruebas realizadas en la máquina de ensayos, descritas en el *Anexo III: Acondicionamiento de la Máquina de Leva*, fue necesario un diseño nuevo de este elemento con perfil cicloidal, desplazamiento de un centímetro y fabricada en acero (*fig.5, B*).

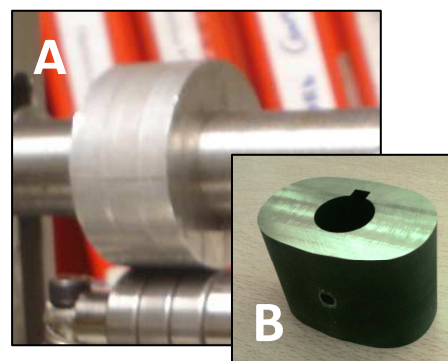


Figura 5: Leva

La **bancada** (*fig.6*) está fabricada a base de placas gruesas de aluminio, ranuradas y agujereadas facilitando el montaje y desmontaje de la máquina, colocación de probetas o mantenimiento, además de proporcionar la robustez necesaria para el ensayo.

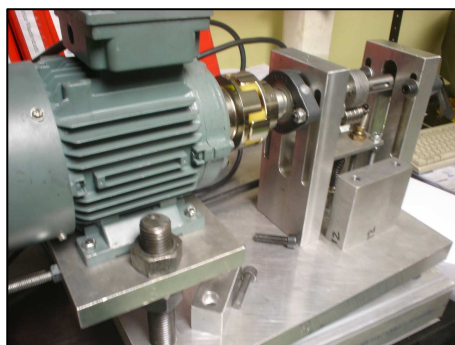


Figura 6: Máquina de Leva

Una de las mordazas se mecanizó en forma curva para poder permitir el arqueado de la probeta y simular la fijación de la probeta cómo empotrada-articulada.



Se seleccionó un **ventilador** para refrigerar el motor eléctrico y evitar el sobrecalentamiento en este componente.

Cómo método de seguridad se instalará una **pantalla de metacrilato** que cubrirá el equipo durante el tiempo de ensayo, evitando atrapamientos y posibles proyecciones de material y aceite lubricante que puedan ser un riesgo.

#### 1.3.4. EQUIPO DE MEDIDA

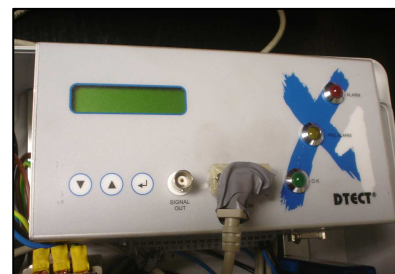
##### 1.3.4.1. EQUIPO: DTECT X1

Para el análisis de vibraciones se monitorizará la máquina de ensayo con un equipo de medida **Dtect X1** (*fig.7*) que:

- Permitirá la monitorización en línea durante 2-3 semanas.
- Con un Netbook, se registrará la información de la monitorización.
- Almacenará datos en el dominio de tiempo y de frecuencia.
- Admitirá configuración tanto de la medida, como del almacenamiento y descarga de datos.

Las características del conversor analógico-digital son:

- 2 canales.
- Resolución: 12 bit.
- Máxima frecuencia de muestreo: 80 kHz.
- Rango de temperatura de trabajo: 0-50 °C.



*Figura 7: Equipo Dtect X1*

El software utilizado es FIS ADMINISTRATOR con la capacidad de configuración, diagnóstico, documentación y administración de datos.

##### 1.3.4.2. SENSORES: DYTRAN 3030B4

Cómo sensor de vibración se utilizará un acelerómetro piezoeléctrico por compresión **Dytran 3030B4** de sensibilidad 10mV/g acoplado a un bloque cúbico de montaje triaxial, que se fijará a la superficie de medición mediante dos tornillos (*fig.8*).

Se han elegido acelerómetros piezoeléctricos porque:

- Tienen amplio rango dinámico y de frecuencia.
- Pesan poco, ( $\approx 6g$ ).
- Son sensores robustos sin partes móviles,
- Están herméticamente sellados.

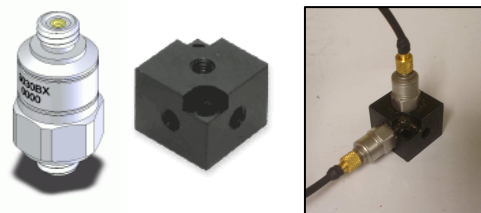


Figura 8: Conjunto del acelerómetro

#### 1.3.4.3. TERMÓMETRO: THERMOPOINT TPT40



Figura 9: Thermopoint TPT40

Se tomarán medidas de temperatura en la sección ensayada de la probeta con una pistola de temperatura portátil de medición sin contacto, Thermopoint TPT40 (fig.9), que proporcionará la temperatura en el punto de esfuerzo (o uno muy cercano) en un momento deseado. El rango de temperaturas es de  $-18^{\circ}\text{C}$  a  $870^{\circ}\text{C}$  con una resolución de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , suficiente para el caso de utilización.

#### 1.3.5. ENTORNO Y CONDICIONES DE TRABAJO

El proyecto y realización de los ensayos se va a llevar a cabo en la nave de la Asociación de Investigación Taller de Inyección de la Industria de los Plásticos, Fundación AITIIP, centro tecnológico situado en la carretera de cogullada en Zaragoza.

La ubicación de la máquina será en un espacio aislado del entorno habitual de trabajo, debido a la contaminación acústica del mecanismo durante la realización del ensayo.

Deberá estar cercano a una toma de corriente eléctrica y a una toma de aire comprimido.

Todos los ensayos se realizarán a temperatura y humedad ambiente. Pero debido a la probabilidad de producirse falla por un aumento excesivo de la temperatura en la sección de ensayo, se realizará la medición de la temperatura en la zona de esfuerzo o en una lo más cercana posible.

Se tomarán medidas de forma aleatoria a lo largo del tiempo de ensayo registrando los posibles cambios, tanto en la probeta, cómo en puntos con posibilidad de fallo de la máquina, con la finalidad de evitar cualquier error del ensayo.



El aparato de medida a utilizar será una pistola Thermopoint TPT40.

La frecuencia seleccionada para la prueba será de 20 Hz, es decir se le aplicarán aproximadamente unos 40 ciclos de flexión por segundo a la probeta.

Esta frecuencia ha sido fijada según la realización de pruebas reales en la máquina de leva, asegurando su correcto funcionamiento durante un tiempo extenso de ensayo. Todas las comprobaciones necesarias de la máquina de ensayo se detallan en el *Anexo III: Acondicionamiento de la Máquina de Leva*.





## 2. DESCRIPCIONES

### 2.1. FATIGA Y FLEXIÓN

La **fatiga** de materiales es un fenómeno que se produce bajo cargas dinámicas cíclicas, produciendo el colapso del material por debajo de su límite de carga estático. El proceso de rotura por fatiga mecánica se desarrolla sin deformación plástica aparente, presentando la fractura un aspecto característico, con una zona de rotura progresiva (fisuración) y otra de rotura brusca (fragilidad).

En este proceso van a intervenir numerosos factores:

- Diseño
- Tratamiento, dureza y acabado superficial
- Temperatura
- Corrosión

**Flexión** es el tipo de deformación que presenta un elemento estructural en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. El esfuerzo que provoca la flexión se denomina momento flector. La sección del material de ensayo queda dividida, sometida una de sus partes a tracción y la restante a compresión, quedando separados estos dos esfuerzos por una línea con esfuerzo nulo, llamada fibra neutra.

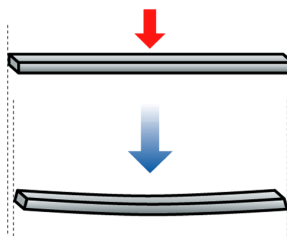


Figura 10: Esfuerzo mecánico de flexión

### 2.2. ENSAYOS DE FATIGA

Para determinar la resistencia de materiales bajo la acción de cargas dinámicas, se someten unas probetas de material a fuerzas repetidas constantes o variables, de magnitudes especificadas y se contabilizan los ciclos o alternaciones de esfuerzos que soporta el material hasta la falla o rotura, por ello, el ensayo de fatiga está clasificado cómo un ensayo dinámico, destructivo.

En el ensayo de fatiga existen los siguientes conceptos importantes:



- Las fuerzas necesarias para conseguir la ruptura por cargas dinámicas, son inferiores a las necesarias en un caso estático.
- Existe un umbral de carga, por debajo del cual, las probetas no se rompen, que se conoce como límite de fatiga.

El método más utilizado para representar los datos de fatiga es la curva de Wöhler o curva S-N (Stress-Number of cycles), representa la duración de la probeta, expresada en número de ciclos hasta la rotura (N), para la máxima tensión aplicada (S).

El dispositivo para ensayos de fatiga convencionales, más habitual es la máquina de viga rotatoria de alta velocidad de R. R. Moore. Ésta somete una probeta cilíndrica, entallada por el centro de su longitud y pulida en dirección axial, a flexión pura por medio de pesas.

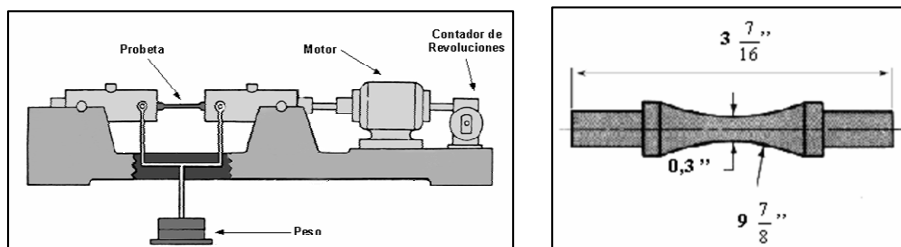


Figura 11: Máquina de ensayos de fatiga de R.R. Moore y probeta necesaria

Según sea el tipo de esfuerzo al que están sometidas las probetas en el ensayo, éste puede ser:

- De tracción-compresión, esfuerzos axiales alternos.
- De flexión plana, en probetas de sección rectangular, empotradas y sometidas a un momento flector alterno.
- De torsión, en probetas de sección circular, empotradas en un extremo y a las que se le aplica un momento de torsión alternado en sentido.
- De flexión rotativa, el más comúnmente utilizado, se realiza sobre probetas cilíndricas a las que se hace girar a la vez que se les aplica, en un extremo, un momento flector constante, provocando la alternancia del esfuerzo cada media vuelta de la probeta.

### 2.3. FALLO POR FATIGA EN MATERIALES POLIMÉRICOS

Dependiendo de la intensidad y la frecuencia del esfuerzo, el fallo de algunos polímeros ha sido descrito por dos vías diferentes:



### 2.3.1. FATIGA TÉRMICA

Cuando el material polimérico es sometido a una variación de esfuerzos superior al nivel de tensiones crítico, se producen movimientos de los segmentos de sus cadenas moleculares, estos movimientos se identifican como transición vítrea o relajación viscoelástica y se producen a una temperatura propia de las características del material ( $T_g$ ), normalmente termoplástico. Una parte de la energía proveniente de esos movimientos es empleada en la propia deformación del material, pero los movimientos moleculares provocan un calentamiento por fricción en la zona.

La baja conductividad térmica de los materiales poliméricos, provoca que parte de ese calor no se disipe, provocando un aumento de su temperatura.

Cuando la velocidad de transferencia de calor a los alrededores, por cualquiera de los mecanismos de transmisión, ya sea por conducción, convección o radiación, es inferior a la velocidad con que se genera el calor, la temperatura del material aumenta, lo que conlleva que sus propiedades mecánicas disminuyan hasta que sus valores críticos alcancen el nivel de la carga aplicada, produciéndose la rotura. Este fenómeno se denomina fallo térmico.

#### 2.3.1.1. TEMPERATURA DE TRANSICIÓN

La Temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) es la temperatura a la que se da una pseudotransición termodinámica en materiales vítreos, por lo que se encuentra en vidrios, polímeros y otros materiales inorgánicos amorfos. Esto quiere decir que, termodinámicamente hablando, no es propiamente una transición.

Se entiende que es un punto intermedio de temperatura entre el estado fundido y el estado rígido del material. El estudio de  $T_g$  es más complejo en el caso de polímeros que en cualquier otro material de moléculas pequeñas.

La  $T_g$  no es una temperatura a la cual específicamente ocurre el cambio de estado, existen diferentes métodos experimentales para determinarla, pero debido al carácter termodinámico de esta pseudotransición, cada método provee de un valor de  $T_g$  diferente, es por ello que en los artículos científicos se provee siempre del método por el cual se determinó su valor. Para fines prácticos, no es tan importante el valor exacto de  $T_g$ , pues es comprensible que alrededor de esta temperatura, el polímero adquiere cierta plasticidad.

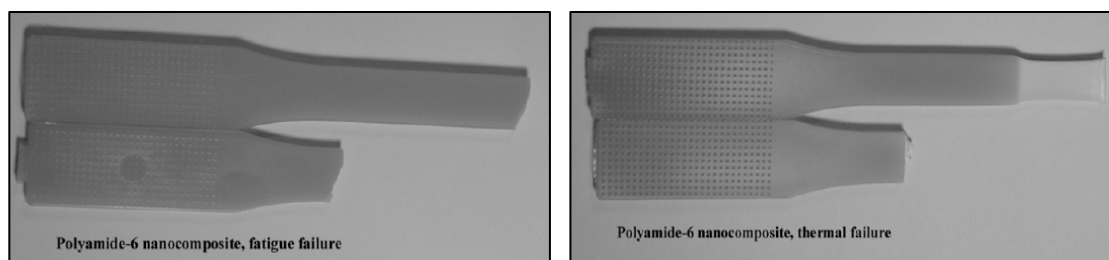


### 2.3.2. FATIGA MECÁNICA

Estos fallos también se pueden producir en los materiales poliméricos, como consecuencia de fatiga mecánica habitual a consecuencia del debilitamiento progresivo hasta finalizar en su rotura debido a la propagación de las grietas.

Para producir únicamente un fallo de fatiga mecánica, será necesario un control exhaustivo del ensayo, porque el incremento local de la temperatura en la probeta puede provocar el fallo térmico por fatiga.

Se podrá comprobar el tipo de rotura que se ha producido en la probeta visualizando la fractura, ya que en la rotura por fatiga térmica la deformación plástica será mucho mayor.



*Figura 12 : Tipos de fractura por fatiga en polímeros*

### 2.4. PLÁSTICO

Material basado en polímeros de consistencia rígida, diferenciados en dos grupos: termoplásticos y termoestables.

Los termoplásticos son el grupo más numeroso, se caracterizan por ser, en general, dúctiles, de comportamiento viscoelástico que, al calentarse, se reblandecen y pueden deformarse plásticamente.

Los termoestables, como su nombre indica, una vez polimerizados no se deforman en caliente y mantienen su consistencia.

En general los plásticos, y de manera más destacada los termoplásticos, presentan fuertes variaciones de sus propiedades mecánicas con la temperatura, fenómeno que habrá que tener en cuenta en las condiciones de operación del material y en el entorno de ensayo.



## 2.5. POLIAMIDA 6 – NANOTUBOS DE HALLOYSITA

*Poliamida (PA)*: termoplástico semicristalino que posee buena resistencia mecánica, tenacidad y resistencia al impacto; también posee buena resistencia al desgaste; por ello es apropiado en construcciones mecánicas y productos industriales. Se comercializa bajo diferentes marcas como pueden ser Nylon, Grilon, Durethan B, Nylatrom, etc.

Para poliamidas de diferente naturaleza pueden existir fuertes diferencias en sus propiedades.

*Nanotubos halloysita (NTH)*: nano partículas de estructura tubular hueca de aluminio silicato natural que se usan como aditivos de polímeros para mejorar sus propiedades.

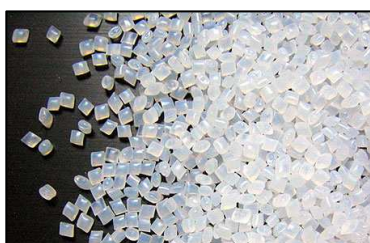


Figura 13: Poliamida 6

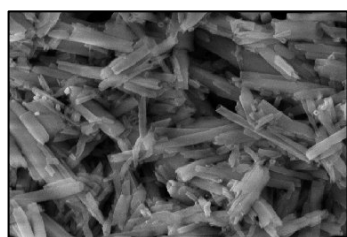


Figura 14: Nanotubos de halloysita

Se dispondrá de cuatro tipos de muestras de matriz de poliamida 6 con diferentes porcentajes de nanotubos de halloysita, que diferenciarán sus propiedades mecánicas.

- Poliamida 6 natural sin NTH (PROBETA B).
- Poliamida 6 con un 3% de NTH (PROBETA C).
- Poliamida 6 con un 6% de aditivo de NTH (PROBETA D).
- Pleximer: poliamida 6 con un 30% de NTH (PROBETA E).

Los materiales nanoaditivados fueron creados en base a una matriz polimérica de poliamida 6 BADA, fundida con un masterbatch de poliamida 6, con un porcentaje del 30% de nanopartículas de nanotubos de halloysita Naturalnano.

Estos dos material son obtenidos de diferente proveedor por lo que pueden existir diferencias entre las propiedades de la poliamida 6, referente a la matriz general y la poliamida 6 de la matriz del masterbatch.

La probeta de pleximer es creada a partir de la fundición del masterbatch original; y la poliamida 6 natural de la probeta B, corresponde a la matriz general de las muestras.



## 2.6. VIBRACIONES

Una vibración es una oscilación mecánica respecto a una posición de referencia, que origina deformaciones y tensiones sobre el material en el que se produce.

Las vibraciones se caracterizan por las siguientes variables:

- Frecuencia: número de veces por segundo que se completa el ciclo de oscilación, medido en Hz.
- Amplitud, indica la intensidad de la vibración.
- Sentido de la vibración según las coordenadas x, y, z.

El objetivo del proyecto es utilizar las vibraciones como carga cíclica para realizar ensayos de fatiga, provocadas por la máquina vibratoria anteriormente descrita.

El análisis de las vibraciones inducidas en la probeta nos mostrará el comportamiento del material estudiado en este esfuerzo.

Cuando un cuerpo vibra y se pone en contacto con otro, el segundo se ve forzado a vibrar a la misma frecuencia que el original, por ello las vibraciones en este segundo elemento serán vibraciones forzadas.

En nuestro caso la máquina vibratoria provocará en la probeta una vibración forzada a una frecuencia determinada y una amplitud definida.

Cómo sabemos los cuerpos elásticos tienen ciertas frecuencias naturales (frecuencias a las que tiende el material a vibrar), dependientes de las características del propio material del que están compuestos y de las condiciones de contorno a las que están sometidos. Si la vibración de excitación ( $\Omega$ ) que se le transmite coincide o está muy próxima a una de esas frecuencias naturales ( $\omega_n$ ) se produce lo que se llama fenómeno de resonancia ( $\Omega = \omega_n$ ).

Cuando el fenómeno de resonancia ocurre, los niveles de vibración pueden aumentar notablemente y causar daños en el material rápidamente.

Para la elección de los puntos de medición de las vibraciones y el logro de unos datos correctos en el desarrollo del ensayo, hay que tener en cuenta diversos factores:



- La superficie de medida debe de ser lo más lisa posible.
- Debe el captador estar en el camino más directo a la fuente generadora de la vibración.
- La masa del medidor no debe ser mayor del 10% de la masa del sistema a analizar.
- Los cables deben estar correctamente extendidos sin pliegues para evitar el ruido en ellos, y realizar una correcta medida.
- No debe de estar deformada la base de colocación.
- Los transductores no pueden estar expuestos a humedad, sustancias corrosivas, campos magnéticos, radiación, ruido acústico, ni altas temperaturas si no están preparados para ello.

### 2.6.1. ACELERÓMETRO

Un acelerómetro mecánico es un instrumento destinado a medir aceleraciones, de acuerdo a la ley fundamental de la dinámica o segunda ley de Newton:  $F = m \cdot a$ .

Su construcción se basa en una masa ( $m$ ) unida a un dinamómetro, la masa es conocida y el dinamómetro mide el módulo de la fuerza actuante ( $F$ ), de este modo queda como variable dependiente la aceleración ( $a$ ).

El acelerómetro es uno de los transductores más versátiles, siendo el más común el piezoeléctrico por compresión (*fig.15*). Este se basa en que, cuando se comprime un retículo cristalino piezoeléctrico, se produce una carga eléctrica proporcional a la fuerza aplicada.

Los elementos piezoeléctricos se encuentran comprimidos por una masa, sujeta al otro lado por un muelle y todo el conjunto dentro de una caja metálica. Cuando el conjunto es sometido a vibración, el disco piezoeléctrico se ve sometido a una fuerza variable, proporcional a la aceleración de la masa.

Debido al efecto piezoeléctrico se desarrolla un potencial variable que será proporcional a la aceleración.

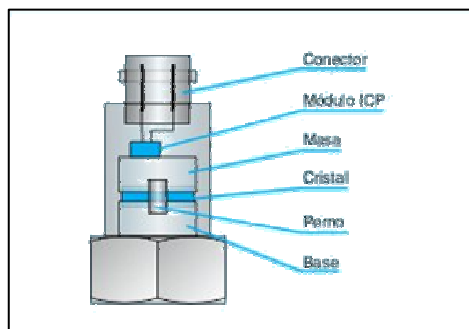


Figura 15: Acelerómetro piezoeléctrico



## 2.6.2. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Hoy en día se utiliza el monitoreo y análisis de vibraciones con el fin de establecer cuál es el estado de salud mecánica de elementos críticos en máquinas y evitar la falla de estas.

En nuestro caso, la utilidad será detectar en qué momento y bajo qué circunstancias se ha producido el daño en el material ensayado expuesto a condiciones de movimiento vibratorio.

Estos estudios se llevan a cabo mediante distintas técnicas de análisis de señales vibratorias, algunas de las cuales se describen brevemente a continuación:

### ■ ANÁLISIS FRECUENCIAL O ESPECTRAL

Es la técnica más comúnmente empleada para el diagnóstico de fallas.

La idea fundamental del análisis de frecuencia es encontrar la relación existente entre la frecuencia de los componentes discretos presentes en el espectro y la frecuencia de las fuerzas dinámicas que generan las vibraciones.

Un espectro de vibración (*fig.16*) es una gráfica de cálculo de datos que enfrenta frecuencia y amplitud de la vibración; La frecuencia determina la fuente de vibración, mientras que la amplitud determina la severidad del problema.

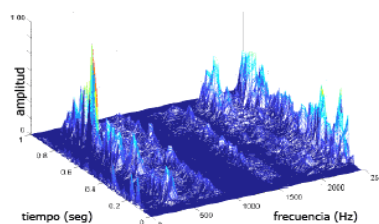


Figura 16: Ejemplo de espectro de frecuencias

### ■ ANÁLISIS DE ONDA

Análisis de la vibración en el tiempo, útil cuando los espectros de fallos diferentes son similares. Determina la amplitud en función del tiempo.

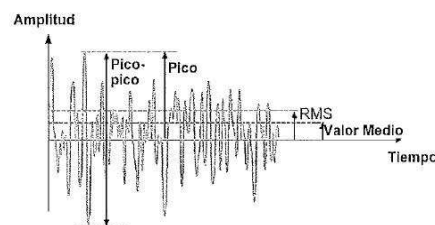


Figura 17: Ejemplo análisis de onda

### ■ ANÁLISIS DE FASE

Es el estudio de la diferencia de tiempo entre dos acontecimientos relacionados entre sí. Su análisis permite, por ejemplo, conocer la forma de deflexión en operación de un elemento.





#### ▪ ANÁLISIS DE ORBITAS

Consiste principalmente en analizar la gráfica de la amplitud de la vibración horizontal  $X(t)$ , en función de la vertical  $Y(t)$ , para una sola frecuencia a la vez.

#### ▪ ANÁLISIS DE COHERENCIA

Análisis que permite relacionar causa-efecto entre dos señales vibratorias, estimando la relación lineal que existe entre dos señales.

Otras técnicas de análisis de vibraciones utilizadas demodulación o análisis de envolvente, análisis de transientes, análisis de partidas o paradas, análisis cepstrum, entre otras. Las más utilizadas actualmente son las dos primeras definidas, análisis de espectros de frecuencia y forma de onda.

En el proyecto, el análisis de vibraciones con mayor relevancia será el valor característico RMS, debido a que el estudio se realizará de la máquina global y los espectros de frecuencia serán muy complicados, con gran variedad de frecuencias de todos los componentes del dispositivo.

