

Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Aeroespacial

Evaluación del daño ante cargas de fatiga mediante ultrasonidos

Autor: Juan Diego López Romero

Tutor: José Cañas Delgado

**Dep. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de
Estructuras**

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Aeroespacial

Evaluación del daño ante cargas de fatiga mediante ultrasonidos

Autor:

Juan Diego López Romero

Tutor:

José Cañas Delgado

Catedrático de Universidad

Dep. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015

Proyecto Fin de Carrera: Evaluación del daño ante cargas de fatiga mediante ultrasonidos

Autor: Juan Diego López Romero

Tutor: José Cañas Delgado

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis amigos

Agradecimientos

La realización de este proyecto ha sido posible gracias a la colaboración del personal del Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales, tanto por su atención a la hora de prestar ayuda en el manejo de máquinas y herramientas de laboratorio, como por el asesoramiento a la hora de orientar el proyecto.

Mencionar la ayuda y guía de mi tutor, José Cañas, el buen trabajo de su hermano, Antonio Cañas, a la hora de resolver problemas de diseño, a Carlos Arellano (TEAMS) por aportar propuestas y orientar el proyecto para terminarlo a tiempo, a María del Mar, por su tiempo dedicado a mostrar cómo manejar equipo de laboratorio, a José Ramón, por su tiempo dedicado a ayudarme a desenvolverme en el laboratorio, a mis amigos y a mi familia por su apoyo incondicional, y en definitiva todo aquel que ha colaborado para que este proyecto concluya exitosamente.

Juan Diego López Romero

Alumno de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla

Sevilla, 2015

Resumen

Este Proyecto de Fin de Carrera ha consistido en el diseño, montaje y prueba de un sistema robotizado de inspección de daños por ultrasonidos durante ensayos a fatiga. El control del sistema se realiza íntegramente desde Matlab, donde se han desarrollado interfaces gráficas de control y códigos de análisis de datos.

La evaluación del sistema automático se ha llevado a cabo mediante una serie de ensayos de fatiga de placas de fibra de carbono rectangulares con orificio central, midiéndose la atenuación del eco de fondo cada cierto número de ciclos para cuantificar daños.

Abstract

The main object of this project has been the design, set up and testing of an automatic flaw detection system during fatigue tests based on ultrasonic flaw detection technology. The system is full controlled via Matlab, where several graphic control menus and data analysis codes have been developed.

The system has been tested during several fatigue tests of carbon fiber plates with center hole. The decrease of the received signal has been measured to quantify the damage in the plates every several cycles.

Índice

Agradecimientos	i
Resumen	iii
Abstract	v
Índice	vi
Índice de Figuras	viii
1 Introducción	1
1.1 Objeto del proyecto	1
1.2 Alcance	1
1.2.1 Objetivos iniciales	1
1.2.2 Objetivos finales	2
1.3 Antecedentes	2
2 Estudio preliminar	4
2.1 Primeras decisiones	4
2.2 Material inicial	5
2.3 Material adquirido	7
2.3.1 Plotter 2D (Makeblock)	7
2.3.2 EPOCH 1000i (Olympus)	8
2.3.3 Plancha de fibra de carbono	8
2.4 Máquina de ensayo INSTRON 8801	8
3 Montaje y puesta a punto	10
3.1 Plotter	10
3.1.1 Primeras pruebas	10
3.1.2 Montaje	12
3.2 EPOCH 1000i	17
3.2.1 Software y conectividad	18
3.3 Placas de fibra de carbono	20
4 Código desarrollado	21
4.1 Interacción Matlab-GageView	22
4.2 Interfaz GUIDE	22
4.3 Programas implementados	23
4.3.1 Programa zig-zag	23
4.3.2 Programa circunferencial	26
5 Ensayos	29
5.1 Tracción	29
5.2 Fatiga	30
5.2.1 Metodología	30
5.2.2 Ensayos	31
6 Resultados	35
6.1 Ensayos al 90% de la carga de rotura	35