Este valor característico proporcionará información sobre el nivel de vibración del espectro de frecuencia, es decir de la severidad de la vibración en función del tiempo. Su definición es:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{2} \sum Amplitud^2}$$

Su caracterización temporal nos mostrará una gráfica de tendencia de la severidad vibratoria.

Siempre y cuando la pendiente sea suave, tomaremos la vibración estable, pero si llega a presentarse un crecimiento grande, o cambio abrupto en la gráfica, en la mayoría de casos, será porque se acerca la falla física.

La representación del valor característico RMS será de gran importancia en el proyecto, delatando el tiempo, y por tanto el número de ciclos que ha soportado la probeta.

#### 2.6.3. VIBRACIONES FORZADAS CON AMORTIGUAMIENTO

Vibración provocada por una perturbación que perdura en el tiempo ( $F(t)$ ), en la que el sistema que es obligado a vibrar tiene la capacidad en mayor o menor medida de disipar la energía cinética que se le proporciona, en otro tipo de energía que suele ser térmica.



La amortiguación está presente en todos los sistemas de vibración reales, lo que significa que carecer de amortiguación es una idealización teórica.

La ecuación del movimiento se corresponde con la ecuación diferencial:

$$F(t) = kx(t) + c\dot{x}(t) + m\ddot{x}(t)$$

Siendo:

$k$  = característica elástica de la estructura [N/m]

$c$  = característica disipativa de la estructura [N·s/m]

$m$  = masa del sistema [kg]

Las oscilaciones de estudio serán de este tipo, forzadas porque obligaremos a las probetas a vibrar a la frecuencia de entrada por medio de la máquina diseñada; y amortiguada porque es un sistema real.

Debido a los fenómenos físicos que experimente el sistema, se distinguen varios tipos de amortiguamiento:

- *Amortiguamiento de fricción o de Coulomb*: la fricción de las partículas de la estructura externa frena las acciones. Describe el comportamiento de rozamiento entre superficies secas.
- *Amortiguamiento viscoso*: Presenta mecanismos de iteración con la estructura que permiten disipar la energía, cómo puede ser un fluido (por ejemplo aire).
- *Amortiguamiento estructural o por histéresis*: Se provoca por la fricción intermolecular cuando se deforma un cuerpo sólido.

Diferenciando además la capacidad de disipar energía del sistema nos podemos encontrar con la siguiente clasificación (fig.18):

- *Amortiguamiento subcrítico (o subamortiguamiento)*, se produce cuando la fuerza disipativa es menor a la fuerza de excitación, existe una vibración en la que la amplitud del movimiento decae con el tiempo según una ecuación exponencial.
- *Amortiguamiento crítico*, la fuerza de disipación y excitación se igualan, lo que provoca que el sistema apenas oscile regresando a su posición de equilibrio sin rebasarla o rebasándola una sola vez.
- *Sobreamortiguamiento*, la fuerza de disipación de energía es mayor a la de excitación, no existe oscilación; el sistema es capaz de disipar rápidamente la energía y volver al equilibrio.

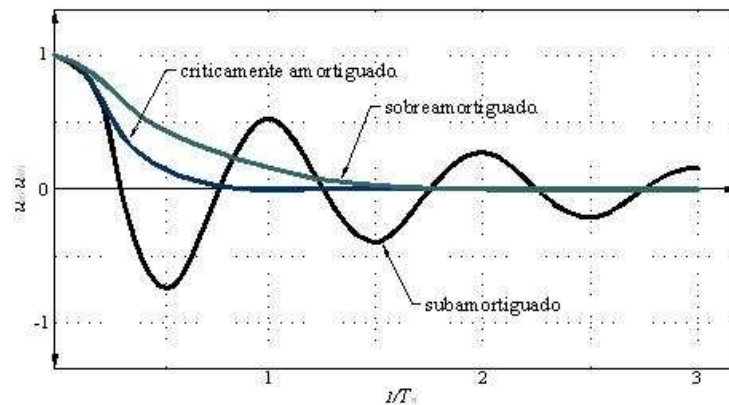


Figura 18: Tipos de amortiguamiento

Para caracterizar las propiedades dinámicas de cada sistema a analizar, se definirán cada uno de los parámetros de la ecuación,  $m$ ,  $k$  y  $c$ , por medio del siguiente procedimiento:

- Tomar medidas de las masas para cada tipo de probeta ensayada, de este modo quedará determinado el parámetro  $m$ .
- Colocar una de las probeta empotrada en voladizo mediante la mordaza recta de la maquina vibratoria con un acelerómetro en el eje vertical adherido a esta con cera de abeja.
- Aplicar una vibración puntual a la probeta y dejar en vibración libre. Se extraerán los datos de medida temporal de la aceleración, que posteriormente se procesarán para cuantificar la amplitud. La gráfica mostrará que se trata de un sistema subamortiguado.
- Calcular el decremento logarítmico ( $\delta$ ) de la señal mediante la ecuación:  $\delta = \ln \frac{x_p}{x_{p+1}}$ , siendo  $x_p$  y  $x_{p+1}$  medidas de amplitudes consecutivas.
- Calcular el coeficiente de amortiguación viscosa ( $\alpha$ ) mediante la fórmula:  $\alpha = \frac{\delta}{2\pi}$
- Determinar el periodo amortiguado ( $T_a$ ) mediante la gráfica temporal de la señal, contando el tiempo en que se completa un ciclo. Extraer la frecuencia amortiguada ( $\omega_a$ ) y la natural ( $\omega_n$ ) del sistema mediante la siguiente ecuación:

$$\omega_a = \frac{2\pi}{T_a} \rightarrow \omega_n = \frac{\omega_a}{\sqrt{1-\alpha^2}}$$



- Definir los parámetros constantes del sistema:
  - Masa,  $m$
  - Rigidez,  $k = m \cdot \omega_n^2$
  - Coeficiente de amortiguamiento,  $c = 2 \cdot m \cdot \alpha \cdot \omega_n$

El trabajo, experimental y de cálculo, realizado para la determinación de los parámetros dinámicos de cada probeta y la descripción de la vibración forzada producida, se describe más detalladamente en el *Anexo IV: Caracterización Dinámica de Materiales*.



### 3. ANÁLISIS DE COMPONENTES

#### 3.1. EQUIPO EXPERIMENTAL

##### 3.1.1. MÁQUINA

##### 3.1.1.1. MODELIZADO CON Pro ENGINEER

Para el análisis de la máquina vibratoria se ha realizado la modelización de la misma en el programa de CAD 3D Pro ENGINEER 5.0; esto mostrará si el movimiento forzado en la probeta es el deseado.

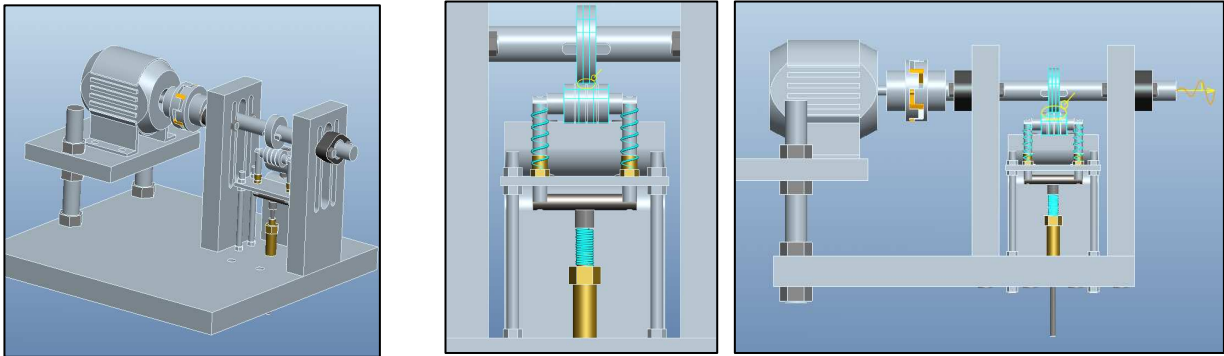


Figura 19: Modelado 3D de la máquina de leva en Pro Engineer 5.0

##### 3.1.1.1.1. PARÁMETROS Y CONFIGURACIÓN

Ha sido necesario caracterizar todos los elementos que componen la máquina para que el programa realizara los cálculos correctos. Los datos necesarios para el análisis dinámico realizado han sido:

##### MASA

Para poder representar la carga de la máquina vibratoria serán necesarias las masas de los elementos dinámicos del conjunto.

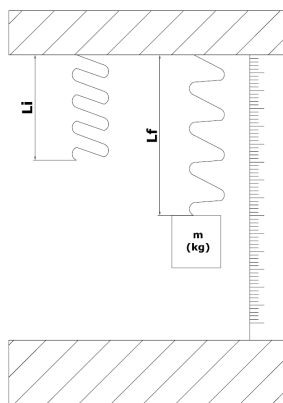
Estos datos serán insertados para cada elemento, en las propiedades de masa, y junto con la geometría diseñada quedará definido el volumen y la densidad de cada elemento además de los momentos de inercia.



COMPONENTE	MASA (g)	COMPONENTE	MASA (g)
Eje	705,50	Expulsor (pulsador abajo)	40,00
Acoplamiento	500,00	Leva	262,00
Goma de acoplamiento	55,50	Chaveta	7,50
Rodamiento	198,00	Rodamiento del pulsador	40,75
Sujeción de rodamiento	198,00	Separadores rodamiento	40,75
Perno de sujeción de rodamiento	20,00	Varilla acero vertical	14,00
Tuerca de rodamiento	10,00	Barra horizontal del pulsador	21,50

Tabla 2: Masa de componentes dinámicos

## MUELLES



Los muelles colocados se caracterizaron por el siguiente procedimiento experimental:

Se tomaron medidas de los distintos muelles en longitud natural y con diferentes masas colgando (*fig.20*), de este modo se pudo construir una tabla y posteriormente su gráfica enfrentando peso (N) e incremento de longitud que sufre cada muelle (m), para poder asimilar los datos a una ecuación lineal.

Figura 20: Caracterización de muelles

La pendiente de estas rectas de regresión, pasantes lógicamente por el origen (0,0), ya que el muelle no sufrirá alargamiento sin masa colgando, coincidirá de una manera aproximada con la constante de rigidez de cada muelle debido a la construcción experimental de la Ley de Hooke:

$$F = K \cdot x$$

Siendo:

- F: fuerza a la que sometemos al muelle, en nuestro caso el peso (N).
- K: constante de rigidez del muelle (N/m).
- x : incremento de longitud que presentará el muelle, ( $\Delta Y$  en m)

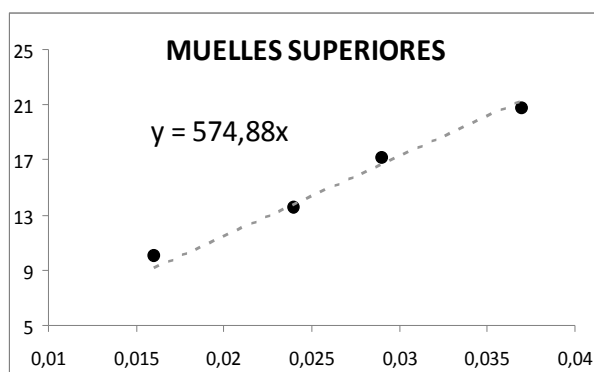
Los resultados obtenidos se describen a continuación:



### MUELLE SUPERIOR DE LA MÁQUINA DE LEVA:

MUELLE PULSADOR PARTE DE ARRIBA				Lnat = 4,6 cm.
MASA (kg)	LF (cm)	$\Delta Y = LF - LI$ (cm)	PESO (N)	$\Delta Y$ (m)
1,020	6,200	1,600	9,998	0,016
1,383	7,000	2,400	13,558	0,024
1,746	7,500	2,900	17,122	0,029
2,114	8,300	3,700	20,726	0,037

Tabla 3: Datos experimentales, muelle superior



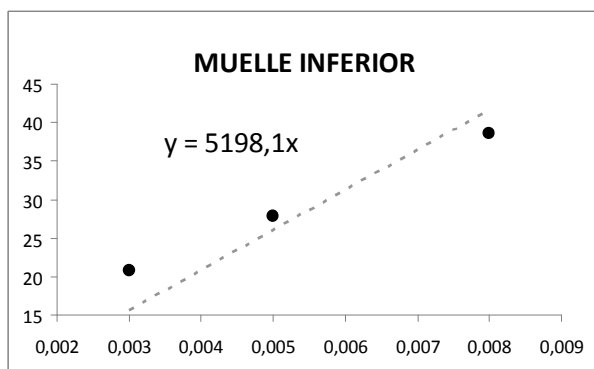
La constante de rigidez para los muelles superiores se asimilará a 575 N/m.

Gráfico 1: Relación Peso(N)-Elongación (m) muelle superior

### MUELLE INFERIOR DE LA MÁQUINA DE LEVA:

MUELLE PULSADOR PARTE DE ABAJO				Lnat = 9,2 cm
MASA (kg)	Lf (cm)	$\Delta Y = Lf - Li$ (cm)	PESO (N)	$\Delta Y$ (m)
2,114	9,500	0,300	20,726	0,003
2,837	9,700	0,400	27,821	0,004
3,928	10,00	0,800	38,516	0,008

Tabla 4: Datos experimentales, muelle inferior



La constante de rigidez K para el muelle inferior se asimilará a 5200 N/m.

Gráfico 2: Relación Peso(N)-Elongación (m) muelle inferior



Tendremos en cuenta que no nos resultará un cálculo exacto de la rigidez, debido a los errores de medición derivados tanto de los utensilios de medida (báscula y metro), como de la percepción de los datos y montaje del conjunto por parte del operario.

Cómo método comparativo al experimental se ha utilizado la fórmula de la constante de rigidez para muelles helicoidales, asumiendo que el material del que están fabricados los muelles es acero. Esto nos proporcionará otro dato sobre la constante de rigidez, dándonos una idea del rango que debe alcanzar, verificando la fiabilidad de los datos experimentales:

$$K = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot n}$$

Siendo:

- K= constante de rigidez del muelle (N/m).
- G= módulo de elasticidad transversal del material del muelle (Pa).
- d= diámetro del alambre (m).
- D=diámetro de la espira del muelle (m).
- n=número de espiras

	MUELLE SUPERIOR	MUELLE INFERIOR
G	$81 \cdot 10^9$ Pa	$81 \cdot 10^9$ Pa
d	0.001 m	0.002 m
D	0.01265 m	0.0142 m
n	9	13
K	556 N/m	4352 N/m

Tabla 5: Características de los muelles

Los datos por ambos métodos se encuentran en un intervalo parecido, pero se tomará como dato correcto el calculado experimentalmente, ya que se ha definido tomando las variables de los muelles utilizados, aproximándose más a su comportamiento real. De este modo se usarán como característica de los muelles las siguientes constantes:

$$K_{\text{SUPERIOR}} = 575 \text{ N/m}$$

$$K_{\text{INFERIOR}} = 5200 \text{ N/m}$$





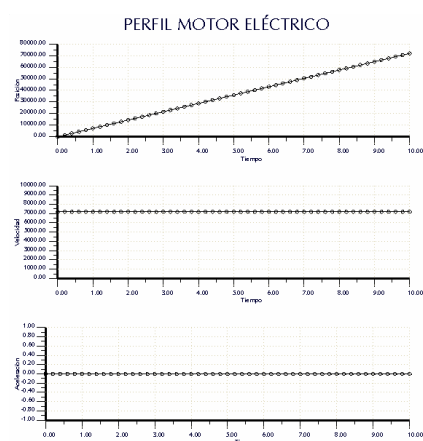
Se insertaron en el programa de cálculo (*fig.21*), definiendo además de su constante de rigidez (Stiffness) obtenida experimentalmente, su diámetro (diameter) y la longitud sin deformar (length\_unstretched), medidos con un pie de rey.

Nombre	Valor	Unidad
SPRING_STIFFNESS	0.575000	N / mm
SPRING_LENGTH_UNSTRETCHED	25.0000...	mm
SPRING_DIAMETER	10.0000...	mm

Nombre	Valor	Unidad
SPRING_DIAMETER	10.000000	mm
SPRING_LENGTH_UNSTRETCHED	69.000000	mm
SPRING_STIFFNESS	5.200000	N / mm

Figura 21: Parametrización de los muelles

## MOTOR



El motor eléctrico (*fig.22*) se ha asumido como un motor cinemático que provoca el giro en el eje a una velocidad constante de 7200°/s (20 Hz). El sentido de giro nos es indiferente.

Figura 22: Parametrización del motor eléctrico

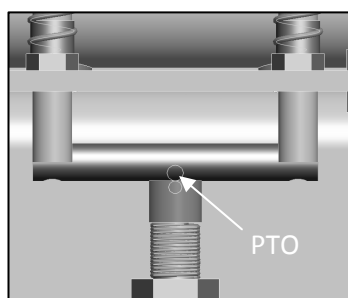
## ANÁLISIS

Se habilitó un análisis dinámico del conjunto, en el que se definieron las siguientes medidas:

- Posición del pulsador
- Velocidad del pulsador
- Aceleración del pulsador
- Fuerza de muelle superior
- Fuerza del muelle inferior

### 3.1.1.1.2. RESULTADOS

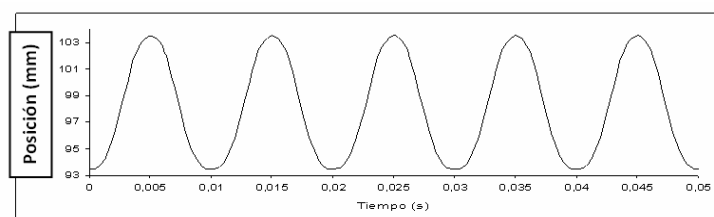
Se realizó el análisis de estas variables para cerciorarnos de que el movimiento era el deseado, movimiento armónico simple con una amplitud de 10 mm y una transición suave entre los ejes de la leva para disminuir en la medida de lo posible el deterioro de la máquina.



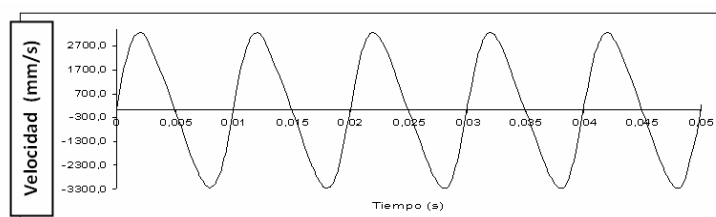
El punto de medida escogido se representa en la *fig.23*. Está contenido en el expulsor utilizado como pulsador inferior de la máquina de leva.

*Figura 23: Punto de análisis en ProE*

En el *gráfico 3*, se puede observar que la variación de posición del punto de análisis es de 10 mm y que los cambios de dirección arriba-abajo y viceversa se realizan de forma progresiva, ya que no existen “picos” en las posiciones máximas y mínimas.



*Gráfico 3: Posición, resultado del análisis en ProE*



*Gráfico 4: Velocidad, resultado del análisis en ProE*

La velocidad (*gráfico 4*) es máxima (positiva o negativa) cuando la posición es la mitad de su amplitud, es decir, cuando la leva contacta en su eje menor; y es nula cuando la posición es máxima o igual a la amplitud (positiva o negativa), es decir, cuando la leva contacta con el cilindro del pulsador en la posición extrema, eje mayor.

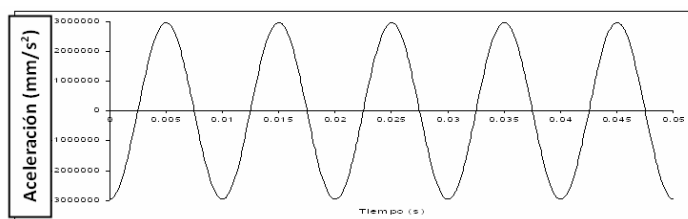


Gráfico 5: Aceleración, resultado del análisis en ProE

Los gráficos obtenidos de la simulación con ProENGINEER 5.0, muestran un movimiento periódico, descrito por una función armónica, con las características de un movimiento armónico simple de amplitud 1 cm.

Las gráficas de velocidad y aceleración han sido ligeramente corregidas y suavizadas, para su visualización, ya que debido a una acumulación progresiva de errores cometidos por el programa al ir obteniendo las magnitudes derivadas y a la forma de leva no totalmente regular, las gráficas mostraban puntos de imprecisión.

La fuerza de los muelles también se rige por una onda periódica senoidal.

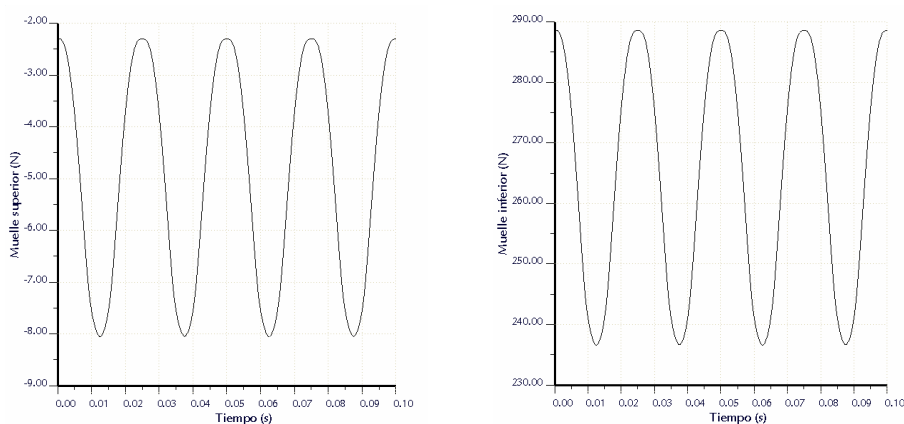


Gráfico 6: Fuerza de muelles, resultado del análisis en ProE.

### 3.1.1.2. CÁLCULO DE FRECUENCIA Y CARGA

La frecuencia seleccionada en el motor mediante el variador de frecuencia para los ensayos será de 20 Hz, fijada a partir de la realización de diversas y extensas pruebas en la máquina de ensayo, especificadas en el *Anexo III: Acondicionamiento de la Máquina de leva*.



Este dato de frecuencia asegurará el correcto funcionamiento del conjunto del ensayo y cumplirá con el objetivo del proyecto, aumentando la frecuencia de operación de ensayos convencionales.

El motor gira a 2830 rpm cuando trabaja a 50 Hz por lo que por una sencilla regla de tres, sabremos que realizará 1132 rpm a 20 Hz, o lo que es lo mismo 18,8666 revoluciones en un segundo.

Cómo por cada revolución del motor se produce dos flexiones en la probeta, debido a la forma de la leva, la frecuencia del motor será el doble en la probeta, 37,73 Hz.

Introduciremos en la probeta 37,73 ciclos/s, o lo que es lo mismo 237,085 rad/s. Esta será la frecuencia de excitación de la probeta ( $\Omega$ ).

La fuerza temporal armónica de la vibración forzada vendrá dada por la siguiente ecuación:

$$F(t) = F_0 \cdot \text{sen}(\Omega t)$$

Siendo:

$F_0$ : Amplitud de la onda senoidal (N)

$\Omega$ : Frecuencia de excitación (rad/s)

La amplitud máxima de la onda será el esfuerzo necesario para generar en la probeta un desplazamiento de flexión de 10 mm, dependiente del propio material. Este dato se especifica en el *Anexo IV: caracterización dinámica de materiales*.

La frecuencia de excitación será la frecuencia de trabajo inducida en la probeta anteriormente calculada, 237,085 rad/s.

### 3.1.2. SENSORES DE VIBRACIÓN

Se ha justificado la validez de los acelerómetros escogidos mediante los siguientes criterios:

**Masa:** El conjunto del sensor, usado en la medición no debe de suponer más del 10% de la masa del sistema analizado, suponiendo una modificación de la propiedad si se sobrepasase este porcentaje.

Para la realización del ensayo, aunque no se han tomado medidas de la masa del total del conjunto, es de absoluta certeza que esta medida será mayor que 0,018 kg, límite impuesto por los 18 g de masa del conjunto del acelerómetro y el cubo de colocación de este.



Por tanto la masa del sensor de vibraciones será despreciada en el sistema analizado, ya que en ningún caso superará el 10% de la masa del conjunto.

En el procedimiento del cálculo de la constante de amortiguamiento de cada probeta, se utiliza sólo el sensor, con una masa de 6 g, adherido a la probeta con cera de abeja, que añadirá unos 0,5 gramos más de masa.