6.1.1	Observaciones preliminares	35
6.1.2	Ensayo 1	35
6.1.3	Ensayo 2	38
6.1.4	Discusión de resultados	40
6.2	Ensayo al 80% de la carga de rotura	40
6.2.1	Ensayo	40
6.2.2	Discusión de resultados	44
6.3	Ensayo al 70% de la carga de rotura	44
6.3.1	Ensayo	44
6.3.2	Discusión de resultados	48
6.4	Evaluación global	48
7	Conclusiones	49
7.1	Comentarios	49
7.2	Lecciones aprendidas	49
7.3	Propuestas de mejora	50
	Referencias	51
	Anexo	52
	<i>Detalles del montaje</i>	52
	<i>Manual de uso del sistema</i>	57
	<i>Ruta en Zig-Zag</i>	57
	<i>Ruta circunferencial</i>	60
	<i>Macro</i>	61
	<i>Tablas de atenuación</i>	63
	<i>Primer ensayo con 90% carga de rotura</i>	63
	<i>Segundo ensayo con 90% carga de rotura</i>	64
	<i>80% carga de rotura</i>	65
	<i>70% carga de rotura</i>	66
	<i>Códigos</i>	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Imagen del USD 10	5
Figura 2-2. Interpolación de puntos en Matlab	6
Figura 2-3. Fotografía (Izquierda) y procesado en ImageJ (Derecha)	6
Figura 2-4. Imagen del Plotter 2D de Makeblock	7
Figura 2-5. Imagen del EPOCH 1000i	8
Figura 2-6. Imagen de la máquina INSTRON 8801	9
Figura 3-1. Esquema de la electrónica del plotter	12
Figura 3-2. Sujeciones del montaje frontal	12
Figura 3-3. Vista frontal del montaje frontal	13
Figura 3-4. Detalle de la flexión de las sujeciones	14
Figura 3-5. Fotografía del montaje lateral interior	14
Figura 3-6. Pinzas de sujeción para el montaje lateral interior	15
Figura 3-7. Mecanismo retraído	16
Figura 3-8. Mecanismo extraído	16
Figura 3-9. Detalle de la sujeción del palpador 1	17
Figura 3-10. Detalle de la sujeción del palpador 2	17
Figura 3-11. Detalle de gomillas de compensación	17
Figura 3-12. Detalle de gomillas de presión	17
Figura 3-13. Esquema de funcionamiento del sistema	19
Figura 3-14. Probetas	20
Figura 4-1. Interfaz Zig-Zag 1	23
Figura 4-2. Interfaz Zig-Zag 2	24
Figura 4-3. Interfaz Zig-Zag 3	25
Figura 4-4. Interfaz Zig-Zag 4	25
Figura 4-5. Puntos de exploración con desfase angular	27

Figura 4-6. Puntos de exploración sin desfase angular	27
Figura 4-7. Interfaz Circunferencial 1	27
Figura 4-8. Interfaz Circunferencial 2	28
Figura 4-9. Interfaz Circunferencial 3	28
Figura 5-1. Probeta ensayada a tracción	29
Figura 5-2. Indicación del manómetro durante los ensayos	30
Figura 5-3. Montaje experimental	31
Figura 5-4. Problema de placa con orificio	32
Figura 5-5. Simulación de la solución tensional (Código de poloestable.wordpress.com/)	33
Figura 5-6. Zonas de dominio de las componentes tensionales	34

1 INTRODUCCIÓN

*Lo que sabemos es una gota de agua,
lo que ignoramos es el océano.
- Isaac Newton -*

1.1 Objeto del proyecto

Como ya se ha dicho en el resumen, este Trabajo de Fin de Grado ha consistido en el desarrollo de un montaje experimental robotizado de exploración de placas de fibra de carbono en busca de defectos mediante ultrasonidos, el desarrollo del correspondiente software de control y análisis de datos y el testeo del mismo mediante la exploración de diversos especímenes mientras eran sometidos a fatiga.

En el ámbito académico, el objetivo principal del proyecto se ha centrado en un acercamiento a los detectores de defectos mediante ultrasonidos, la automatización de procesos experimentales, y en definitiva, una buena toma de contacto con los ensayos no destructivos.

Los distintos montajes, pruebas de equipo y ensayos se han llevado a cabo en el Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales (LERM) de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSI) de Sevilla.

1.2 Alcance

El alcance del proyecto sufrió distintos cambios durante su desarrollo:

1.2.1 Objetivos iniciales

En un principio, los objetivos del proyecto consistían globalmente en dos tareas que a continuación se detallan:

i. Exploración manual

La primera parte del proyecto consistía en realizar distintos ensayos de fatiga a varias placas de fibra de carbono, variando la orientación relativa de las fibras, con el fin de ser exploradas posteriormente mediante un dispositivo de ultrasonidos en busca de defectos.

La idea principal consistía en aprender a reconocer los distintos tipos de defectos que se pueden encontrar en este tipo de placas mediante la exploración de las mismas con palpadores ultrasónicos y documentar qué tipo de defectos aparecían en función de:

- La orientación de las fibras
- La geometría de la placa
- La frecuencia
- La amplitud de la carga
- Condiciones de temperatura, humedad,...
- Etc.

ii. Automatización del proceso

Una vez realizado el primer acercamiento a los equipos y a los especímenes, el proyecto concluiría con el desarrollo de un sistema sencillo de exploración automática de las placas que detectaría los distintos tipos de defectos que puedan darse de manera automática, de manera que posteriores estudios no se centren en el manejo del equipo de ultrasonidos, sino en variar las condiciones de ensayo (Como las expuestas en la lista del punto anterior) para poder realizar investigaciones de una manera ágil y eficaz.

La exploración objetivo consistía en un barrido en zig-zag de probetas de fibra de carbono in situ (Sin ser desmontadas de la máquina de ensayo), de tal manera que se pudiera realizar un estudio de imperfecciones a medida que se le aplicaban ciclos de carga

1.2.2 Objetivos finales

i. Respecto a la automatización

Durante los estudios preliminares (Que se detallarán más adelante) se vio necesario adquirir un nuevo equipo de ultrasonidos que permitiera una captación de datos manejable, lo cual requirió búsqueda de distintos dispositivos comerciales que cubriera los requerimientos mínimos para este proyecto. Así mismo, la búsqueda de material para la automatización, y en vista a que la segunda parte del proyecto cubriría gran parte de la carga de trabajo, se optó por solucionar la búsqueda del material en lugar de realizar los ensayos manuales, y diseñar al completo el montaje automático.

ii. Respecto al ensayo

Después del diseño del montaje, el desarrollo del software y las distintas pruebas realizadas al mismo, se tomó la decisión de concluir el proyecto validando el nuevo montaje experimental fatigando varias placas de fibra de carbono con orificio central (De tal manera que se ahorraría tiempo en este tipo de ensayos) y midiendo la atenuación del rebote de las ondas ultrasónicas en el espesor de las placas mientras eran ensayadas.

1.3 Antecedentes

Por ensayo no destructivo (END) se entiende todo tipo de prueba o examen en la cual, sin destruir el objeto o alterar notablemente sus propiedades, se puede obtener información del mismo; en contraste con los destructivos, en los que se aplican directamente procedimientos físicos y en consecuencia algún tipo de daño en la pieza a ensayar. En términos industriales, este segundo tipo de ensayo no es aplicable a la producción de manera global, pues dañar componentes de productos fabricados para probar su funcionalidad o estado es cuanto menos impracticable.

Actualmente, los nuevos retos de fabricación, el continuo crecimiento de la industria, la introducción de la automatización de procesos, y los desafíos tecnológicos, hacen de los END una solución de compromiso para poder realizar seguimientos del estado de los productos, durante su fabricación y su etapa de servicio, de una manera rápida y eficaz. Así mismo, y en relación con la aplicación en el presente trabajo, también permiten llevar a cabo labores de investigación o seguimiento para determinar propiedades o comportamientos de materiales ante diferentes solicitaciones o condiciones de ensayo.