La probeta de menor peso ensayada tendrá una masa de 9g, por lo que el sensor representará aproximadamente el 67% de su peso, modificando la propiedad estudiada.

Para corregir la influencia que supondrá la masa del acelerómetro al calcular el coeficiente de amortiguamiento, se ha realizado un estudio experimental, totalmente definido en el apartado 3.3.1.

*Estudio experimental: Dependencia de la masa del Anexo IV: Caracterización dinámica de materiales.*

**Rango de frecuencia:** estos acelerómetros son capaces de medir frecuencias en un rango de 2 a 10.000 Hz, intervalo en el que se encuentra nuestra frecuencia de medida.

### 3.1.3. EQUIPO DE MEDIDA

#### 3.1.3.1. FILTROS

Denominamos ancho de banda a un intervalo de frecuencias relativamente estrecho en el que se concentra la mayor parte de la energía de la señal.

Este dato lo controlaremos mediante el filtro de paso-bajo (“low-pass”) que actuará como filtro, tomando medidas de las señales que tenga la frecuencia menor de su valor.

Se fijará el filtro de paso-bajo en cada probeta según sus frecuencias naturales, este valor no sobrepasará los 2 kHz.

#### 3.1.3.2. FRECUENCIA DE MUESTREO, ALIASING

La frecuencia de muestreo (sample rate) definirá la cantidad de muestras de la señal que tomará para realizar su representación.

Una frecuencia de muestreo alta realizará una buena representación de la señal pero sobrecargará el almacén de datos, en cambio una baja frecuencia de muestreo puede darnos una representación errónea de la señal, lo que se conoce como “aliasing” (*fig.24*), por ello será necesario fijar un valor óptimo.



El criterio de Nyquist nos proporcionará el valor adecuado para este factor:

$$F_M > 2 \cdot F_{m\acute{a}x}$$

Siendo  $F_{m\acute{a}x}$  la frecuencia más alta contenida en la señal.

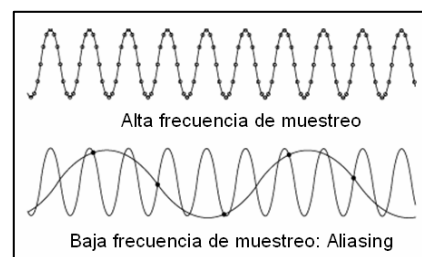


Figura 24: Ejemplo de "Aliasing"

### 3.1.3.3. FFT, LEAKAGE

Para calcular el contenido de frecuencia de una señal, ya sea analógica o digital se requiere disponer de todos sus valores, sin embargo, en la práctica solo es posible tener un número finito de ellos, esto trae como consecuencia que el espectro de la señal solamente pueda ser aproximado.

Para adquirir la señal nos limitamos a un intervalo de tiempo  $LT$ , donde  $L$  es un intervalo de tiempo entero y  $T$  el intervalo de muestreo.

Esta necesidad de realizar un registro temporal de longitud finita, aproximando la transformada de Fourier, se realiza mediante la FFT (Fast Fourier Transform), lo que provoca el efecto de replicar el registro temporal de longitud finita sobre todo el tiempo.

Si el registro tomado no corresponde con un múltiplo exacto del periodo de la señal, se producirá el leakage y se introducirá en la señal un transitorio.

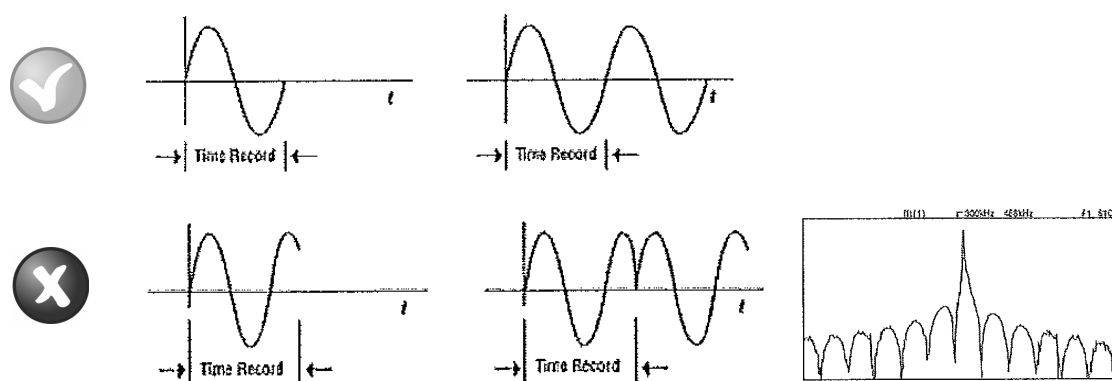


Figura 25: Ejemplo de "leakage"

Cómo solución a este efecto se seleccionará la ventana de "Hanning" que proporciona una transición suave a cero en ambos extremos del registro temporal. Por lo tanto, este enventanado del registro temporal no producirá un transitorio cuando sea replicado por el algoritmo de FFT.

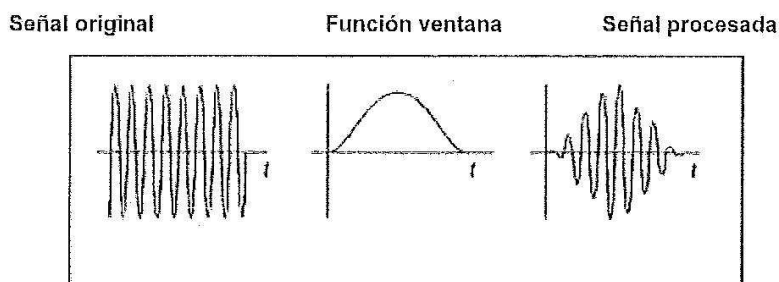


Figura 26: Efecto ventana "hanning"

Debemos aclarar que se ha modificado el registro temporal original y por consiguiente se debe considerar el efecto introducido en el dominio de la frecuencia.

La ventana Hanning proporciona la buena resolución de la frecuencia a expensas de ser algo menos exacto en la amplitud. Se activará únicamente en el estudio de espectrómetros de frecuencia.

#### 3.1.3.4. RESOLUCIÓN ESPECTRAL, PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE

El principio de incertidumbre establece que, en cualquier experimento que sea diseñado para medir la posición de una partícula y simultáneamente su velocidad se obtendrán incertidumbres en la posición y velocidad cuyo producto siempre superará un valor mínimo.

Esto significa que si se intenta medir con gran precisión la posición de una partícula, se obtendrá una gran incertidumbre en su velocidad o cantidad de movimiento con lo que no podremos predecir cuál será su próxima posición. Análogamente, si medimos con gran precisión la cantidad de movimiento de una partícula, obtendremos una gran imprecisión en su posición, con lo cual tampoco podremos predecir su evolución futura.

Pero si aplicamos este principio a nuestro caso, la conclusión que obtenemos es que no podemos controlar con mucha precisión nuestra señal a la vez en tiempo y frecuencias.

Todos los parámetros que se han citado anteriormente tienen relación entre ellos, y en el software utilizado no se pueden fijar independientemente, quedarán fijados cada uno de ellos a partir de una entrada de "low-pass" (fig.27).

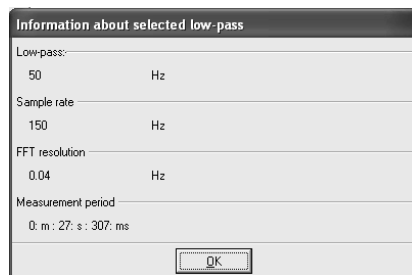


Figura 27: Dependencia de parámetros

### 3.1.3.5. CONFIGURACIÓN DE MEDIDA

Para la captación de vibraciones mediante el Dtect X1 y su monitorización mediante el software es necesaria la configuración de varios parámetros.

Primero es necesario definir un caso genérico (CASO A) a medir, dentro de una base de datos, y en base a éste, diferentes monitorizaciones o configuraciones de medida.

En cada uno de estos niveles hay que configurar diferentes datos, que se explican a continuación.

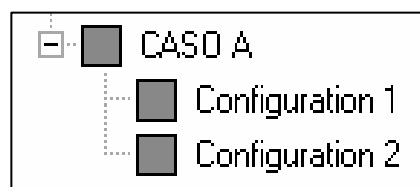


Figura 28: Orden de configuración

Los *datos generales (caso A)* del caso a medir que hay que definir se concentran en las tres siguientes pestañas:

- *General settings*, en ella se establecerán las condiciones de alarmas (alarm condition), de la descarga de datos automática (remote settings) y el tiempo de inicio de medida (boot delay).
- *Sensors*, describe las características de los tacómetros utilizados, como es el tipo de entrada al equipo de medida, el tipo de sensor y la sensibilidad del captador.
- *Over view*, es un resumen de los datos más característicos de la configuración del dispositivo.

La configuración de la *monitorización (configuración 1,2)* es más extensa y se divide en las siguientes pestañas:

- *Data*, es el interfaz de registro de todas las medidas realizadas, ordenadas según hora y fecha. En esta ventana se puede acceder a las gráficas de cada una de las medidas grabadas.
- *General data* permite detallar la medida que debe tomar el dispositivo, en esta pestaña se fijan valores como el low pass y el parámetro a monitorizar.





- *Window options* detalla los intervalos de frecuencia a capturar y los valores de alarma necesarios. El número máximo de intervalos que permite configurar es 12.

Estos parámetros a fijar para la utilización del equipo de medida Dtect X1, variarán en cada ensayo, siendo dependientes de la característica a medir (ensayo o constante de amortiguamiento) y del material (según sus frecuencias naturales).

Se definirán concretamente en el apartado 9.3.4 *PC y configuración* de este mismo documento.

Al ser un ensayo de tiempo extenso, será conveniente que el mismo PC descargue los datos medidos de forma automática, por lo que será necesario realizar una configuración remota.

Esta utilidad se ordenará en la configuración de la medida mediante las siguientes pestañas:

- *Saving options*, determina a partir de cuándo se comienzan a guardar los datos, pudiendo elegir entre:
  - Guardar siempre.
  - Guardar en la medida número x.
  - Guardar cada un intervalo determinado en tiempo.
  - Guardar cuando se sobrepase un cierto valor característico.
- *Remote*, fijará cuando se ha de realizar la comunicación con el Dtect X1 (según un intervalo de tiempo, cuando se sobrepase un valor de vibración...) y los datos a grabar como pueden ser FFT, time signal, etc.

### 3.2. TEMPERATURA

La temperatura no es uno de los puntos de estudio del proyecto, pero no se puede ignorar su influencia sobre los materiales estudiados. Por ello se llevará a cabo un control de la temperatura de todos los elementos participantes, mediante la pistola de temperatura Thermopoint TPT40.

Los ensayos se realizarán a temperatura ambiente y se fijará un valor de 22°C para los análisis dinámicos.



### 3.2.1. THERMOPOINT TPT40

La pistola de temperatura Thermopoint TPT40 toma datos de temperatura de una superficie según su emisividad térmica.

La emisividad térmica es la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto, debida a una diferencia de temperatura determinada, es la transferencia de calor debida a la emisión de ondas electromagnéticas entre dos superficies y no necesita de un medio para llevarse a cabo. Todo cuerpo por encima del cero absoluto emite radiación.

Es una propiedad de los materiales que informa sobre la capacidad o eficiencia de este para emitir radiación comparada con un cuerpo negro (que no refleja).

Este dato es complicado de determinar exactamente para los materiales del proyecto, por lo que se fijará el valor de emisividad en  $\epsilon=0.95$  para todas las probetas, dato recomendado en el manual de la pistola de temperatura para materiales poliméricos.

El objetivo de las mediciones en la probeta es detectar el valor de temperatura alcanzado, para proporcionarnos un intervalo aproximado de la temperatura de transición vítrea en el caso de que se produjera falla térmica.

La pistola térmica también será utilizada para el control de temperatura de los componentes de la máquina de leva, con el fin de detectar posibles sobrecalentamientos.

En este caso se continuará con el valor fijado de emisividad a 0,95, ya que, aunque los datos obtenidos, no se correspondan con valores reales, el interés de la medición se limita a la existencia de aumentos y no a datos concretos de temperatura.



## 4. ANÁLISIS DINÁMICO DE MATERIALES

### 4.1. INTRODUCCIÓN

Técnica de estudio del comportamiento dinámico de estructuras, dónde la inercia y el factor de amortiguamiento influyen en gran medida.

El comportamiento dinámico engloba los siguientes aspectos:

- Tipo y frecuencia de vibración.
- Efecto de cargas variables en el tiempo.
- Efecto de la frecuencia de las cargas.

Al realizar el análisis dinámico se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se deben incluir los detalles necesarios para la representación de la masa del sistema.
- El mallado será fino puesto que estamos interesados en la distribución de las tensiones que se producirán en el elemento ensayado.
- Se deberán especificar cómo propiedades: el módulo de Young y la densidad del material.

La realización de los análisis conllevará los siguientes pasos:

1. Construcción del modelo, de la realidad de la geometría y de las propiedades del material.
2. Configuración del análisis.
3. Imposición de las condiciones de contorno, apoyos y cargas que existan sobre el elemento.
4. Cálculo e interpretación de resultados.

### 4.2. ANALISIS MODAL

Determina las características dinámicas de la estructura, reflejando:

- Frecuencias naturales: aquellas a las que el elemento tiende a vibrar en oscilación libre.
- Formas modales: tipos de vibración que puede presentar.
- Factor de participación modal: importancia de cada modo con respecto al resto. Valores altos en una dirección indica que dicho modo puede ser excitado por fuerzas en dicha dirección.

Este análisis permitirá disponer de la frecuencia de resonancia y de una simulación de la respuesta del elemento a las cargas dinámicas.



### 4.3. SOFTWARE DE CÁLCULO

Los cálculos dinámicos de los materiales se realizaron mediante los módulos de análisis, modal y estático, de Ansys Workbench 12.1.

#### 4.3.1. FIABILIDAD DE RESULTADOS

Con el fin de asegurarnos de la fiabilidad de los resultados obtenidos con el software y la correspondencia con los datos teóricos y experimentales se realizó el siguiente estudio comparativo, basándonos en la solución teórica y experimental obtenida de los documentos (*“Frecuencias naturales en vigas de pared delgada doblemente asimétricas”*, Daniel Ambrosini y Rodolfo Danesi (1) y *“Determinación experimental de los parámetros modales”* Luís Antonio Bedian ríos (2)), a partir de las propiedades y características especificadas en dichos trabajos.

- Comparativa: general

	1er Nodo (Hz)	2do Nodo (Hz)	3er Nodo (Hz)
Solución experimental (1)	5.20	12.60	25.80
Solución ANSYS 12.1	5.20	12.20	23.41

	1er Nodo (Hz)	2do Nodo (Hz)	3er Nodo (Hz)
Solución experimental (2)	14.63	95.00	256.00
Solución teórica (2)	15.79	98.97	277.12
Solución ANSYS 12.1	15.92	99.72	167.4

Tabla 6: Fiabilidad del software de trabajo: comparativa general

Se utilizará este software de cálculo debido a la fiabilidad demostrada en las comparaciones anteriores con soluciones analíticas y experimentales de otros dos trabajos especificados anteriormente.



- Comparativa: tamaño del elemento de malla

	1er Nodo (Hz)	2do Nodo (Hz)	3er Nodo (Hz)
Solución experimental (1)	5.20	12.60	25.80
L/25	5.30	12.35	23.45
L/50	5.20	12.20	23.41
L/100	5.19	11.99	23.37
L/200	5.18	11.85	23.35

	1er Nodo (Hz)	2do Nodo (Hz)	3er Nodo (Hz)
Solución experimental (2)	14.63	95.00	256.00
Solución teórica (2)	15.79	98.97	277.12
L/25	15.95	99.94	167.46
L/50	15.92	99.72	167.40
L/100	15.91	99.62	167.38
L/200	15.89	99.54	167.36

Tabla 7: Fiabilidad del software de trabajo: comparativa tamaño de malla

Se seleccionará un tamaño de elemento de aproximadamente de L/50, siendo L la longitud de la probeta, ya que siendo más eficiente computacionalmente, se aproxima a la solución experimental.

La malla utilizada para las probetas de estudio será la mostrada en la *fig.29*.

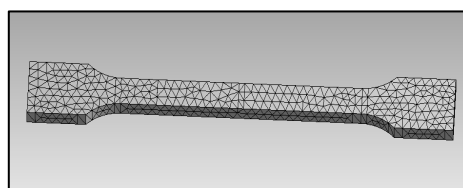


Figura 29: Tamaño de mallado de las probetas en Ansys Workbench 12.1

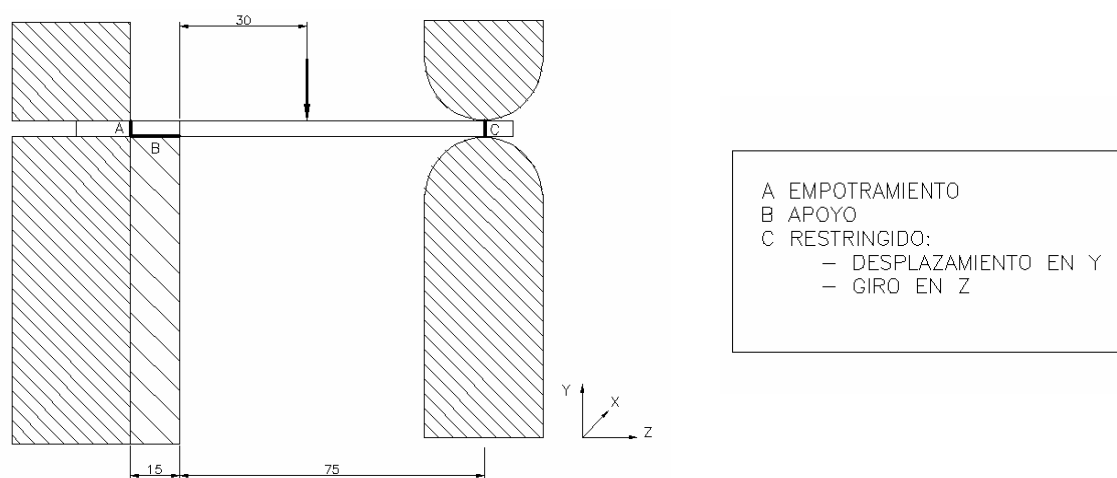


#### 4.3.2. CONDICIONES DE CONTORNO

Para el análisis dinámico será necesario además de las características del material, la geometría y la distribución de masa, las condiciones de apoyo (o de contorno) que tendrá la probeta cuando esté alojada en la máquina de leva. Estos requisitos serán los mismos para todos los materiales.

Los apoyos definidos para los análisis dinámicos se especifican en el esquema de la *fig.30* y será igual para cada una de las probetas ensayadas.

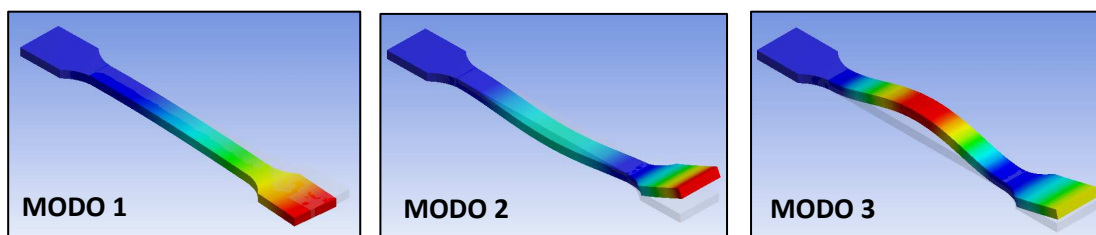
La temperatura ambiente fijada en estos análisis será de 22°C.



*Figura 30: Condiciones de apoyo para el análisis dinámico*

#### 4.4. MODOS DE VIBRACIÓN

Tras la realización de los análisis modales de cada probeta, se obtuvieron los modos de vibración. Los resultados fueron los mismos para todas las probetas, pero producidos a distintas frecuencias. A continuación se visualizan los 3 primeros modos de vibración, pero las frecuencias se detallan en los apartados siguientes de frecuencias naturales de cada uno de los materiales.



*Figura 31: Modos de vibración*



#### 4.5. POLIAMIDA 6 NATURAL

##### 4.5.1. PROPIEDADES DE LAS PROBETAS B

ENSAYO DE TRACCIÓN	PROPIEDADES FÍSICAS	AMORTIGUAMIENTO
Módulo E: 2142 Mpa Límite elástico: 48.32 MPa Tensión máx.: 58 MPa Def. máx. rotura: 45.025%	Masa: 0,0090 kg Volumen: $1,0725 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ Densidad: $839,16 \text{ kg/m}^3$	0,25 N·s/m

Tabla 8: Propiedades de la probeta de PA6 natural

##### 4.5.2. ANÁLISIS MODAL

##### FRECUENCIAS NATURALES

Estos datos son los obtenidos del análisis modal con Ansys Workbench 12.1. fijando las condiciones de apoyo especificadas en el apartado 4.3.2. *Condiciones de contorno* y con las características de material y masa citados anteriormente. En las tablas siguientes se especifican los datos de frecuencias naturales, los modos de vibración se detallan en el apartado 4.4. *Modos de vibración*.

PA6 natural	FRECUENCIA (Hz)
1er NODO	137,4
2do NODO	714,49
3er NODO	832,21

Tabla 9: Frecuencias naturales PA 6 natural

##### FACTOR DE PARTICIPACIÓN

Valores indicados en base a la unidad, se detallan los factores de participación de la dirección Y, ya que es en esta dirección en la que se realizará el esfuerzo de flexión.

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** Y DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	137.403	0.72778E-02	0.10195E-03	0.000057	0.103937E-07	0.309380E-08	0.153681E-08
2	714.493	0.13996E-02	0.38638	0.215647	0.149288	0.444371E-01	0.220736E-01
3	832.215	0.12016E-02	1.7917	1.000000	3.21024	1.00000	0.474664
sum					3.35953		0.496737



#### 4.5.3. ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Se realizó un ensayo aplicando una fuerza senoidal transversal de aproximadamente 40 Hz de frecuencia, para las probetas de Poliamida 6 natural, que tienen una longitud de 152 mm y una sección central de 40 mm<sup>2</sup>.

Sus tres primeras frecuencias naturales en las condiciones de la prueba son de 137.40, 714.49, 832.21 Hz, respectivamente.

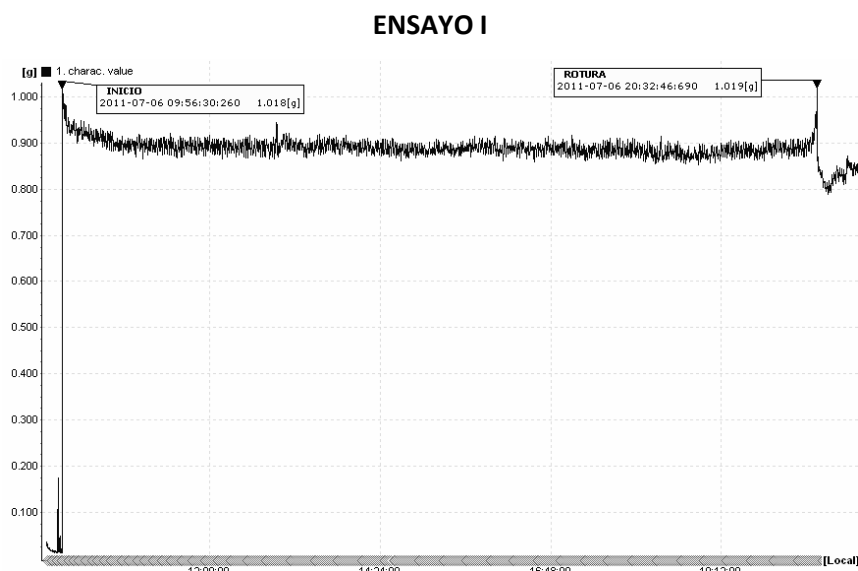
A continuación se presentan los gráficos obtenidos en el ensayo.

##### VALOR CARACTERÍSTICO RMS

La gráfica de valor característico RMS muestran un cambio brusco de la vibración aproximadamente a las 10 horas de funcionamiento.

Se produce un aumento repentino del nivel vibratorio lo que quiere decir que el material se agrieta y automáticamente el nivel disminuye fuertemente lo que explica la rotura total.

Se vislumbran también algunos pequeños picos puntuales en el desarrollo del ensayo, momentos en los que se relleno el depósito de aceite y la máquina funcionó durante unos segundos sin lubricación.