Siguiendo esa línea general, pueden distinguirse varias aplicaciones de los END:

- Caracterización: Naturaleza, estado, determinación de tratamientos térmicos o superficiales, etc.
- Metrología: Comprobación de tolerancias, registros de fabricación, etc.
- Detección de defectos: Ya pueden ser para comprobar el estado de deterioro de una pieza o componente en servicio y validar o no su utilidad, o bien, en relación con el control de calidad en

fabricación, detectar imperfecciones o fallos en el proceso e igualmente validar o no los productos fabricados.

Los métodos END se basan en emplear un principio o fenómeno físico conocido, de tal manera que se pueda obtener información mediante la respuesta del material ante el mismo. Así encontramos distintos procedimientos:

- **Ensayo ultrasónico (UT): Ondas elásticas**
- Ensayo por radiación (RT): Ondas electromagnéticas
- Ensayo por corrientes de Foucault (ET): Corriente eléctrica inducida
- Ensayo con partículas magnéticas (MT): Campo magnético
- Ensayo con líquido penetrante (PT): Capilaridad
- Ensayo visual (VT): Luz visible
- Ensayo por emisión acústica (AET): Ondas sonoras
- Ensayo térmico por infrarrojos (IRT): Temperatura

Siendo solo los 2 primeros los únicos aplicables a materiales compuestos.

Este trabajo se ha realizado mediante el uso de dispositivos de detección de defectos mediante ondas ultrasónicas. La razón del empleo de este tipo de onda para detectar defectos en materiales radica en que los medios sólidos atenúan las ondas ultrasónicas de dos formas:

- Dispersión (Desviación de la dirección de la onda)
- Absorción (Conversión de energía ultrasónica en calor)

Estos dos fenómenos de atenuación se dan en zonas no homogéneas de un material, es decir, en presencia de algún tipo de inclusión o defecto. En este sentido, se puede decir que a mayor homogeneidad, menor atenuación de las ondas ultrasónicas.

En cuanto a la generación de este tipo de ondas, se emplean dos principios físicos atendiendo al tipo de transductor (Palpador o dispositivo de generación) que se utilice:

- **Magnetostricción:** Deformación de ciertos metales ante la aplicación de un campo magnético. Su aplicación es limitada a grandes piezas de hormigón.
- **Piezolectricidad:** Deformación por excitación eléctrica (Función de “Emisor”) y aparición de cargas eléctricas en superficie ante vibraciones del cristal (Función de “Receptor”).

El funcionamiento básico de esta tecnología es simple: el palpador (Generador de ondas), una vez en contacto con la superficie de la pieza, propaga un haz ultrasónico dentro del material, dando lugar a lo que se conoce como “Campo ultrasónico”, que no es más que la zona “iluminada” por el haz. Cuando el haz incide sobre algún tipo de defecto, la onda “rebota” en esa zona de heterogeneidad, pasando a ser ésta un emisor ultrasónico. Este eco puede ser recogido por el mismo palpador (Como en el caso de este TFG, en el que el palpador es un Emisor/Receptor).

2 ESTUDIO PRELIMINAR

"Es el verdadero arte del maestro despertar la alegría por el trabajo y el conocimiento".

- Albert Einstein -

En líneas generales, los requisitos del proyecto implicaban el uso de un detector por ultrasonidos que, por una parte, permitiera la obtención y transferencia de datos de A-Scan (Lectura de ecos en tiempo real) a un PC para posterior tratamiento y análisis de los mismos, y por otra, admitiera la recepción de comandos de control desde el PC en caso de necesidades de cambios de configuración para el tipo de espécimen en cuestión de manera automática, o bien órdenes de registro de datos en su caso.

Además, la exploración automatizada de las placas implicaría la adquisición de algún tipo de robot con desplazamiento 2D, con la idea de que posicionara el palpador ultrasónico de manera controlada, siguiendo algún tipo código implementado en ordenador que determinara rutas de exploración. Desde un principio se consideró la idea de emplear 2 motores paso a paso controlados por una placa tipo ARDUINO, pues admiten control versátil desde Matlab, habiendo cientos de manuales, ejemplos de montaje y tutoriales en Internet.