**Duración de la probeta: 10h 36m 16s – 1.527.040 ciclos**

*Gráfico 7: Valor característico RMS, PA6 natural ensayo I*





Se muestra que la poliamida 6 natural es el material que mejor soporta las condiciones del ensayo, por su alto tiempo de resistencia.

Según las gráficas RMS la ruptura del material se produce mediante el agrietamiento (inicio del cambio vibratorio), propagación de las fisuras (aumento de la severidad vibratoria) y colapso del material de una manera inmediata (disminución brusca del valor característico de vibración).

### GRÁFICAS FFT

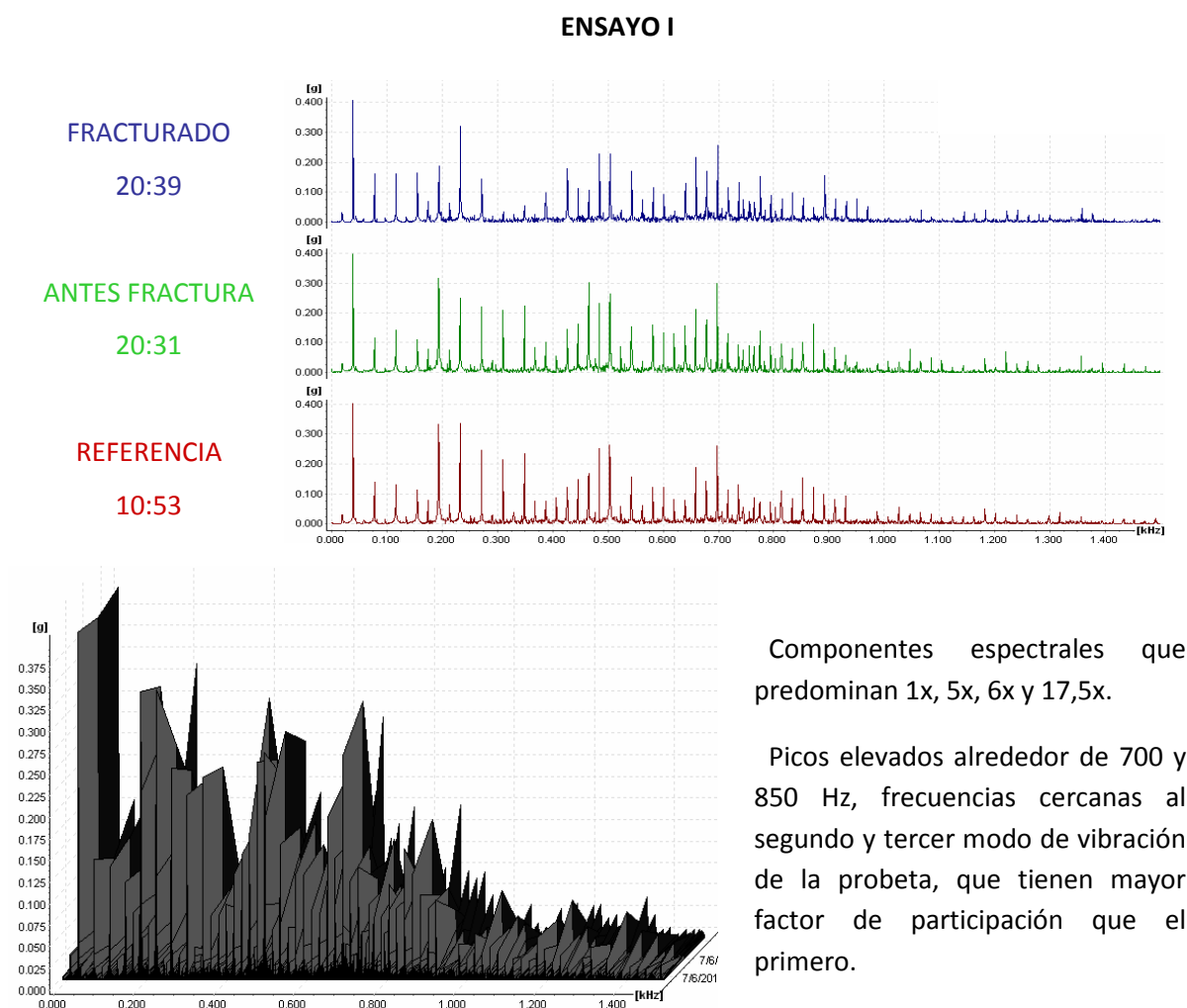
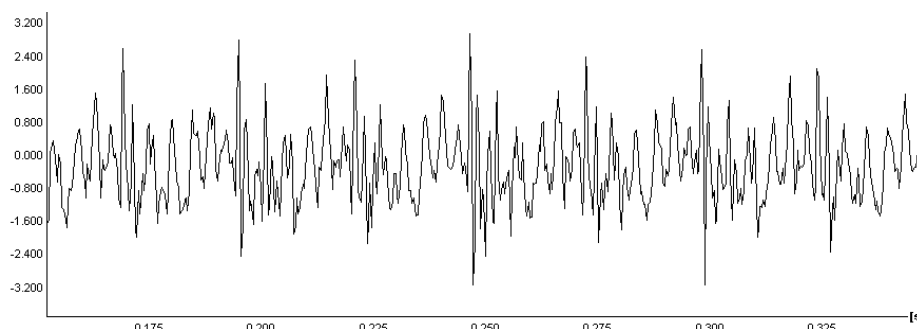


Gráfico 8: FFT, PA6 natural ensayo I

Los gráficos muestran un cambio de la vibración a las 10 horas y media de funcionamiento eliminándose muchos picos múltiples y submúltiplos de la frecuencia de excitación a 40Hz.

### SEÑAL TEMPORAL



*Gráfico 9: Señal temporal PA6 natural*

Señal temporal compleja con un golpeteo periódico que se amortigua a una frecuencia de aproximadamente 40Hz (cada  $\approx 0,025s$ ), coincidente con la frecuencia de excitación.

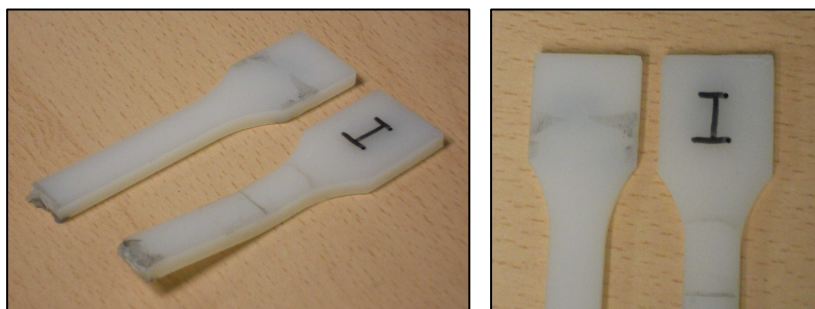
Este perfil será debido a los golpes producidos en el cuerpo de la probeta o de los ejercidos por la probeta en los componentes de la máquina de ensayos, sobretodo el apoyo articulado.

También se puede distinguir una intermitencia a 20Hz (cada 0,05 s picos más altos) de frecuencia, coincidente con la velocidad del motor, este hecho puede ser producido por el daño en algún componente dinámico del sistema, probablemente uno de los rodamientos.

### ANÁLISIS CUALITATIVO DE LA FRACTURA

El punto de rotura coincide prácticamente con el centro de la longitud de la probeta, tendiendo a acortar, prácticamente inapreciable, el extremo empotrado.

El apoyo sujetado firmemente ha sufrido un pequeño aumento de su longitud deformándose plásticamente.

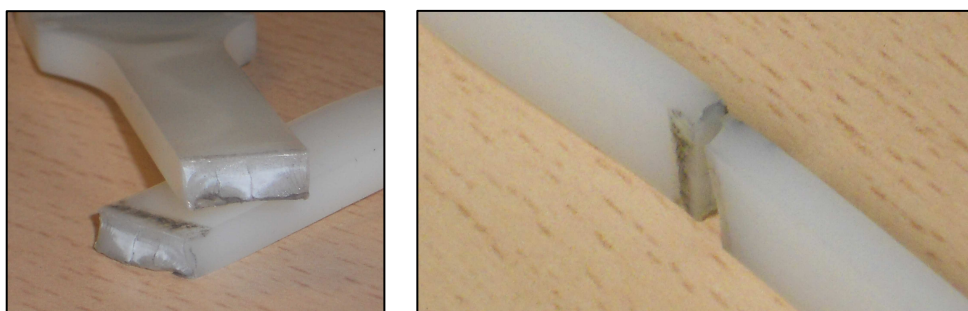


*Figura 32: PA6 natural a) Punto de rotura b) Deformación plástica de apoyos*



La falla se divide en dos superficies horizontales; una más lisa uniforme de pequeño espesor, inicio de la grieta; y otra irregular con aspecto fibroso y picos de fractura frágil.

Se produce una pequeña estricción de la zona, pero no existe deformación plástica apreciable, por lo que suponemos que la falla se ha producido por fatiga mecánica.



*Figura 33: Sección de falla, PA6 natural*

Se resumen los factores importantes de los ensayos realizados a una frecuencia aproximada de 40Hz, para la probeta de Poliamida 6 natural (probeta B), en la siguiente tabla:

ENSAYO	TIEMPO	Nº CICLOS	OBSERVACIONES
I	10h 36m 16s	1.527.040	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tipo de falla: FATIGA MECÁNICA</li> <li>▪ Componentes espectrales predominantes: 1x, 5x, 6x</li> <li>▪ Impactos a una frecuencia de 40 y 20Hz</li> </ul>

*Tabla 10: Datos de ensayo, PA 6 natural*



#### 4.6. POLIAMIDA 6 CON 3% DE NANOTUBOS HALLOYSITA

##### 4.6.1. PROPIEDADES DE LA PROBETA C

ENSAYO DE TRACCIÓN	PROPIEDADES FÍSICAS	AMORTIGUAMIENTO
Módulo E: 2543 MPa Límite elástico: 49.80 MPa Tensión máx.: 63.24 MPa Def. máx. rotura: 43.75%	Masa: 0,0090 kg Volumen: $1,0725 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ Densidad: 839,16 kg/m <sup>3</sup>	0,25 N·s/m

Tabla 11: Propiedades de la probeta de PA6 3% NHT

##### 4.6.2. ANÁLISIS MODAL

###### FRECUENCIAS NATURALES

Estos datos son los obtenidos del análisis modal con Ansys Workbench 12.1. fijando las condiciones de apoyo especificadas en el apartado 4.3.2. *Condiciones de contorno* y con las características de material y masa citados anteriormente En las tablas siguientes se especifican los datos de frecuencias naturales, los modos de vibración se detallan en el apartado 4.4. *Modos de vibración*.

PA6 3% NTH	FRECUENCIA (Hz)
1er NODO	149,92
2do NODO	779,7
3er NODO	907,94

Tabla 12: Frecuencias naturales PA6 3% NTH

###### FACTOR DE PARTICIPACIÓN

Valores indicados en base a la unidad, se detallan los factores de participación de la dirección Y, ya que es en esta dirección en la que se realizará el esfuerzo de flexión.

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** Y DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	149.919	0.66703E-02	-0.19748E-04	0.000011	0.389981E-09	0.116138E-09	0.576623E-10
2	779.700	0.12825E-02	0.38853	0.216961	0.150959	0.449560E-01	0.223206E-01
3	907.944	0.11014E-02	1.7908	1.000000	3.20697	1.00000	0.474179
sum					3.35793		0.496500



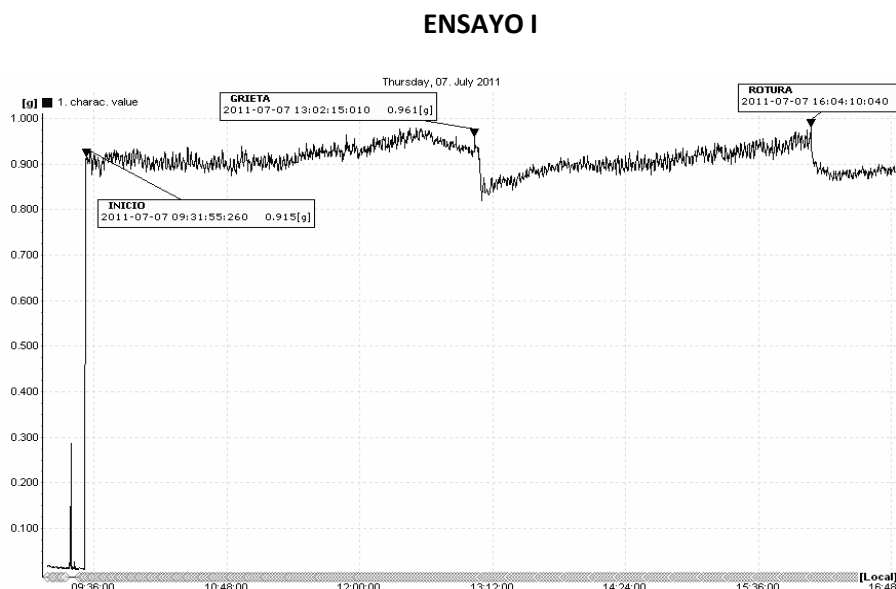
#### 4.6.3. ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Se realizaron dos ensayos aplicando una fuerza senoidal transversal de aproximadamente 40 Hz de frecuencia, para las probetas entalladas de Poliamida 6 con 3% de nanotubos de halloysita, que tienen una longitud de 152 mm y una sección central de 40 mm<sup>2</sup>.

Sus tres primeras frecuencias naturales en las condiciones de la prueba son de 149.92, 779.7, 907.94 Hz, respectivamente.

A continuación se presentan los gráficos obtenidos para cada ensayo.

#### VALOR CARACTERÍSTICO RMS

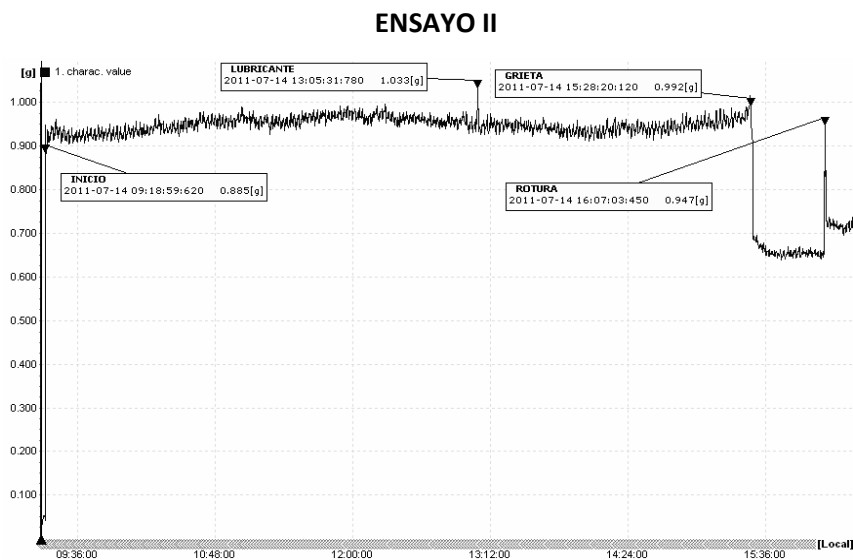


**Duración de la probeta: 6h 32m 15s - 941.400 ciclos**

*Gráfico 10: Valor característico RMS, PA6 3% NTH ensayo I*

Las gráficas de valor característico referentes al material de poliamida 6 con 3% de nanotubos de halloysita presentan dos puntos de cambio brusco en la vibración, esto puede ser debido a que el material cambie su comportamiento al esfuerzo en un punto medio del ensayo.

La interpretación más coherente a este hecho es que se produzca un primer daño en el material, grieta o deformación (concepto que se valorará en el apartado siguiente de *análisis cualitativo de la fractura*, y después, tras un intervalo de tiempo la rotura completa.



**Duración de la probeta: 6h 48m 4s - 979.360 ciclos**

*Gráfico 11: Valor característico RMS, PA6 3%NTH ensayo II*

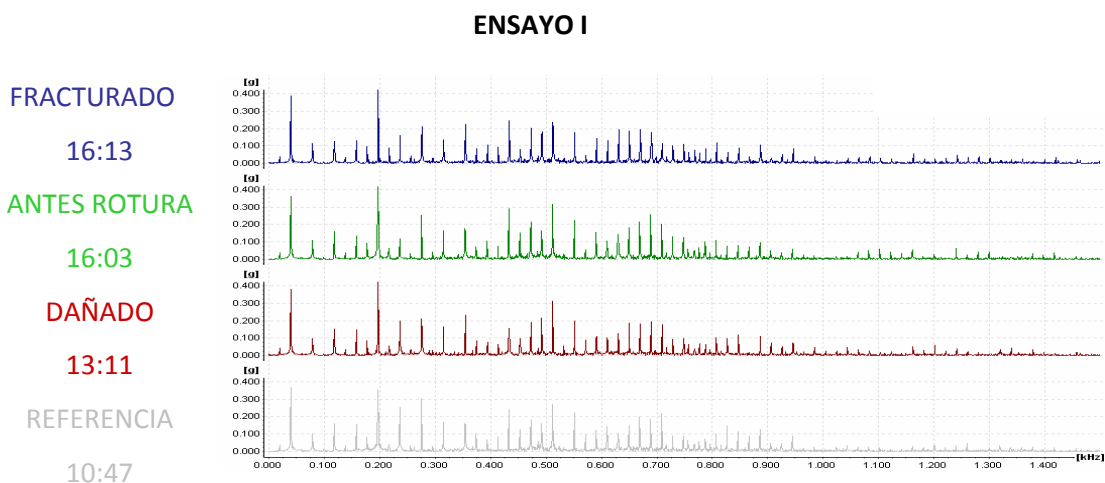
En el ensayo I se refleja que el primer daño se produce sobre las 3 horas y media de trabajo y que el material aguanta el esfuerzo dañado alrededor de unas 3 horas más.

Sin embargo, en el ensayo II el primer daño se produce más tarde ( $\approx 6h$ ) y el material aguanta menos tiempo el esfuerzo hasta la rotura (alrededor de media hora).

En los dos casos el tiempo de rotura está entre las 6 y 7 horas y muestran dos cambios importantes de las mismas características a lo largo del ensayo.

Tanto en el ensayo uno como en el dos, existe una primera disminución fuerte de la vibración y posteriormente un aumento hasta la rotura.

### GRÁFICOS FFT





Los picos más elevados pertenecen a las componentes espectrales 1x, 5x y 17x.

Aumento de la vibración cerca de la segunda frecuencia natural de la probeta.

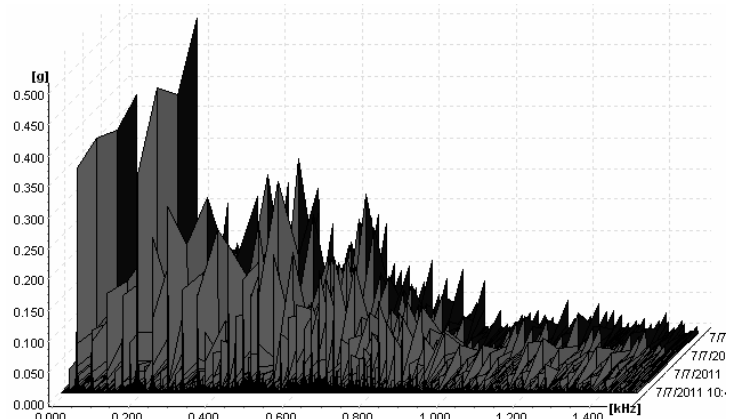


Gráfico 12: FFT, PA6 3%NTH ensayo I

## ENSAYO II

FRACTURADO

16:08

DAÑADO

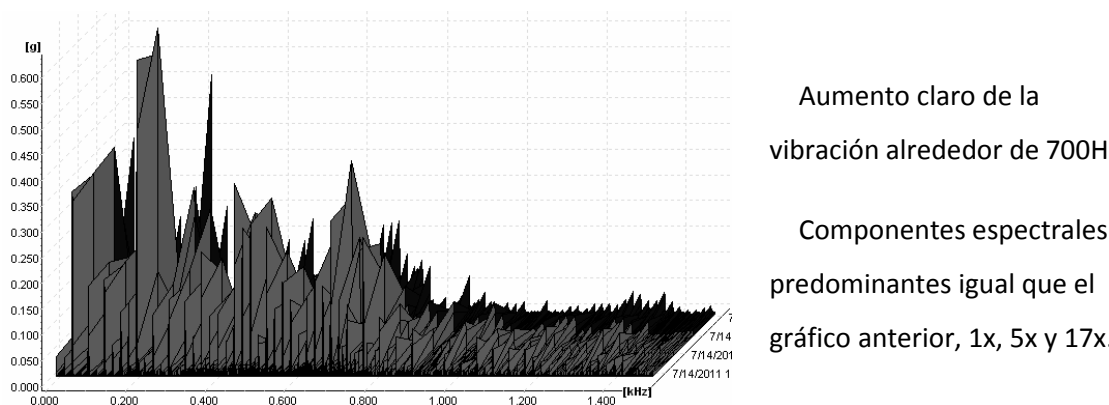
15:38

ANTES DAÑO

15:27

REFERENCIA

10:48

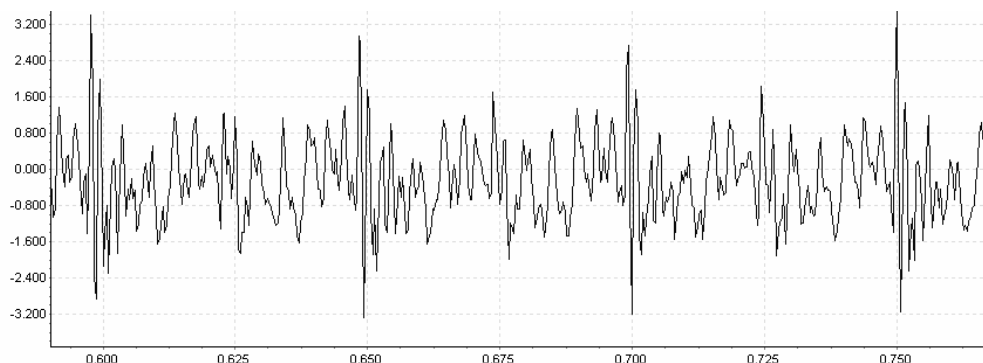


Aumento claro de la vibración alrededor de 700Hz.

Componentes espectrales predominantes igual que el gráfico anterior, 1x, 5x y 17x.

Gráfico 13: FFT, PA6 3%NTH ensayo II

### SEÑAL TEMPORAL



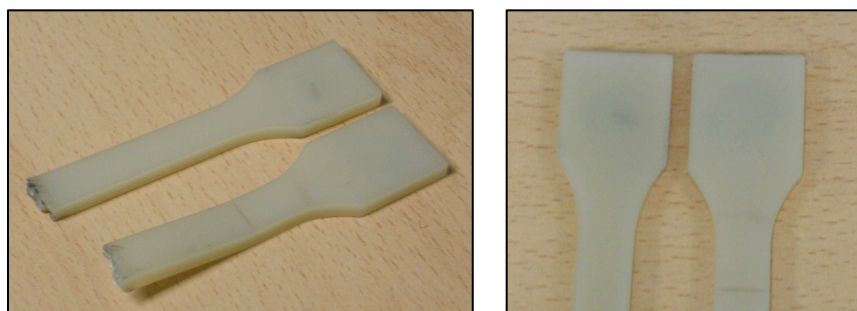
*Gráfico 14: Señal temporal, PA6 3%NTH*

La señal temporal es una función periódica compleja en la que se puede apreciar una pulsación de aproximadamente 20Hz que se amortigua, solapada con una a 40 Hz, cómo se ha explicado en el material anterior, uno de los rodamientos pudiera estar dañado y se produce este golpeteo intermitente a la frecuencia de giro del motor, mientras que la percusión a 40Hz se debe a los esfuerzos repetidos en la probeta.

### ANÁLISIS CUALITATIVO DE LA FRACTURA

El punto de fractura se produce en la parte central de la longitud de la probeta un poco más cercano al extremo empotrado; en esta probeta es más apreciable que en el resto.

Existe también una deformación plástica del apoyo empotrado, aumentando su longitud.



*Figura 34: PA6 3%NTH, a) Punto de fractura, b) Deformación plástica de apoyos*

En el caso de la poliamida 6 con porcentaje del 3% de nanotubos de halloysita la fractura es muy irregular, con 2 grandes desniveles y aspecto fibroso. Existe una pequeña estricción de la zona, no muy apreciable.