Respecto al software de programación, se tenía claro desde un principio que se debían emplear paquetes de software de programación con lenguaje de alto nivel del tipo que se lleva empleando durante años en la escuela de ingenieros, tales como Matlab, Octave, C++, entre otros, dado que parte de las asignaturas cursadas han implicado en mayor o menor medida su uso, y cualquier tipo de modificación o ampliación futura del software de este proyecto se verá facilitada para otros alumnos también familiarizados con el mismo lenguaje de programación.

2.1 Primeras decisiones

Al realizar una primera planificación y vista general de las tareas a realizar, se decidió resolver en primer lugar la búsqueda del material necesario para la automatización de las exploraciones, pues se hizo evidente que el grueso del proyecto radicaría en el desarrollo de un montaje de laboratorio compatible con las máquinas de ensayo de las que se dispone en la escuela, así como el desarrollo de un código de control, tanto del detector como del robot, junto con una interfaz gráfica de manejo de todo el sistema que facilitara el desarrollo del ensayo. El objetivo consistía en que todo el sistema desarrollado se ocupara “por sí solo” de la toma de datos, siendo el único cargo de aquella persona que maneje el montaje analizar los datos que se obtienen y gestionar los resultados.

2.2 Material inicial

La escuela disponía del detector de defectos por ultrasonidos USD 10 de la empresa australiana Krautkramer Branson. Se trata de un dispositivo con fecha de fábrica de 1990. El dispositivo contiene gran cantidad de opciones de configuración, versatilidad en los modos de visualización de los ecos, posibilidad de comunicación con impresora para impresión de pantalla y datos de configuración, por lo que su uso está más bien orientado a trabajo de campo.

Se realizó un estudio de funcionalidad del dispositivo con el fin de ver qué posibilidades tenía el USD 10 para cumplir los requisitos del proyecto.



Figura 2-1. Imagen del USD 10

El USD 10 refleja en pantalla una gráfica con la señales de ecos recogida por un palpador emisor/receptor, permitiendo así mismo modificar el modo de visualización (Señal positiva, negativa o suma de ambas), junto con distintos parámetros de configuración, tales como parámetros de las puertas, ganancia de pantalla, parámetros de propagación de las ondas por el material, etc.

Respecto a comunicación externa, el USD 10, tal y como indicaba el manual, permitía imprimir a través de su salida Serial en una impresora tipo FX todos los parámetros de configuración, así como una captura de pantalla adjunta. Así mismo, en otros manuales encontrados en la red, se citaba la posibilidad de obtener el pantallazo en formato de impresión en PC, lo cual podría permitir realizar un análisis de imagen de dicha captura, y obtener la nube de puntos de la señal de eco para realizar un análisis del mismo. Tras diversas pruebas de conexión con cables seriales, y tras todo intento vano de comunicación serial vía Matlab (Creación de objetos seriales y envío directo de información y órdenes de control) se descartó la posibilidad de comunicar el USD 10 con un ordenador, bien por deterioro de la salida serial, o bien por no haber compatibilidad real con un ordenador. Por tanto, en un primer análisis, el dispositivo no permitía conseguir los objetivos del proyecto.

Ante de desechar el uso del dispositivo, se optó por una propuesta algo más “agresiva” aprovechando la idea de realizar análisis de imagen de la gráfica del USD 10.

Buscando software de este tipo por internet, se encontró el programa ImageJ, un software libre de análisis de imágenes muy versátil, el cual admite crear “macros” (Programación en código para realizar diversos tratamientos de imagen de manera secuencial y automática) para que realice diversas tareas de edición y procesamiento de imágenes, así como análisis y obtención de datos de gráficas de manera automática. Así mismo, cabe mencionar que el programa admite comunicación con Matlab, e incluye una extensión para emplear código de control de ImageJ desde Matlab.