Se distingue en la sección rota que hay dos partes verticales diferenciadas, dos grietas distintas, esto explicaría los dos cambios bruscos del valor característico RMS.

La probeta ha fallado por fatiga mecánica.

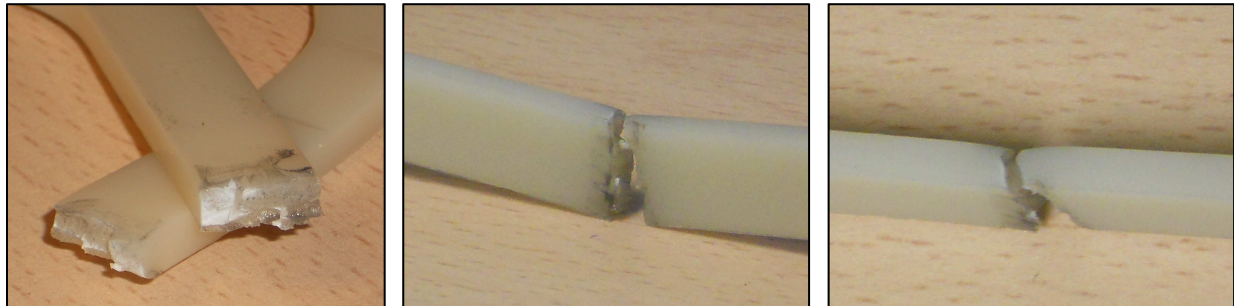


Figura 35: Fractura PA6 3%NTH

Se resumen los factores importantes de los ensayos realizados para la probeta de Poliamida 6 con 3% de NTH, a una frecuencia de aproximadamente 40Hz, en la siguiente tabla:

ENSAYO	TIEMPO	Nº CICLOS	OBSERVACIONES
I	6h 32m 15s	941.400	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tipo de falla: FATIGA MECÁNICA</li> <li>▪ Rotura en dos veces</li> <li>▪ Componentes predominantes: 1x, 5x, 17x</li> <li>▪ Impactos a 20 y 40Hz</li> </ul>
II	6h 48m 4s	979.360	
TOTAL	48.019 s	1.920.760	
MEDIA	24.009 s	960.380	

Tabla 13: Datos de ensayo, PA 6 3%NTH



#### 4.7. POLIAMIDA 6 CON 6% DE NANOTUBOS DE HALLOYSITA

##### 4.7.1. PROPIEDADES DE LA PROBETA D

ENSAYO DE TRACCIÓN	PROPIEDADES FÍSICAS	AMORTIGUAMIENTO
Módulo E: 3086 MPa Límite elástico: 45.54 MPa Tensión máx.: 69.15 MPa Def. máx. rotura: 45.055%	Masa: 0,0090 kg Volumen: 1,0725·10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> Densidad: 839,16 kg/m <sup>3</sup>	0,26 N·s/m

Tabla 14: Propiedades de la probeta de PA6 6% NHT

##### 4.7.2. ANÁLISIS MODAL

###### FRECUENCIAS NATURALES

Estos datos son los obtenidos del análisis modal con Ansys Workbench 12.1. fijando las condiciones de apoyo especificadas en el apartado 4.3.2. *Condiciones de contorno* y con las características de material y masa citados anteriormente En las tablas siguientes se especifican los datos de frecuencias naturales, los modos de vibración se detallan en el apartado 4.4. *Modos de vibración*.

PA6 6% NTH	FRECUENCIA (Hz)
1er NODO	164,92
2do NODO	857,6
3er NODO	998,9

Tabla 15: Frecuencias naturales PA6 6% NTH

###### FACTOR DE PARTICIPACIÓN

Valores indicados en base a la unidad, se detallan los factores de participación de la dirección Y, ya que es en esta dirección en la que se realizará el esfuerzo de flexión.

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** Y DIRECTION						
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION
1	164.925	0.60634E-02	0.10195E-03	0.000057	0.103937E-07	0.309380E-08
2	857.602	0.11660E-02	0.38638	0.215647	0.149288	0.444371E-01
3	998.904	0.10011E-02	1.7917	1.000000	3.21024	1.00000
sum					3.35953	0.496737



#### 4.7.3. ANÁLISIS DE VIBRACIONES

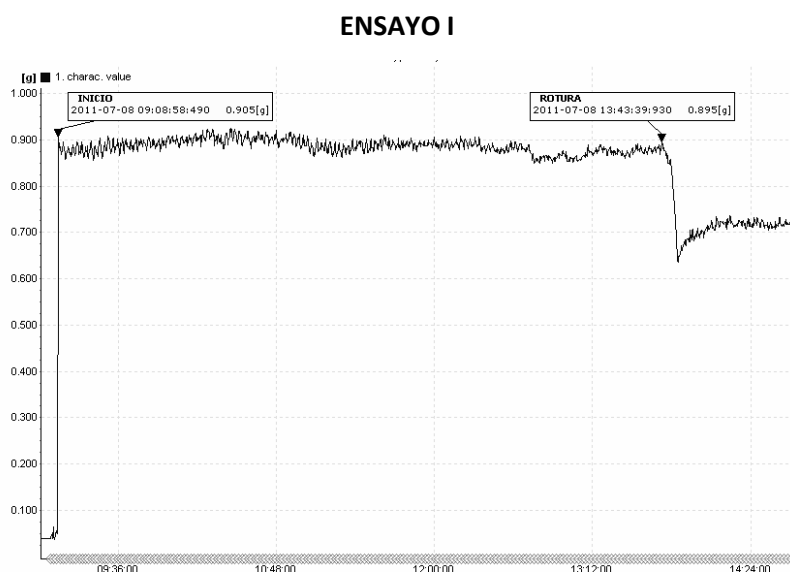
Se realizaron 3 ensayos aplicando una fuerza senoidal transversal de aproximadamente 40 Hz de frecuencia, para las probetas entalladas de Poliamida 6 con 6% de nanotubos de halloysita, que tienen una longitud de 152 mm y una sección central de 40 mm<sup>2</sup>.

Sus tres primeras frecuencias naturales en las condiciones de la prueba de ensayo son de 164.92, 857.6, 998.9 Hz, respectivamente.

A continuación se presentan los gráficos obtenidos para cada ensayo.

##### VALOR CARACTERÍSTICO RMS

El valor característico RMS muestra que la probeta de poliamida 6 con 6% de nanotubos de halloysita aguanta alrededor de 5 horas soportando el esfuerzo hasta la rotura.



**Duración de la probeta: 4h 34m 41s, 659.240**

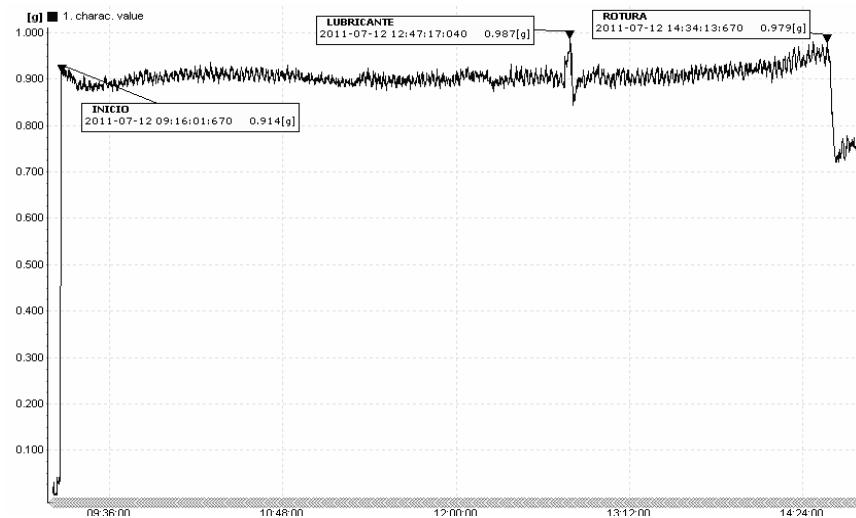
*Gráfico 15: Valor característico RMS, PA6 6% NTH ensayo I*

Aparece en el material una grieta, y esta se propaga instantáneamente, por eso no existe prácticamente aumento de la vibración antes de la caída repentina.

Puede existir algún pico en el valor característico debido a la necesidad de parar el sistema de lubricación para rellenar el depósito del aceite lubricante.



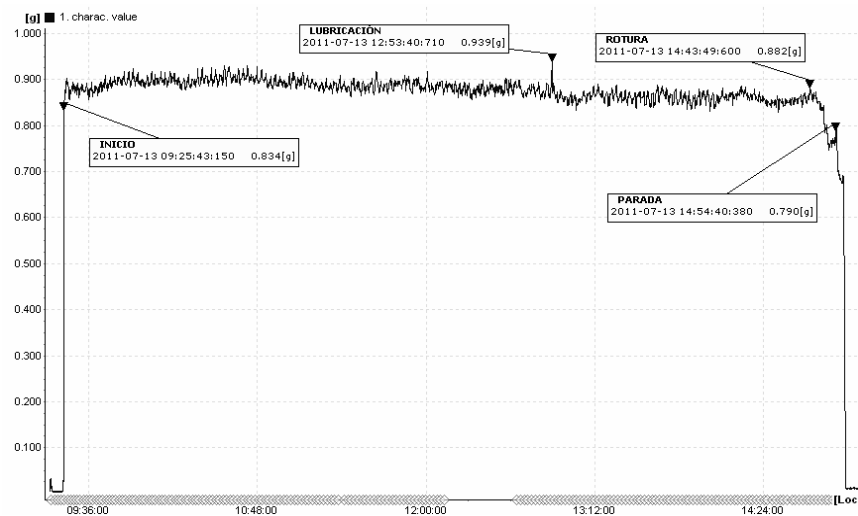
## ENSAYO II



**Duración de la probeta: 5h 18m 12s, 763.680 ciclos**

*Gráfico 16: Valor característico RMS, PA6 6% NTH ensayo II*

## ENSAYO III



**Duración de la probeta: 5h 18m 6s, 763.440 ciclos**

*Gráfico 17: Valor característico RMS, PA6 6% NTH ensayo III*

## GRÁFICOS FFT

A continuación se muestra la variación en el ensayo de los espectros de frecuencia, a partir de tres gráficas, referencia, anterior a la fractura y fracturado, demostrando el aumento y disminución de la vibración en las frecuencias cercanas a las naturales en la probeta.



## ENSAYO I

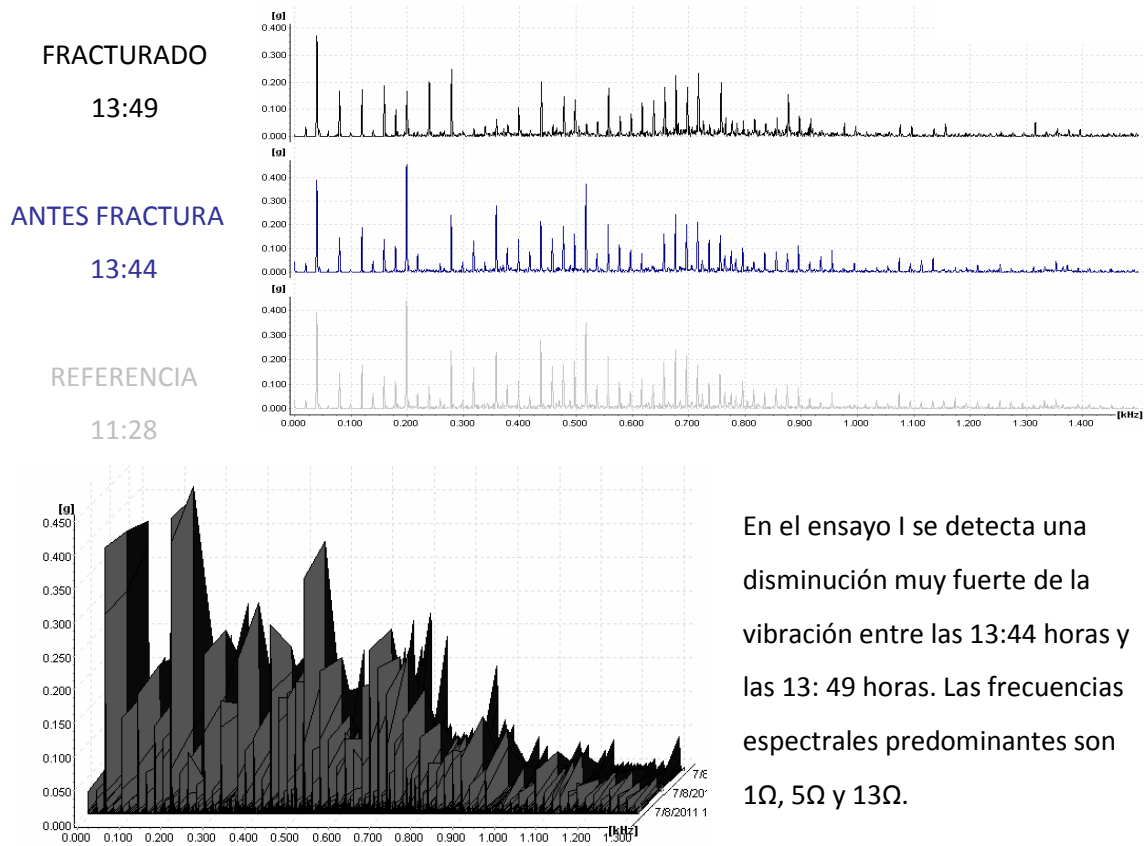
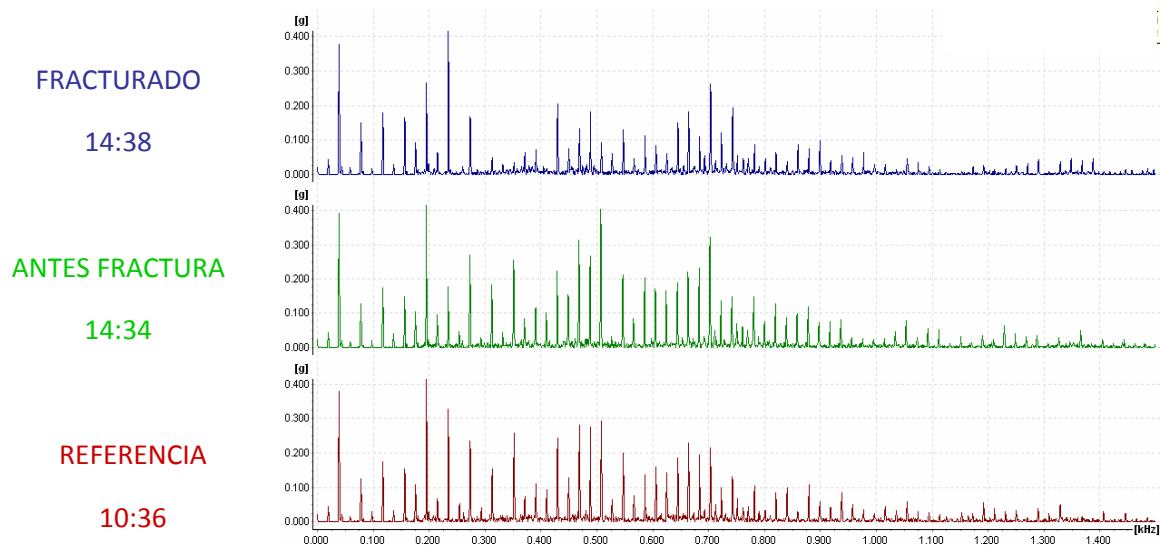


Gráfico 18: FFT, PA6 6% NTH ensayo I

## ENSAYO II





Aumento hasta la rotura y posterior descenso de la frecuencia a múltiplos y submúltiplos de la frecuencia de excitación, sobretodo alrededor de 200Hz, cerca del primer modo de vibración de la probeta.

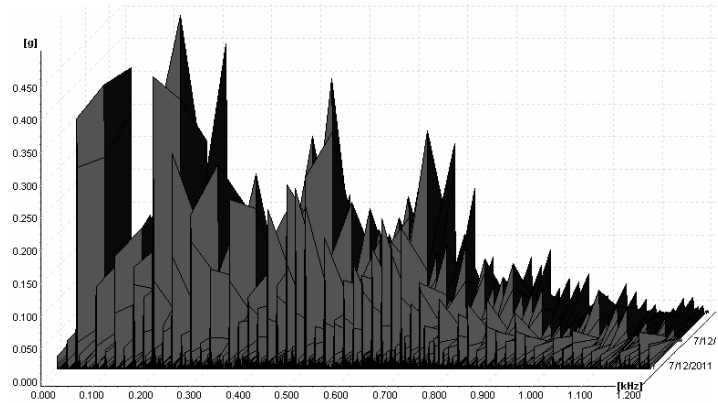


Gráfico 19: FFT, PA6 6% NTH ensayo II

### ENSAYO III

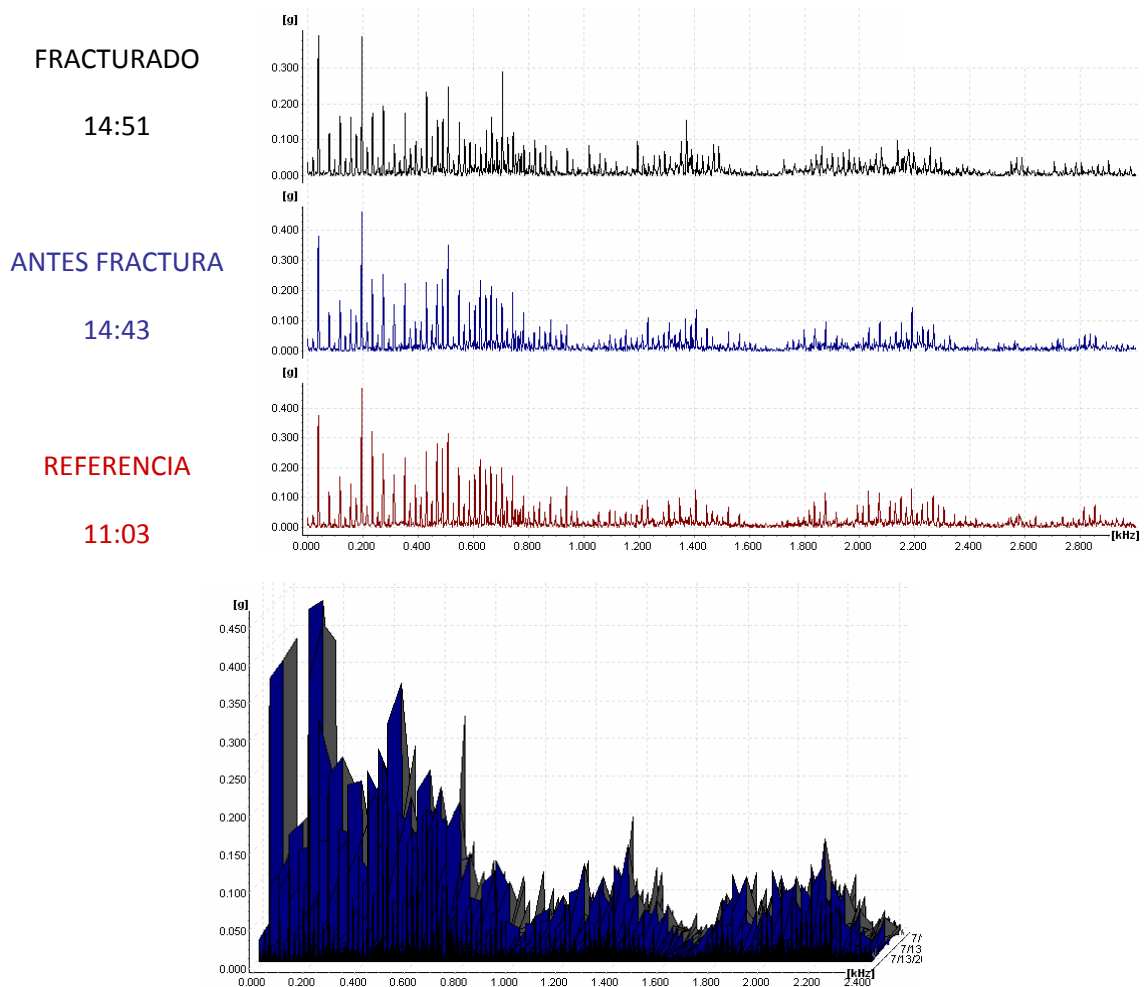


Gráfico 20: FFT, PA6 6% NTH ensayo III



## SEÑAL TEMPORAL

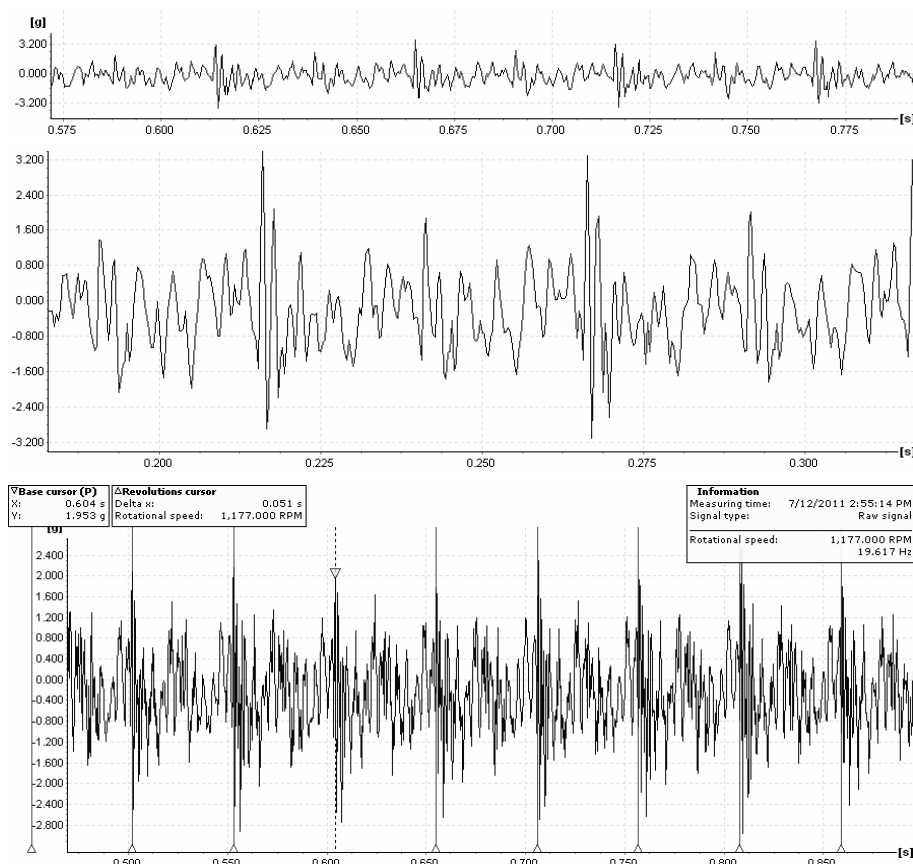


Gráfico 21: Señal temporal, PA6 6%NTH

La señal vibratoria en función del tiempo describe un onda periódica compleja, combinación de muchas vibraciones.

Se aprecia claramente en la señal que hay dos pulsaciones, aparentemente debida a choques que posteriormente se amortiguan, a unas frecuencias de alrededor de 20 y 40Hz, coincidente con la velocidad del motor y la deformación de la probeta, respectivamente.

## ANÁLISIS CUALITATIVO DE LA FRACTURA

El punto de rotura está situado prácticamente en el centro de la longitud de la probeta.

Durante el ensayo de poliamida 6 con 6% de nanotubos de halloysita se ha producido una deformación plástica del extremo empotrado, aumentando notablemente sus dimensiones de longitud.

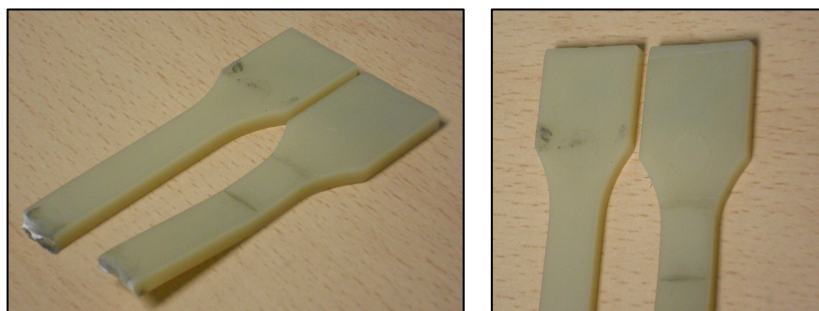


Figura 36: PA6 6%NTH, a) Punto de falla, b) Deformación plástica de apoyos

No se aprecia deformación plástica en la fractura, por lo que la probeta ha sufrido una falla por fatiga mecánica. La falla tiene una pequeña estricción y su superficie es irregular con algunos picos fibrosos.