Entre otras muchas funciones, el programa permite obtener coordenadas XY de los píxeles de la imagen procesada, y guardarlas en columnas en un archivo de texto. Una vez obtenidas las coordenadas, se puede leer el archivo con Matlab. Con un pequeño programa desarrollado para aproximar la nube de puntos que se obtiene, e interpolar los puntos se consiguieron los siguientes resultados a partir de una fotografía tomada a mano:

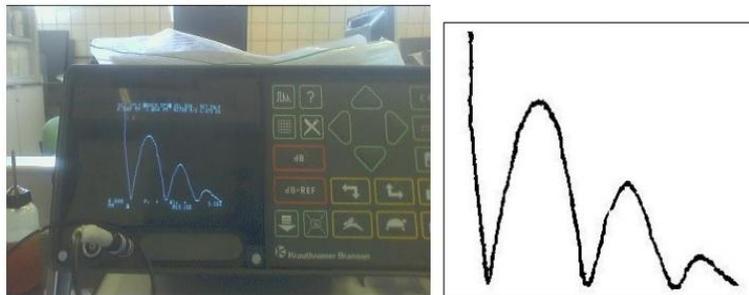


Figura 2-3. Fotografía (Izquierda) y procesado en ImageJ (Derecha)

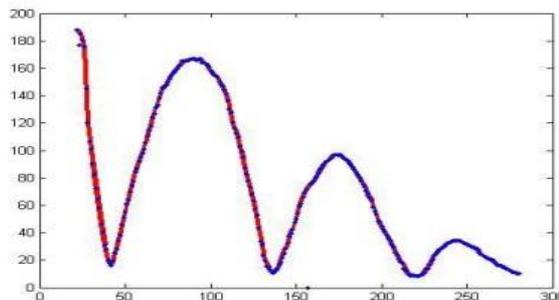


Figura 2-2. Interpolación de puntos en Matlab

Así pues, se pensó en la idea de emplear una webcam que tomase capturas de la pantalla del dispositivo mientras se realiza la exploración, de tal manera que se analizarían los picos de manera instantánea a medida que se desplazase el palpador por las placas.

Ventajas de la propuesta:

- Adquisición rápida e instantánea de las gráficas (El dispositivo por sí solo tarda unos 10 segundos en hacer auto-capturas de pantalla, mientras que así es instantáneo)

- Posibilidad de guardar cada resultado de cada punto de exploración en caso de que se detecte alguna anomalía.
- Código utilizable para futuros proyectos relacionados.
- Hace posible la automatización.

Limitaciones

- El dispositivo debe ser configurado a mano en ganancia y en display para cada tipo de placa (Todos los ensayos de un mismo tipo de placa, en cuanto a grosor y configuración, pueden ser realizados con los mismos parámetros)
- Propuesta relativamente agresiva.

Finalmente, dado que aún se trataban de fases iniciales del proyecto, se decidió descartar el uso del USD 10 junto con la propuesta, pues se intentaría adquirir material más moderno y versátil, que permitiera conexión y transferencia de datos con PC de manera directa, y así realizar un montaje de laboratorio versátil y profesional.

2.3 Material adquirido

2.3.1 Plotter 2D (Makeblock)

Tras diversas búsquedas por tiendas de robótica en Internet, se encontró un pack de dibujo plano robótico (Plotter 2D) de la marca Makeblock que consistía en una plataforma móvil que se desplaza por carriles perpendiculares gracias a la acción de dos motores paso a paso controlados por una placa basada en las placas ARDUINO. La función de fábrica de este plotter es dibujar en papel imágenes, con el empleo de un lápiz sujeto a un mecanismo movido por un servomotor, mediante órdenes de movimientos enviados a través de programas de la marca.

El pack contiene tanto las piezas de la estructura como toda la electrónica necesaria (Placa controladora, controladores de motor, dos motores paso a paso, un servomotor, interruptores de final de recorrido, cables, etc.)

Al poseer todas las características necesarias que se buscaban para la automatización, se procedió al pedido del pack.