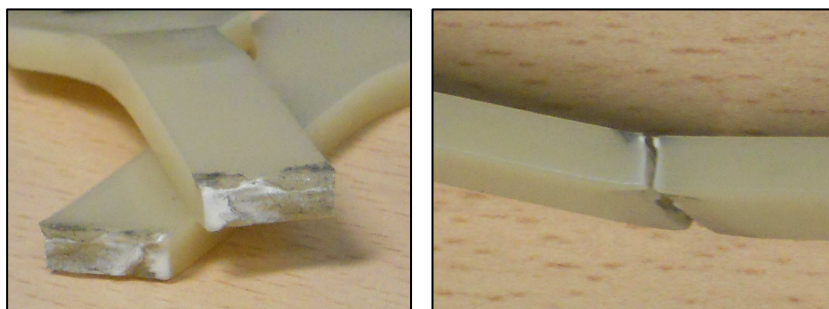


Figura 37: Sección de fractura de PA6 6% NTH

Se resumen los factores importantes de los ensayos realizados para la probeta de Poliamida 6 con 6% de NTH (probeta D) a una frecuencia aproximada de 40 Hz, en la siguiente tabla:

ENSAYO	TIEMPO	Nº CICLOS	OBSERVACIONES
I	4h 34m 41s	659.240	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tipo de falla: FATIGA MECÁNICA</li> <li>▪ Frecuencias predominantes: 1x 5x 13x</li> <li>▪ Impactos a 20 y 40 Hz</li> </ul>
II	5h 18m 12s	763.680	
III	5h 18m 6s	763.440	
TOTAL	54.659 s	2.186.360	
MEDIA	18220 s	728.787	

Tabla 16: Datos de ensayo, PA6 6% NTH





#### 4.8. PLEXIMER

##### 4.8.1. PROPIEDADES DE LA PROBETA E

ENSAYO DE TRACCIÓN	PROPIEDADES FÍSICAS	AMORTIGUAMIENTO
Módulo de Young: 3048 MPa Límite elástico: 36,60 MPa Tensión máxima: 61,39 MPa Def. máx. rotura: 16,48%	Masa: 0,0105 kg Volumen: $1,0725 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ Densidad: $979,02 \text{ kg/m}^3$	0,32 N·s/m

Tabla 17: Propiedades de la probeta de Pleximer

##### 4.8.2. ANÁLISIS MODAL

###### FRECUENCIAS NATURALES

Estos datos son los obtenidos del análisis modal con Ansys Workbench 12.1. fijando las condiciones de apoyo especificadas en el apartado 4.3.2. *Condiciones de contorno* y con las características de material y masa especificados anteriormente en este mismo apartado, referidos al material pleximer. Los modos de vibración se visualizan en el apartado 4.4. *Modos de vibración*.

PLEXIMER	FRECUENCIA (Hz)
1er MODO	151,75
2do MODO	789,08
3er MODO	919,09

Tabla 18: Frecuencias naturales Pleximer

###### FACTORES DE PARTICIPACIÓN

Valores indicados en base a la unidad, se detallan los factores de participación de la dirección Y, ya que es en esta dirección en la que se realizará el esfuerzo de flexión.

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** Y DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	151.748	0.65899E-02	0.11012E-06	0.000057	0.121260E-13	0.309380E-08	0.153681E-08
2	789.082	0.12673E-02	0.41734E-03	0.215647	0.174169E-06	0.444371E-01	0.220736E-01
3	919.094	0.10880E-02	0.19353E-02	1.000000	0.374528E-05	1.00000	0.474664
sum					0.391945E-05		0.496737



#### 4.8.3. ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Se realizaron tres ensayos aplicando una fuerza senoidal transversal de aproximadamente 40 Hz de frecuencia, para las probetas de Pleximer, que tienen una longitud de 152 mm y una sección central de 40 mm<sup>2</sup>.

Sus tres primeras frecuencias naturales en las condiciones de la prueba son de 151.75, 789.08, 919.09 Hz, respectivamente.

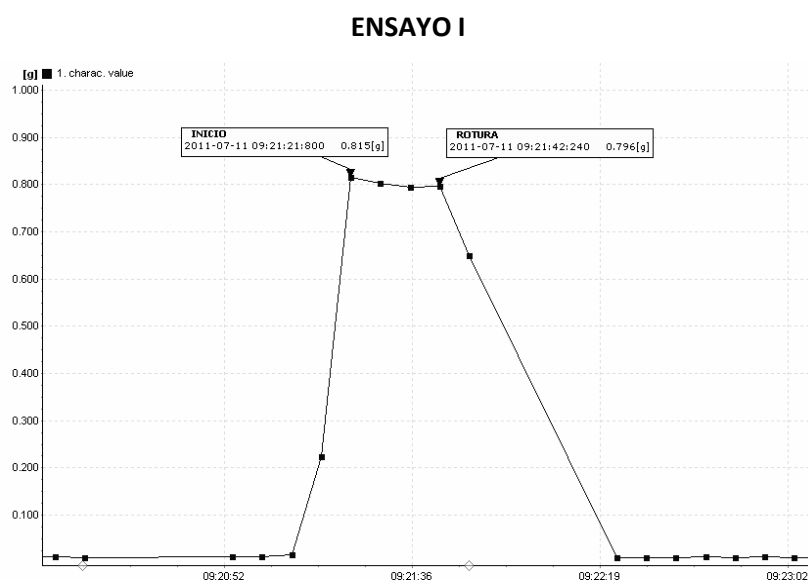
A continuación se presentan los gráficos obtenidos para cada ensayo.

##### VALOR CARACTERÍSTICO RMS

Un cambio muy brusco en la gráfica mostrará un hecho importante en el desarrollo del ensayo. En el caso del Pleximer, la rotura del material es muy repentina, y en la gráfica RMS se reflejará un pico pronunciado que muestra el inicio y prácticamente seguida la rotura.

Esta gráfica informará del tiempo de ensayo, y por tanto, multiplicando su valor por la frecuencia de ensayo, del número de ciclos soportados.

Cómo los ciclos soportados por cada probeta son más de uno asimilamos que el esfuerzo es de fatiga. Este material será el menos resistente a este esfuerzo según las condiciones de ensayo.

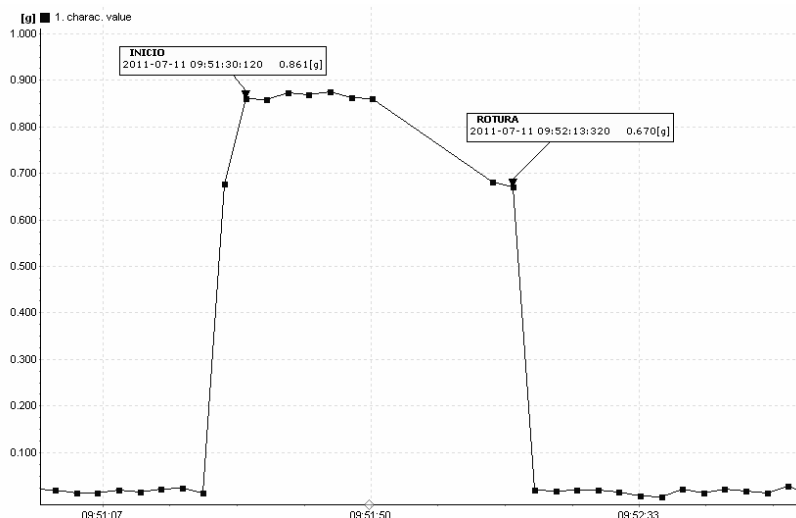


**Duración de la probeta: 21 s – 840 ciclos**

*Gráfico 22: Valor característico RMS, Pleximer ensayo I*



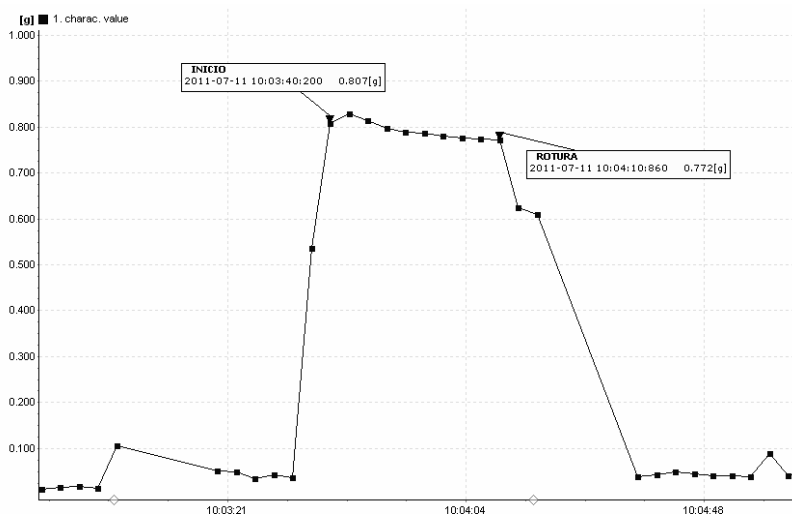
## ENSAYO II



**Duración de la probeta: 43 s – 1720 ciclos**

Gráfico 23: Valor característico RMS, Pleximer ensayo II

## ENSAYO III



**Duración de la probeta: 30 s – 1200 ciclos**

Gráfico 24: Valor característico RMS, Pleximer ensayo III

## GRÁFICAS FFT

Se mostrarán los espectros de frecuencia para cada uno de los ensayos; En este material en concreto no será posible presentar tres medidas (referencia, antes rotura y después de rotura), ya que el material colapsa en un tiempo menor al minuto; que es el tiempo mínimo en el que el equipo de medida Dtect X1 es capaz de registrar una gráfica FFT.



## ENSAYO I

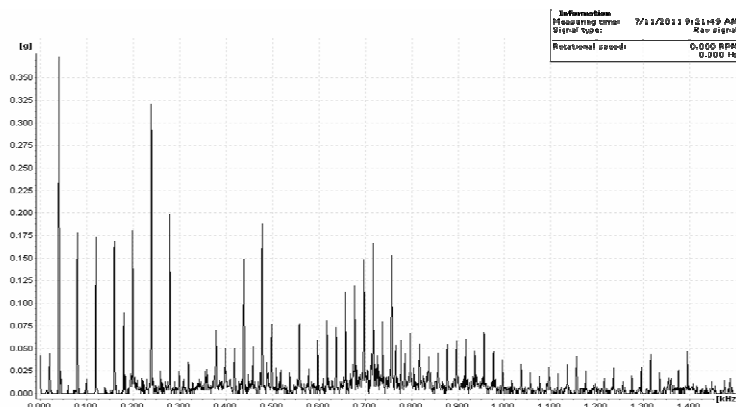


Gráfico 25: FFT, Pleximer ensayo I

## ENSAYO II

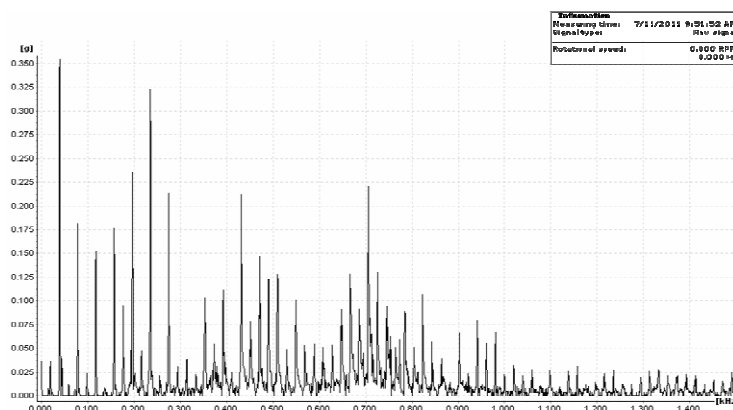


Gráfico 26: FFT, Pleximer ensayo II

## ENSAYO III

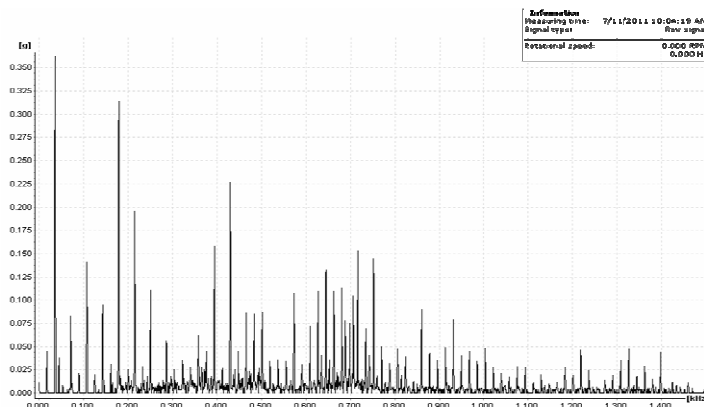


Gráfico 27: FFT, Pleximer ensayo III

Se presenta un comportamiento no lineal de la viga. La respuesta vibratoria estacionaria de la viga a una excitación armónica de frecuencia  $\Omega \approx 40\text{Hz}$ , tiene componentes de frecuencias múltiplos y submúltiplos de la frecuencia de excitación  $\Omega$ .

Las componentes espectrales predominantes aparte de la fundamental (40Hz) es a 6x y 13x, se muestran componentes alrededor de 200,800 y 900 Hz porque están cercanas a las frecuencias naturales de vibración de la probeta.

Los tres ensayos comparten un perfil muy parecido del espectro de frecuencias, con pequeñas variaciones debido a que las medidas no están realizadas en el mismo estado de la probeta



### SEÑAL TEMPORAL

Los gráficos de señal temporal muestran una señal vibratoria compleja, suma de señales armónicas y aleatorias. Se puede apreciar que existen golpeteos periódicos amortiguados.

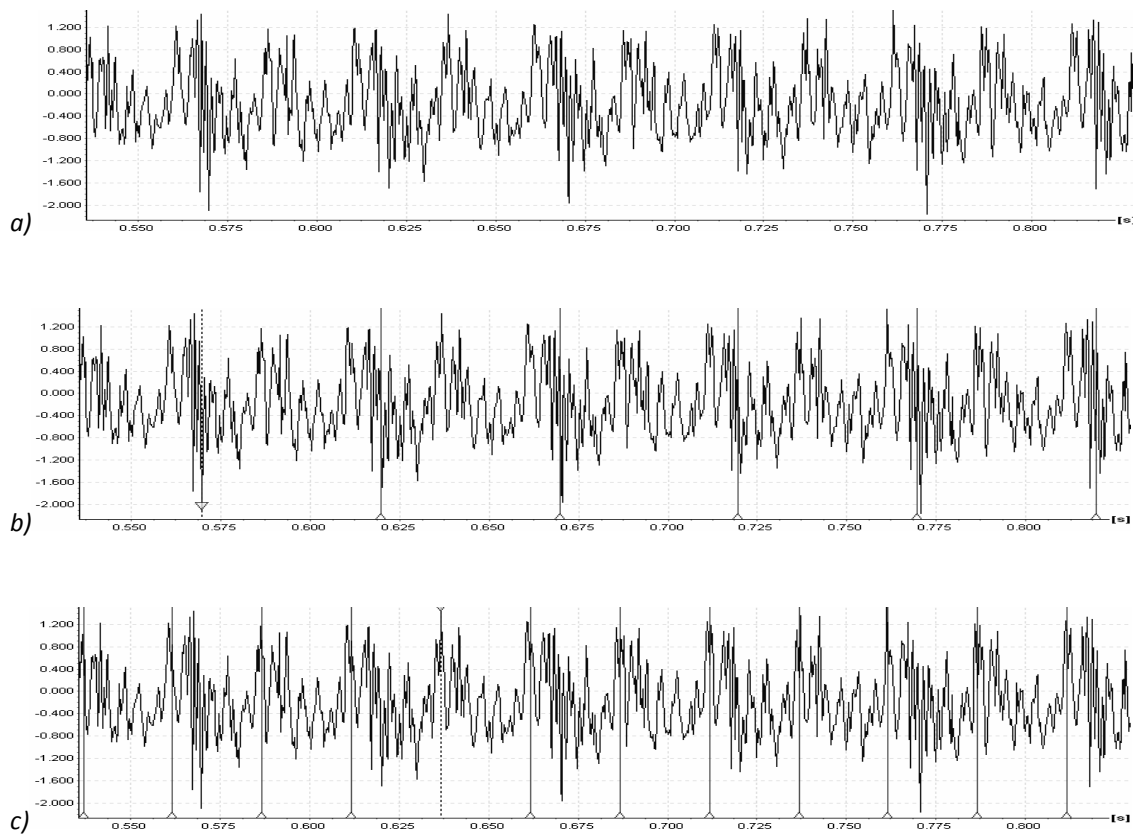


Gráfico 28: Pleximer, a) Señal temporal, b) Impactos a 20Hz, c) Impactos a 40Hz.

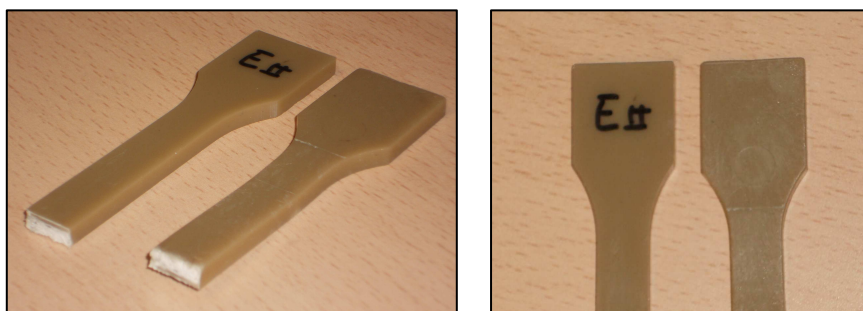
Se pueden diferenciar al menos dos impactos; uno a 20Hz coincidente con la velocidad de rotación del motor y otro a 40Hz definido por el esfuerzo producido en la probeta.

Las pulsaciones a una frecuencia de 20Hz pueden ser producidas por un fallo en uno de los dos rodamientos del eje, para su comprobación serían necesarias las frecuencias de fallo de cada uno de los rodamientos. Este daño se tendrá en cuenta en futuros ensayos, pero no se estudia en este documento puesto que no es objetivo del proyecto.

Los impactos producidos con una frecuencia de 40Hz claramente serán producto de los impactos ocasionados en la probeta de ensayo.

### ANÁLISIS CUALITATIVO DE LA FRACTURA

La rotura del material se produce en un punto muy cercano al centro de la probeta, dejando la parte empotrada un poco más corta pero prácticamente inapreciable. No existe deformación plástica aparente en los extremos apoyados.

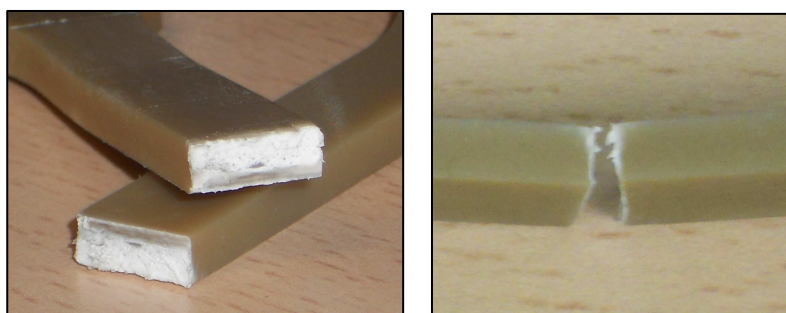


*Figura 38: Pleximer, a) Punto de rotura, b) Deformación plástica de apoyos*

La fractura se presenta limpia sin demasiada deformación plástica ni aparentemente estricción. La probeta ha colapsado por fatiga mecánica.

La sección de rotura presenta dos partes que dividen la falla horizontalmente; una de ellas lisa y la otra con aspecto más irregular, la primera es mucho más estrecha que la segunda.

La fractura se puede definir frágil, debido a la inexistencia aparente de deformación plástica.



*Figura 39: Sección de fractura Pleximer*

Se resumen los factores importantes de los ensayos realizados para la probeta entallada de Pleximer (probeta E), a aproximadamente 40Hz de frecuencia, en la siguiente tabla:



ENSAYO	TIEMPO	Nº CICLOS	OBSERVACIONES
I	21 s	840	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tipo de falla: FATIGA MECÁNICA</li> <li>▪ Fractura frágil</li> <li>▪ Impactos periódicos: 20 y 40Hz</li> <li>▪ Componentes espectrales predominantes: 1x, 6x y 13x</li> <li>▪ Baja resistencia</li> </ul>
II	43 s	1720	
III	30 s	1200	
TOTAL	94 s	3760	
MEDIA	31 s	1253	

*Tabla 19: Datos de ensayo, Pleximer*



## 5. ANÁLISIS DE TIEMPO Y COSTE DE ENSAYOS CONVENCIONALES

### 5.1. ANÁLISIS DE TIEMPO EN ENSAYOS CONVENCIONALES DE FATIGA

Cómo se ha citado anteriormente uno de los mayores inconvenientes de los ensayos convencionales de fatiga, es su larga duración, debido al trabajo a bajas frecuencias. A continuación se muestra una tabla comparativa que refleja la importancia de la frecuencia de trabajo para la duración del ensayo.

La comparativa se ha realizado para un material que tenga como vida de fatiga  $10^6$  ciclos o esfuerzos cíclicos, que en muchos casos podría ser mayor.

MATERIAL CON NECESIDAD DE $10^6$ CICLOS PARA SU FRACTURA		
Nº DE PROBETAS	FRECUENCIA (Hz)	DURACIÓN
1	1	12 días
	40	7 horas
	100	3 horas
5	1	60 días
	40	2 días
	100	15 horas

Tabla 20: Tiempo de ensayo según la frecuencia de trabajo

### 5.2. ANÁLISIS DE COSTES EN ENSAYOS CONVENCIONALES

En análisis convencionales de fatiga, la velocidad de ensayo y la resistencia del propio material ensayado determinarán el costo de la prueba.

Los ensayos convencionales sólo son capaces de introducir el desplazamiento de flexión del ensayo del proyecto (10 mm) a frecuencias muy bajas, de alrededor de 2 Hz, por lo que para un material que rompa en  $10^6$  ciclos el coste será el siguiente:

Nº PROBETAS	FRECUENCIA	TIEMPO	TIEMPO CONTABILIZADO	PRECIO
1	2 Hz	5 días Y 19 horas	59 horas	<b>1180 €</b>

Tabla 21: Coste de un ensayo convencional (2Hz) para  $10^6$  ciclos





El precio unitario del ensayo, que se ha asimilado para el cálculo del coste es de 20 €/hora, contabilizando 8 horas por día completo.

Estos datos han sido extraídos de un presupuesto de ensayo de fatiga a flexión para probetas poliméricas realizado en el centro politécnico superior en mayo de 2008.

En el caso de que el ensayo hubiese sido realizado a todas las probetas descritas en el proyecto, con una frecuencia de 2 Hz, el coste hubiese resultado de un total de seis mil cuatrocientos euros, IVA no incluido.

Se detallan los términos en la siguiente tabla:

MATERIAL	PRUEBA	CICLOS	TIEMPO	TIEMPO CONTABILIZADO	PRECIO
PA6 NAT	I	1.527.040	212h	84h	1.680 €
PA6 3% NTH	I	941.400	131h	51h	1.020 €
	II	979.360	136h	56h	1.120 €
PA6 6% NTH	I	659.240	92h	44h	880 €
	II	763.680	106h	42h	840 €
	III	763.440	106h	42h	840 €
PLEXIMER	I	840	7m	1h	20 €
	II	1720	14m		
	III	1200	10m		
<b>TOTAL</b>				<b>320 h</b>	<b>6.400 €</b>

*Tabla 22: Coste del ensayo convencional para las pruebas específicas del proyecto*



## 6. ANÁLISIS DE TIEMPO Y COSTE

### 6.1. TIEMPO DE REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS

MATERIAL	Nº ENSAYO	Nº CICLOS/ENSAYO	TIEMPO (s)
PA6 NATURAL	I	1.527.040	38.176
PA6 3%NTH	I	941.400	23.535
	II	979.360	24.484
PA6 6%NTH	I	659.240	16.481
	II	763.680	19.092
	III	763.440	19.086
PLEXIMER	I	840	21
	II	1720	43
	III	1200	30
TOTAL			140.948
			39h 9m 8s

Tabla 23: Tiempo de ensayo

### 6.2. COSTES

#### 6.2.1. COSTES DE INVERSIÓN

El coste total de la fabricación, montaje y adaptación de la máquina utilizada en el proyecto asciende a una cuantía total de **once mil ciento sesenta y cinco euros con sesenta céntimos**, sin el concepto de IVA incluido, desglosados en los siguientes términos.

CONCEPTO	COSTE €
Elementos comerciales	738,38
Elementos fabricados	1368,92
Mano de obra	3662,50
Equipo de medida, conexión y seguridad	5287,81
Sistema de refrigeración y lubricación	107,99
TOTAL	11.165,60

Tabla 24: Resumen de costes de inversión



## 6.2.1.1. MÁQUINA

## 6.2.1.1.1. ELEMENTOS COMERCIALES

Cant	ELEMENTO	€/u	PRECIO €	Cant	ELEMENTO	€/u	PRECIO €
0,5	m varilla roscada M8	7,00	3,50	1	Ventilador	28,00	28,00
12	Tuerca antigiro M8	1,00	12,00	1	Tornillo M2,5	0,20	0,20
4	Tuerca antigiro M6	0,90	3,60	2	Rejillas para ventilador	3,09	6,18
4	Tornillo M8x45	2,20	8,80	4	Tornillo M4	0,75	3,00
4	Tornillo M10x30	2,50	10,00	2	Rodamiento leva prototipo	7,62	15,24
8	Tornillo M12x40	3,00	24,00	1	Separador rodamiento	3,23	3,23
1,5	m cable 3x1,5	1,00	1,50	2	Acoplamiento	48,70	97,40
1,5	m cable 3x2,5	1,71	2,57	1	Sujeción eje acople 20mm	4,72	4,72
1	Clavija de enchufe 220V	4,10	4,10	1	Goma de separación acople	41,44	41,44
2	Conectores de acero	3,20	6,40	1	Motor eléctrico	102,00	102,00
0,5	Varilla roscada M36	30,00	15,00	1	Variador de frecuencia	232,00	232,00
8	Tuerca M36	10,00	80,00	2	Muelle 10mm	5,33	10,66
4	Arandela M8	0,25	1,00	1	Muelle 11mm	10,74	10,74
1	Chaveta	0,10	0,10	4	Pata de goma	1,57	6,28
<b>TOTAL</b>							<b>738,38</b>

Tabla 25: Costes de elementos comerciales

## 6.2.1.1.2. MANO DE OBRA

CONCEPTO	UNITARIO €/h	TIEMPO h	COSTE €
Fresadora	25,00	18,00	450,00
Electroerosión	25,00	4,00	100,00
Sierra, taladro...	25,00	4,50	112,50
Montaje	25,00	120	3000,00
<b>TOTAL</b>			<b>3662,50</b>

Tabla 26: Costes de mano de obra



## 6.2.1.1.3. ELEMENTOS FABRICADOS

CANT.	ELEMENTO	MECANIZADO €	MATERIAL €	COSTE €
0,5	m varilla acero liso	36,00	3,50	39,50
0,8	m de eje 20mm	108,00	16,00	124,00
2	Leva	184,00	0,20	368,40
2	Soportes verticales para eje	120,00	9,60	129,60
1	Mordaza recta	80,00	3,75	83,75
1	Mordaza curva	160,00	3,60	163,60
1	Placa soporte motor	120,00	7,65	127,65
1	Placa guía	80,00	0,30	80,30
4	Patas	40,00	8,00	48,00
1	Expulsor	18,00	11,00	29,00
1	Placa Al 30mm (400x400)	120,00	55,12	175,12
<b>TOTAL</b>				<b>1368,92</b>

Tabla 27: Costes de elementos fabricados

## 6.2.1.2. EQUIPO DE MEDIDA, CONEXIÓN Y SEGURIDAD

ELEMENTO	COSTE €	ELEMENTO	COSTE €
Acelerómetros Dytran 3034B	1500,00	0,5m Carril Din	1,00
Equipo Dtect X1	3480,00	0,5m Carril	1,00
Fuente alimentación 24V	90,10	2 Conexiones BNC	1,25
Clavija	4,26	100 g Cera de abeja	0,98
Caja estanca 310x240x160	52,32	Base de enchufe	4,00
Cubo de metacrilato de seguridad	130,00	Adaptador USB-RS232	22,90
<b>TOTAL</b>		<b>5287,81</b>	

Tabla 28: Costes de seguridad, conexión y medida



### 6.2.1.3. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN Y LUBRICACIÓN

CANT.	ELEMENTO	COSTE/UNIDAD €	COSTE €
1	m COBRE Ø4	4,25	4,25
1	m COBRE Ø8	3,45	3,45
1	m TUBO	4,30	4,30
1	5 unidades Racor tapón Ø8	3,94	3,94
1	Filtro de engrase	75,60	75,60
3	T Ø8	1,55	4,65
2	Cruz Ø8	2,00	4,00
2	Codo Ø8	1,50	3,00
3	Reductor Ø8-Ø4	1,60	4,80
<b>TOTAL</b>			<b>107,99</b>

Tabla 29: Costes del sistema de refrigeración - lubricación

### 6.2.2. COSTES DE FUNCIONAMIENTO

Para obtener un dato comparativo con los costes de análisis convencionales, se sumará a los costes de inversión, los costes de funcionamiento de la máquina.

Antes del cálculo se ha de decir que estos gastos resultarán prácticamente despreciables.

Para la obtención de los gastos de funcionamiento, se tendrá en cuenta un material que rompa a los  $10^6$  ciclos ensayado a la frecuencia del proyecto, 40 Hz.

CONCEPTO	UNIDADES	PRECIO UNITARIO €	TIEMPO h	TOTAL €
CONSUMO ELÉCTRICO*	0,47 kW	0,1423 €/kWh	7	0,47
LUBRICACIÓN	0,056 L/h	7,20 €/L	7	2,80
<b>TOTAL</b>				<b>3,27</b>

Tabla 30: Coste de funcionamiento (40Hz) para  $10^6$  ciclos

*\*El término de potencia será despreciado debido a su insignificancia con respecto al de energía*



El gasto total de funcionamiento requerido para la realización de los ensayos descritos en el proyecto se describe a continuación en la siguiente tabla:

CONCEPTO	UNIDADES	PRECIO UNITARIO €	TIEMPO h	TOTAL €
CONSUMO ELÉCTRICO*	0,47 kW	0,1423€/kWh	39,152	2,62
LUBRICACIÓN	0,056 L/h	7,20 €/L	39,152	15,78
<b>TOTAL</b>				<b>18,40</b>

*Tabla 31: Costes de funcionamiento de las pruebas específicas del proyecto*



## 7. ANALISIS DE RESULTADOS

### 7.1. COMPARACIÓN DE DATOS

#### 7.1.1. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DEL MATERIAL

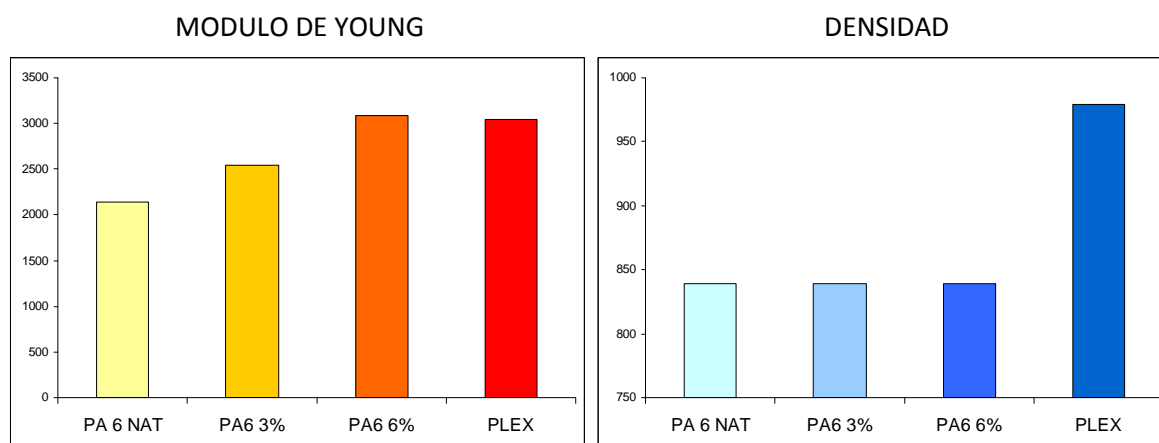


Gráfico 29: Comparación entre materiales: Módulo de Young y Densidad

El Módulo de Young aumentará con la concentración de nanotubos de halloysita, quedando estable incluso disminuyendo si esta concentración es muy elevada, por lo que este aditivado, si es en baja proporción, aumentará la característica elástica de los materiales.

En cuanto a la densidad, comprobamos que una adición elevada de nanopartículas afectará a su valor aumentándola.

#### 7.1.2. AMORTIGUAMIENTO

La energía cinética disipada aumentará con la concentración de nanopartículas en el material, pero para que sea significativa también lo ha de ser el aditivado.

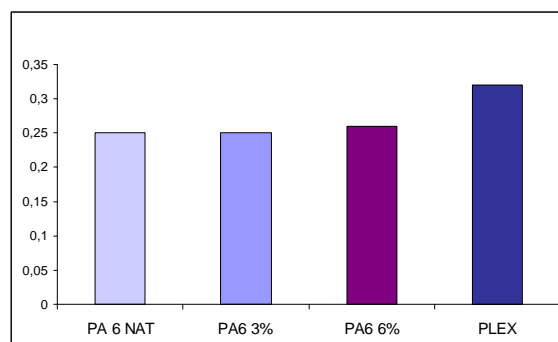
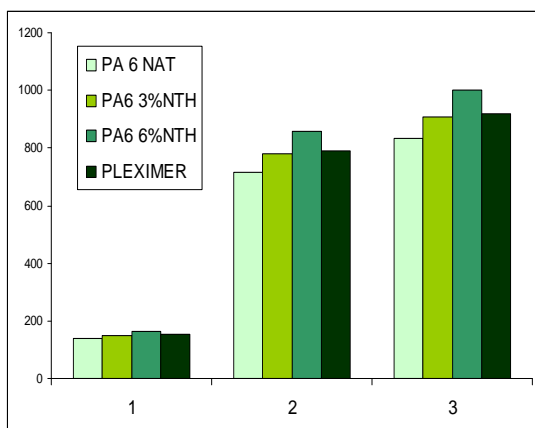


Gráfico 30: Comparación entre materiales: Constante de amortiguamiento



### 7.1.3. FRECUENCIAS NATURALES



Comparando los datos de los distintos materiales, para el mismo modo de vibración, se demuestra una misma distribución que en el módulo de Young para todos los modos de vibración.

La frecuencia natural en cada modo aumentará al aumentar la concentración de nanopartículas, disminuyendo ligeramente en el caso del Pleximer, por ser una concentración muy elevada.

Gráfico 31: Comparación entre materiales: Frecuencias naturales

### 7.1.4. FLEXIÓN

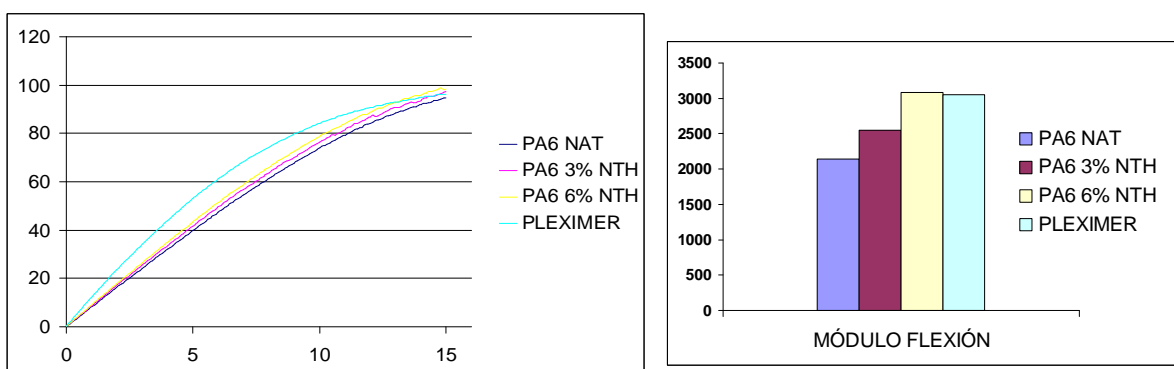


Gráfico 32: Comparación entre materiales: Flexión

El módulo obtenido del ensayo de flexión es un poco menor al obtenido por el ensayo de tracción, pero en un rango muy bajo por lo que podemos considerar los materiales ensayados isótropos.

La curva de flexión demuestra que el material más resistente a flexión estática es la poliamida 6 con un porcentaje del 6% de nanotubos halloysita, y que todos comparten un perfil parecido de comportamiento ante este esfuerzo, exceptuando el pleximer.

El pleximer con una concentración mucho mayor al resto, del 30% de nanotubos de halloysita, presenta una resistencia intermedia entre el resto de materiales, pero demuestra en el transcurso del ensayo una deformación menor al resto.





## 7.2. COMPARACIÓN DEL NÚMERO DE CICLOS SOPORTADOS

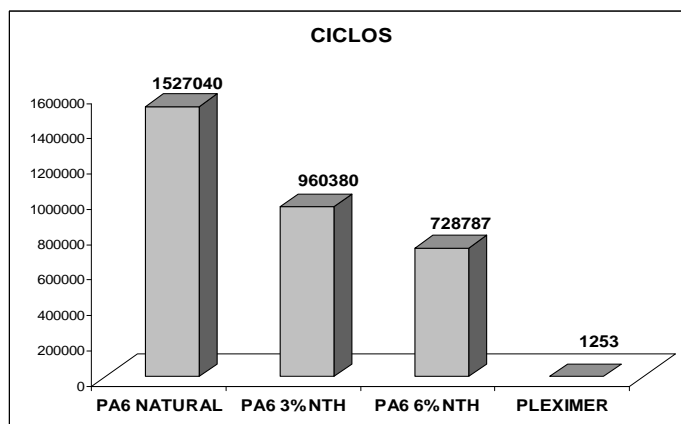


Gráfico 33: Comparación entre materiales: Nº ciclos soportados

El gráfico muestra una comparación de la media de ciclos soportados por cada material, bajo las condiciones explicadas en el desarrollo del presente proyecto.

Los ciclos de aguante en cada una de las probetas de un mismo material, no coinciden exactamente, pero mantienen un orden de magnitud parecido; ya que, cómo se ha explicado al inicio del documento, el proceso de fatiga es dependiente de diversos factores, que variarán ligeramente entre muestras, cómo puede ser la distribución de los nanocompuestos, la colocación en la máquina, etc.

Según se refleja en el *gráfico 33*, se podría decir que, el aditivado de nanotubos de halloysita no mejora la resistencia a fatiga del material; ya que habiendo realizado pruebas en las mismas condiciones de esfuerzo, y bajo la misma geometría en los cuatro materiales, se demuestra un número de ciclos soportados por la poliamida 6 natural, muy por encima del resto de materiales.

El hecho de que la resistencia a fatiga, no mejore, puede ser debido a la característica no homogénea de la matriz, compuesta de dos tipos diferentes de poliamida 6.

Los resultados obtenidos pudieran estar altamente influenciados por la matriz polimérica secundaria, con una menor resistencia a fatiga que la principal.

Probablemente los valores promedios encontrados en anteriores propiedades mecánicas estudiadas, serían posibles, con una buena mezcla entre la poliamida 6 principal y los nanocompuestos de halloysita, sin la intervención adicional de una nueva matriz polimérica del masterbatch, posibilidad a corroborar en futuros estudios.



### 7.3. REDUCCIÓN DE TIEMPO

	tiempo
Ensayo Convencional (1kHz)	783h 2m 40s
Ensayo por vibraciones	39h 9m 8s

Tabla 32: Resultados: reducción de tiempo

La disminución del tiempo empleado en el ensayo de los materiales elegidos para el proyecto, ha resultado del 95%, con respecto a ensayos convencionales realizados a 2Hz de frecuencia.

### 7.4. REDUCCIÓN DE COSTE

	coste €
Ensayo Convencional (2 Hz)	6.400,00
Ensayo por vibraciones (40 Hz)	18,40
Inversión inicial ensayo por vibraciones	11.165,60

Tabla 33: Comparación: costes

Se estima que la máquina, tal y cómo se ha construido en proyecto, soporte en buenas condiciones, 500 horas de funcionamiento, por lo que resulta un índice de amortización de 22,33 €/h; quedando la comparación de gastos totales para las pruebas especificadas, de la siguiente manera:

	coste €
Ensayo Convencional (2 Hz)	6.400,00
Ensayo por vibraciones (40 Hz)	892,66

Tabla 34: Resultados: reducción de costes

La reducción obtenida en los gastos ha resultado de alrededor del 86%, pudiendo ser este índice mucho mayor aumentando la inversión en la máquina construida, que contaría con un índice de amortización más bajo.



## 7.5. CONCLUSIONES GENERALES

### 7.5.1. MATERIALES ESTUDIADOS

- Las propiedades mecánicas finales de los materiales aditivados, no son proporcionales al contenido en peso de nanotubos de halloysita.
- Los materiales obtenidos tienen un comportamiento a tracción y flexión no lineal.
- Los módulos de flexión y elasticidad mejoran un 20-40% sin deteriorar la ductilidad del material.
- En general el aditivado de NTH en pequeñas cantidades, mejora las propiedades mecánicas.
- Los materiales mezclados comparten buenas propiedades y suponen bajo coste.
- La matriz de poliamida 6 incluida en el masterbatch afecta de manera muy negativa en el esfuerzo de fatiga, necesario de corroborar con futuros estudios.

### 7.5.2. PROYECTO

- La reducción de tiempo y coste obtenido es muy elevada, pero no supone un método de ensayo normalizado, sólo se obtienen datos a nivel comparativo entre muestras.
- Una mejora de la máquina de ensayos supondría, un número mayor de horas de funcionamiento en correcto estado, y por lo tanto un índice de amortización mucho menor, que implicaría una mayor rentabilidad del proyecto.
- La necesidad por parte de la empresa, de la realización de este tipo de pruebas comparativas, determinarán la viabilidad de mejorar el proyecto.



## 8. MÉTODO DE ENSAYO

### 8.1. ELEMENTOS NECESARIOS

Los elementos necesarios para realizar el ensayo son:

- Máquina de leva que produce la vibración en la probeta, con el sistema de lubricación conectado, para garantizar el correcto funcionamiento.
- Acelerómetros, comunican el equipo de medida con la fuente de vibración, captando la señal vibratoria.
- Equipo de medida, situado dentro de la caja estanca, recibe la señal de los acelerómetros y transmite la medición al ordenador.
- Adaptador USB-RS232 para comunicar el equipo de medida con el ordenador.
- Ordenador con el software instalado, medio de descarga y almacén de datos, que permitirá el procesamiento de las medidas y la visualización de estas.
- Fuente de alimentación, 24V 2.5A, suministrará la corriente eléctrica a la máquina de leva y al equipo de medida Dtect X1.
- Toma de aire comprimido, para el funcionamiento del sistema de lubricación.
- Pistola de temperatura.
- Probetas a ensayar.

### 8.2. CONEXIONES

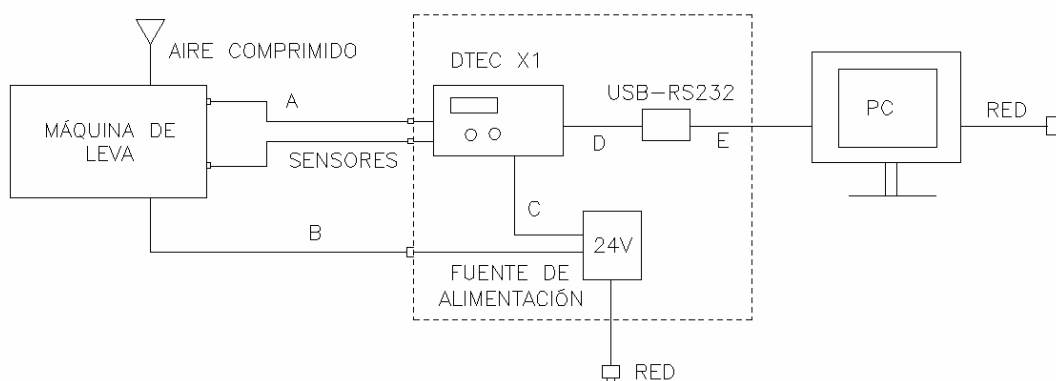


Figura 40: Esquema de conexiones del ensayo



#### **A. MÁQUINA DE LEVA - DTEC X1**

Los sensores captan la señal vibratoria por contacto directo a la máquina de leva, a la que estarán sujetos firmemente por unos pequeños tornillos.

Estos acelerómetros transmiten la señal por un cable coaxial, y se encuentran unidos al equipo de medida Dtect X1 mediante dos conexiones BNC, que insertan directamente en las dos entradas del equipo (Imput 1 e Imput 2).

#### **B, C. MÁQUINA DE LEVA, DTEC X1 - FUENTE DE ALIMENTACIÓN**

Todos los equipos que componen el ensayo necesitarán corriente eléctrica para su funcionamiento, por ello estarán debidamente conectados a una fuente de alimentación de 24V y 2.5 A, y ésta a su vez a la red eléctrica.

#### **D, E. DTEC X1 - PC**

Se conectará el equipo Dtect X1 y el PC mediante un adaptador USB-RS232.

El equipo Dtect X1, la fuente de alimentación y el adaptador USB-RS232 están alojados en una caja estanca preparada para la rápida y cómoda conexión, además de su portabilidad.

Cómo entrada lleva un enchufe de red eléctrica, dónde se conectará la máquina de leva, y dos conectores BNC para insertar los acelerómetros en los dos canales disponibles del equipo de medida.

De ella salen la conexión USB al PC y el cable de red eléctrica para conectar a una toma de corriente.

Para el funcionamiento del sistema de lubricación será necesaria una toma de aire comprimido conectada a la unidad FRL200.

### **8.3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO**

#### **8.3.1. COLOCACIÓN DE LA PROBETA**

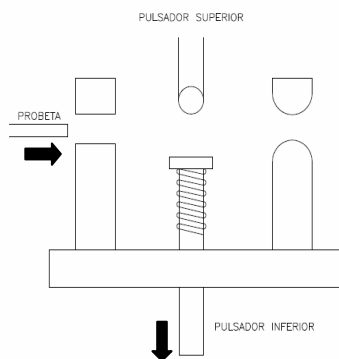
Se encajará la probeta a analizar entre las dos mordazas, en la mordaza recta estará firmemente sujeta, mientras que en la probeta curva se le permitirá el arqueado. El pulsador debe de quedar en el centro de su anchura sin curvarla.

Para realizar este correcto montaje será imprescindible soltar las fijaciones de las mordazas, bajar el pulsador vertical inferior hacia abajo con una herramienta adecuada hasta separar el contacto con el superior, he introducir la probeta entre los tres huecos.



Una vez alojada la probeta apretar las mordazas fuertemente.

La mordaza curva cumplirá su función porque entre su cuerpo inferior y el superior alojará unas tuercas de ancho igual a la anchura de la probeta, de este modo quedará restringido sólo el movimiento vertical y el giro longitudinal.



*Figura 41: Colocación de la probeta*

### 8.3.2. CONEXIONES

Para la puesta en marcha del ensayo las conexiones a efectuar son muy sencillas debido a la compactación que se ha realizado del sistema, introduciendo los equipos intermedios de conexión dentro de una caja estanca.

El procedimiento será el siguiente:

1. Montar los dos sensores por su conexión BNC en la caja estanca.
2. Enchufar la máquina de leva a la toma de red de la caja estanca.
3. Conectar el cable USB al PC.
4. Enchufar a la red la conexión proveniente de la caja estanca.

Los equipos deben estar debidamente conectados entre ellos pero no encendidos.

### 8.3.3. COLOCACIÓN DE LOS SENSORES

Estos elementos deben de tratarse con cuidado y no golpearlos.

Los sensores deberán montarse sobre la máquina de leva, atornillando el cubo de montaje sobre las mordazas de la máquina dónde se encuentran las roscas oportunas, éste será el camino más directo a la fuente generadora de la vibración.

Se deberán estirar los cables, para evitar el ruido, y asegurar la correcta medida.



Ambos cables deben estar conectados a las salidas BNC (Input 1 e Input 2) de la caja estanca.

Los acelerómetros no deberán estar expuestos a humedad, ruidos acústicos externos o sustancias corrosivas, campos magnéticos o radiación, para evitar la alteración de los datos.

#### 8.3.4. PC Y CONFIGURACIÓN

Con todos los elementos conectados pero apagados, encender el PC y el Dtect X1, e iniciar el software de configuración del equipo de medida en FIS Configuration Management.

##### 8.3.4.1. CONFIGURACIÓN DE LA MEDIDA

- 1) Dentro de Configuration Management se abrirá una **base de datos** (File/Open Database), en nuestro caso se ha denominado PROYECTO.
- 2) Dentro de la base de datos PROYECTO será necesario **agregar un dispositivo** (Device/Add new device/Dtect X1/vía serial), también denimonado PROYECTO, que será la carpeta general donde se encontartarán todas las configuraciones.

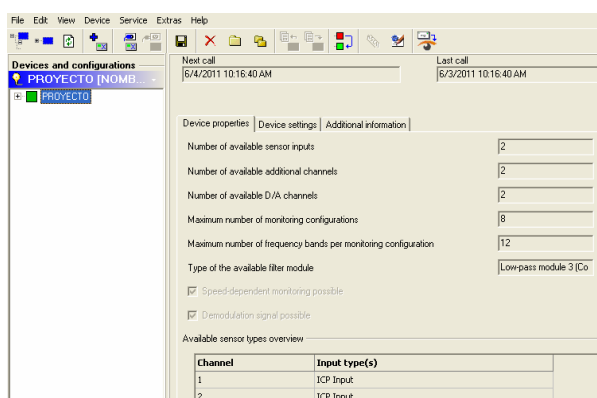


Figura 42: Configuración de la medida, device properties

Dentro del dispositivo PROYECTO, en la pestaña de **device properties** (fig.42) debe aparecer las características del equipo de medida de vibraciones Dtect X1, estas están determinadas automáticamente.

Las demás pestañas no tienen relevancia se mantendrán por defecto.

- 3) Se añadirá una subcarpeta en proyecto (seleccionar PROYECTO/Device/Add sub-item) denominada ENSAYO DE FATIGA, en la que se configurarán y visualizarán los datos más generales de la prueba, mediante las tres siguientes ventanas.

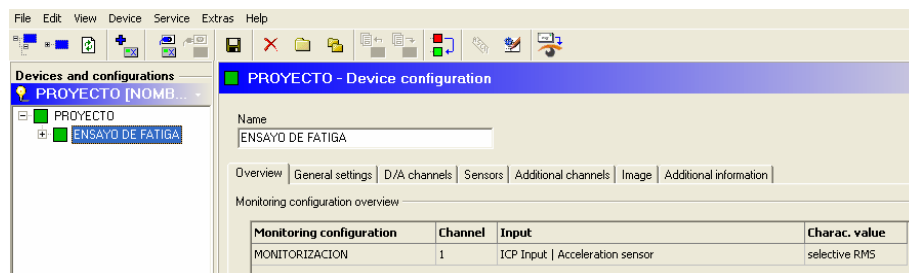


Figura 43: Configuración de la medida, Overview

**Overview** es un resumen de los datos más característicos de la configuración del dispositivo.

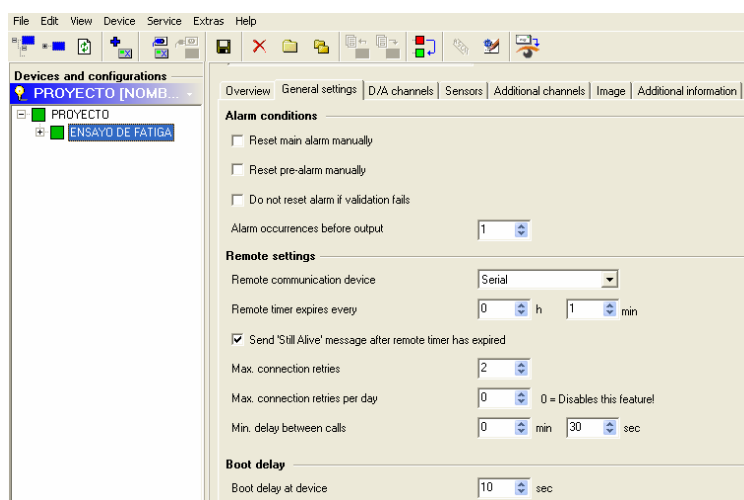


Figura 44: Configuración de la medida, General settings

En la pestaña **general settings**, fijaremos los parámetros de descarga de datos, especificando que la comunicación con Dtect X1 será vía serial, cada 1 minuto. Los demás datos se dejarán por defecto.

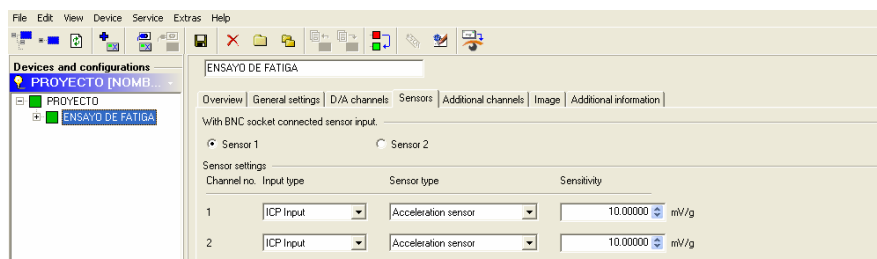


Figura 45: Configuración de la medida, Sensors

**Sensors**, en esta ventana (fig.45) se deberá de detallar las características de los tacómetros utilizados. Que serán iguales para cualquiera de los dos acelerómetros:





- Input Type: ICP input
- Sensor Type: acceleration sensor
- Sensivity: 10 mV/g

4) Dentro del dispositivo añadido, ENSAYO DE FATIGA, se constituirá una monitorización (seleccionar ENSAYO DE FATIGA/Device/Add sub-item), llamada MONITORIZACIÓN.

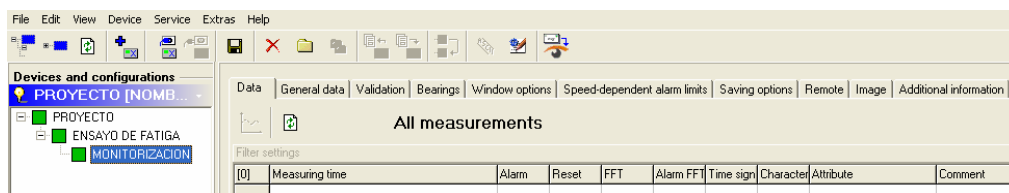


Figura 46: Configuración de la medida, Data

Dentro de MONITORIZACIÓN la pestaña **Data** es el interfaz de registro de todas las medidas realizadas, ordenadas según hora y fecha. En esta ventana se puede acceder a las gráficas de cada una de las medidas grabadas.

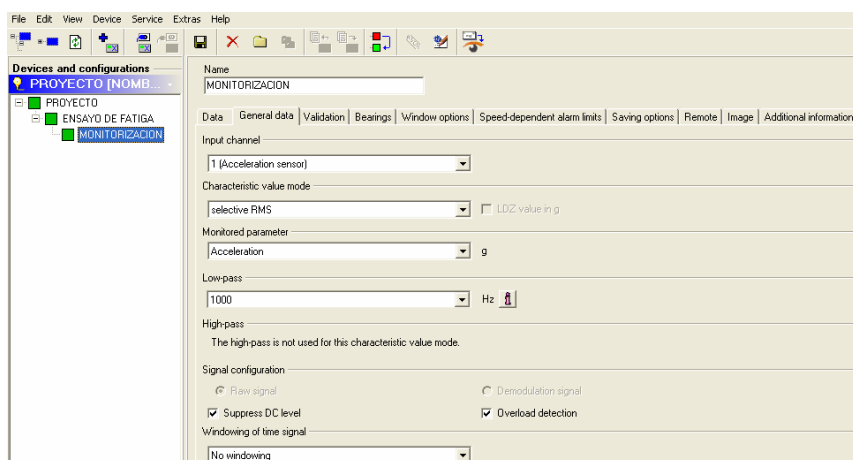


Figura 47: Configuración de la medida, General Data

En la ventana **General data** (fig.47) se detallarán los siguientes parámetros:

- Input channel: 1-2, dependiendo del canal al que esté conectado el acelerómetro.
- Characteristic value mode: selective RMS (intervalos de frecuencia).
- Monitored parameter: Acceleration.
- Low Pass: 1000 Hz.
- Windowing of time signal: Se realizarán dos configuraciones una con Ventana Hanning y otra con No Windowing, para la representación correcta de la señal en frecuencias y tiempo.

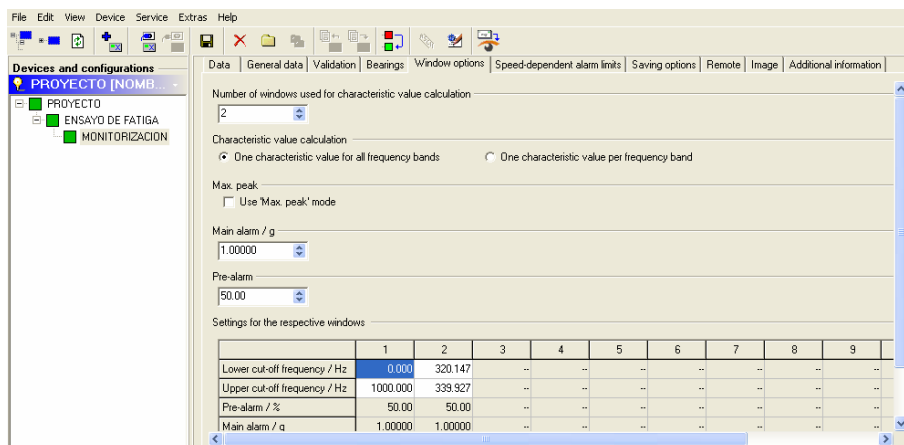


Figura 48: Configuración de la medida, Window options

En la pestaña **Window Options** se debe de precisar los intervalos de frecuencia a capturar dependientes de las frecuencias naturales de las probetas. El número máximo de intervalos que permite configurar es 12.

#### 8.3.4.2. CONFIGURACIÓN DE LA DESCARGA DE DATOS

Debido al extenso tiempo continuado que conllevará la prueba, será necesario configurar una descarga de datos automática, para la que será necesario configurar dos pestañas del interfaz de Configuration Manager.

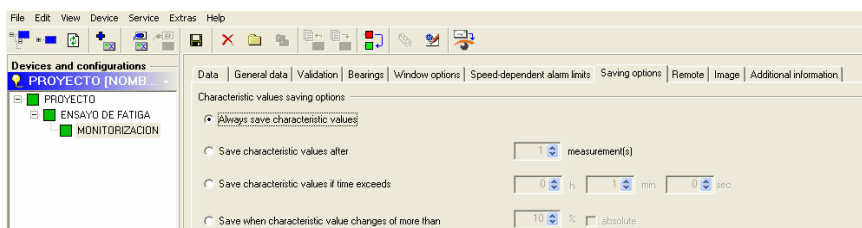


Figura 49: Configuración de la descarga de datos, saving options

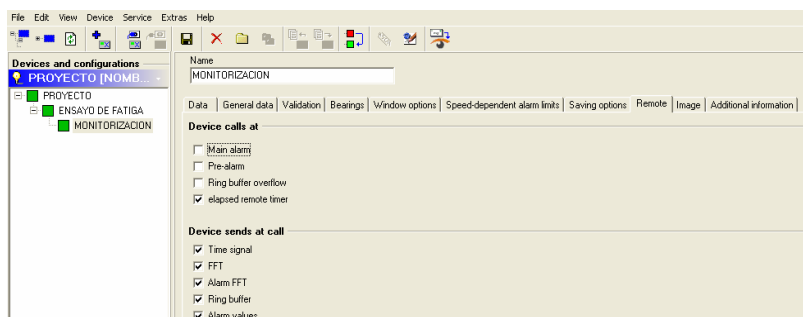


Figura 50: Configuración de la descarga de datos, remote



En una de ellas, **Saving Options** (*fig.49*) se determinará cuantos datos de valor característico se desea guardar, dependiendo de una configuración, por ejemplo, se puede guardar en todo momento, cada cierto intervalo de tiempo o a partir de que exceda un cierto valor.

En la pestaña **Remote** (*fig.50*) fijaremos cuando se ha de realizar la comunicación con el Dtect X1 y los datos a grabar (FFT, time signal...). Marcaremos las casillas de elapsed remote timer y todas las contenidas en device sends at call.

#### 8.3.5. COMUNICACIÓN PC-DETECT X1.

Una vez definidos completamente los datos de las anteriores ventanas, se seleccionará ENSAYO DE FATIGA y se seguirá el siguiente procedimiento:

1. Conectar el dispositivo (connect to selected device).
2. Enviar las configuraciones (send device configuration to device).
3. Enviar los nombres de las configuraciones (send configuration names to device).
4. Desconectar el dispositivo (close current connection).

Dtect X1, nos informará de que está conectado correctamente cuando aparezca encendido de manera constante su led verde de OK y además aparezca en su pequeña pantalla datos de medida.

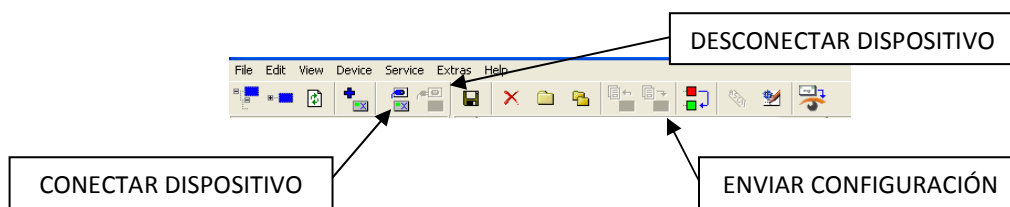


Figura 51: Configuración de la medida, conexión con Dtect X1

Se tendrá en cuenta que al realizar la conexión PC- equipo de medida, este último dejará de registrar datos, y comenzará a medir al desconectar el dispositivo.

#### 8.3.6. MÁQUINA DE LEVA

Para establecer un correcto funcionamiento será necesario el control exhaustivo de tres elementos importantes en la máquina de ensayos antes de iniciar la prueba:



#### ▪ VARIADOR DE FRECUENCIA

Se tapará mediante un plástico protector para evitar las salpicaduras de aceite lubricante

Deberá estar fijado a la frecuencia de ensayo, aproximadamente 20 Hz.

#### ▪ MOTOR

Se deberá conectar el ventilador que lleva incorporado para evitar el sobrecalentamiento.

#### ▪ SISTEMA DE LUBRICACIÓN

Se comunicará la unidad de lubricación FRL200 con la toma de aire comprimido, a 2 bar de presión y 1 gota de aceite aproximadamente cada 5 segundos.

Se comprobará que el aceite cae en el lugar oportuno y no existe ninguna fuga en el sistema.

### 8.3.7. PUESTA EN MARCHA DEL ENSAYO

Con todo debidamente conectado y configurado, además de estar colocada la probeta oportuna se deberán seguir los siguientes pasos para el inicio del ensayo.

1. **Remote Server**, en el se añade el puerto al que está conectado el aparato de medida (Add communication channel/serial (seleccionar puerto y fijar un nombre)).

Iniciar con el símbolo de start.

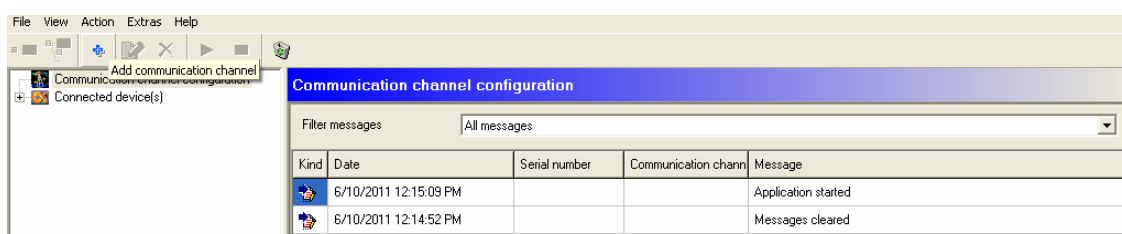
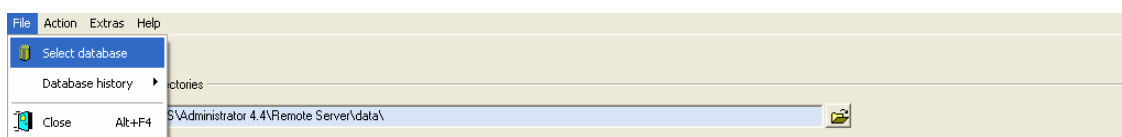


Figura 52: Inicio de Remote Server

2. **Data Link**, seleccionar la base de datos a utilizar (File/Select database), esta tiene que ser la misma que la utilizada en Configuration Management.

Iniciar pulsando el símbolo de start.



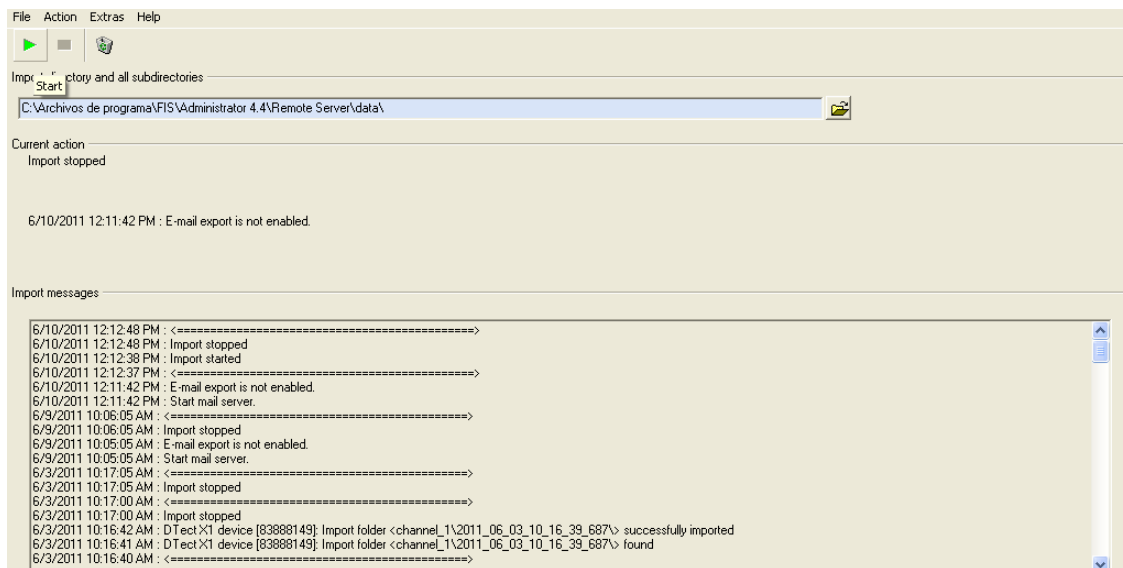


Figura 53: Inicio de Data Link

3. Iniciar **Configuration Manager (opcional)**, visualiza las medidas que se vayan registrando.
4. Encender **ventilador** del motor.
5. Conectar el sistema de **lubricación** mediante la llave de apertura del aire comprimido.  
Comprobar que la unidad FRL 200 trabaja a 2 bares de presión y expulsa una gota cada 5 segundos aproximadamente, sino regularlo.
6. Comprobar que los **acelerómetros y el variador** de frecuencia están protegidos de las salpicaduras de aceite.
7. Regular el variador a **20 Hz** y pulsar el botón de verde de Stara, ayudando al motor a realizar su primer giro.
8. Tapar la máquina con el cubo de **protección**.



## 10. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer a Aitiip centro tecnológico la oportunidad que me ha brindado para realizar este proyecto, la dedicación y apoyo de todos sus miembros, en especial de los compañeros de oficina técnica.

A mis compañeros del departamento de ingeniería mecánica, por su disposición a ayudarme.

Y por su puesto a David, quien en la mayoría de situaciones se ha manchado las manos por mí, invirtiendo todo el tiempo posible y más.

A mis amigos por su apoyo.

A mi madre, mi hermana, Adolfo y Carlos, porque sin ellos jamás hubiese llegado hasta aquí y a mi padre, al que añoro tremendamente, porque su recuerdo me da fuerza en todo lo que hago.



## 11. BIBLIOGRAFÍA

### 11.1. LIBROS, DOCUMENTOS Y PROYECTOS

- *“Ingeniería de materiales para industria y construcción”, Jesús Martín Sanjosé, María Antonieta Madre Sediles, José Manuel Franco Gimeno.*
- *“Método basado en vibraciones para realizar pruebas de fatiga en materiales compuestos”, Alexander Peralta, Frederick A. Just, David Serrano y Basir Shafiq.*
- *“Introducción a la ciencia de los materiales”, William D. Callister.*
- *“Selección de materiales en el diseño que máquinas”, Carles Riba Romera.*
- *“Análisis de vibraciones”, Gen White.*
- *“Comportamiento en fatiga de poliamidas reforzadas con fibra de vidrio corta”, tesis doctoral de José Antonio Casado del Prado.*
- *“Evaluación de las curvas S-N-P en el ensayo de fatiga en flexión en cuatro puntos”, M. Toledano, M. A. Arenas, A. Donado, A. Monsalve, L. Ramírez, A. Conde.*
- *“Análisis a fatiga de polietilenos de alta densidad (PEAD) utilizados en tuberías”, Raúl Machado.*
- *“Vibration Spectrum Analysis” S.Goldman.*
- *“Machinery Analysis and Monitoring” J. Mitchell.*
- *“Diseño e implantación de un analizador virtual de vibraciones mecánicas” E.Estupiñán, C. Sanmartín, R. Solaligue.*
- *“Introducción al análisis espectral”, J. Luque*
- *“Apuntes de instrumentación electrónica” Universidad Politécnica de Cartagena, departamento de Electrónica, Tecnología de Computadoras y Proyectos.*
- *“Frecuencias naturales en vigas de pared delgada doblemente asimétricas” Mecánica Computacional Vol. XXIII, Daniel Ambrosini y Rodolfo Danesi.*
- *“Introducción al procesamiento digital de señales” Juan Vignolo Barchiesi.*
- *“Apuntes de Vibraciones Mecánicas” Javier Abad, Dto. Ingeniería Mecánica, Escuela de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza.*
- *“Teorías de falla dinámica. Análisis de falla por fatiga”, Marcelo Tulio Piovan.*
- *“Medición y análisis de las vibraciones como técnica de inspección de equipos y componentes, aplicaciones, normativas y certificación” Pedro Nelson Saavedra.*
- *“Tabla de resistencia química” Proyectos y delegaciones, S.L.*
- *“Yield and fatigue behavior of polypropylene and polyamide-6 nanocomposites”, P.K. MALLICK.*



- *“Apuntes de Teoría de Mecanismos” Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid.*
- *“Análisis modal de la tapa armónica de una guitarra clásica mediante la aplicación de Ansys”, Torres T. Alejandro.*
- *“Análisis modal operacional: teoría y práctica” Manuel Rodríguez Súnico.*
- *“Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico” A-Maq S.A.*

#### 11.2. INTERNET

- *[www.tripod.com](http://www.tripod.com)*
- *[www.wikipedia.es](http://www.wikipedia.es)*
- *[www.naturalnano.com](http://www.naturalnano.com)*
- *[www.jq.com](http://www.jq.com)*
- *[books.google.es](http://books.google.es)*
- *[www.aitiip.com](http://www.aitiip.com)*
- *[www.u-cursos.cl/ingenieria](http://www.u-cursos.cl/ingenieria)*
- *[www.iberisa.com](http://www.iberisa.com)*
- *[www.DLlengineering.com](http://www.DLlengineering.com)*
- *[www.feadomain.com](http://www.feadomain.com)*

#### 11.3. NORMAS

- *UNE 95-010-86 “Vibraciones y choques, terminología”.*
- *UNE 7117 “Ensayo de fatiga en materiales metálicos”.*
- *UNE 7118 “Clases y ejecución de los ensayos de fatiga de los materiales metálicos”.*
- *ISO 2372 “Vibración mecánica de máquinas con velocidades de operación entre 10 y 200 rev/s”.*