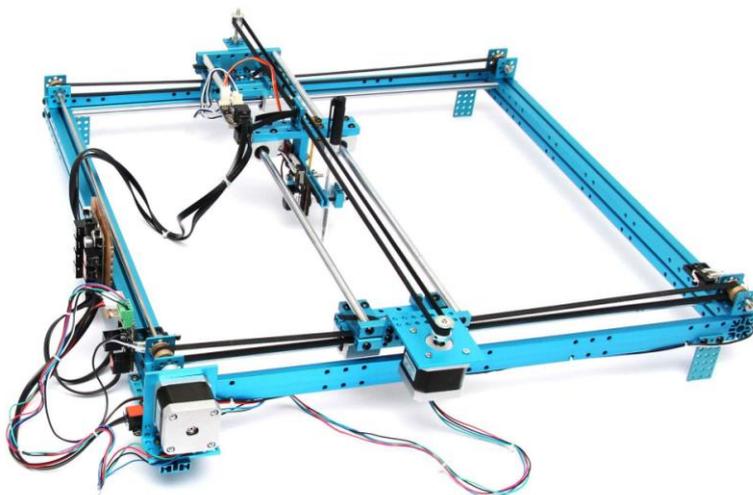


Figura 2-4. Imagen del Plotter 2D de Makeblock

2.3.2 EPOCH 1000i (Olympus)

Desde la empresa TEAMS se consiguió un equipo de ultrasonidos moderno de la marca Olympus, con paquete de software y tipo de conexión USB.

Entre todas las funciones que tiene, el EPOCH 1000i permite almacenar varios gigabytes de datos de exploración (Altura de ecos, espesores, alarmas de puertas, configuración de parámetros, etc.), y así mismo, admite volcar todos los datos a un PC en formato Excel, el cual puede ser leído desde Matlab.

El paquete de software adjunto, GageView Pro, es el estándar empleado por Olympus en todos sus dispositivos, y permite trabajar con el dispositivo desde el ordenador, tanto para control remoto, como para gestión de parámetros y de su base de datos interna.



Figura 2-5. Imagen del EPOCH 1000i

2.3.3 Plancha de fibra de carbono

Así mismo, se adquirió una plancha de fibra de carbono de fibras orientadas a 0°-45° de espesor medio 3.8 milímetros, de la cual se obtendrían las distintas probetas que se ensayarían en las últimas fases del proyecto.

2.4 Máquina de ensayo INSTRON 8801

Se trata de una máquina hidráulica de ensayo de fatiga de carga máxima 10 kN controlada desde un paquete de software instalado en un ordenador, el cual permite definir todo tipo de parámetros para realizar cualquier clase de ensayo de fatiga.

La máquina dispone de dos pistones, uno a cada lado de las mordazas, los cuales han servido de sujeción para el montaje experimental que se detallará más adelante.



Figura 2-6. Imagen de la máquina INSTRON 8801

3 MONTAJE Y PUESTA A PUNTO

«La mayoría de las personas gasta más tiempo y energías en hablar de los problemas que en afrontarlos».

- Henry Ford-

En este capítulo se describen los primeros pasos con el material adquirido, así como la descripción algo más detallada del mismo y las diferentes propuestas de montaje experimental.

3.1 Plotter

3.1.1 Primeras pruebas

El objetivo de la parte automática del montaje consistía en la exploración de las placas de manera vertical mientras estas eran ensayadas en la máquina de fatiga, es decir, una vez resuelto el control desde PC, se debía buscar una forma de “colgar” el plotter desde la máquina de fatiga.

Como ya se ha introducido previamente, el plotter es un robot de “ploteado” de imágenes en papel. Básicamente, se trata de una estructura de aluminio con carriles, que permite el desplazamiento de una plataforma, mediante motores paso a paso, que contiene un mecanismo movido por un servomotor para levantar y bajar un lápiz o bolígrafo.

Tanto los motores paso a paso como el servomotor son controlados por una serie de placas controladoras de motor gestionadas por una placa controladora tipo ARDUINO.

Así mismo, el plotter incluye interruptores de final de recorrido para proteger la mecánica de los motores en caso de colisión con los límites del cuadrado metálico.

La placa tipo ARDUINO que controla el robot admite modificación de su Firmware en función del modo de control que se desee, esto es, las órdenes que interpretará para gestionar el movimiento de los motores. Para el proyecto en cuestión, se le transfirió un Firmware de interpretación de G-Code (Uno de los pocos que acompaña al software de Benbox, desarrollador afín a Makeblock), mediante el cual, se puede controlar el movimiento del palpador empleando comandos de G-Code, muy empleados en máquinas CNC: Movimientos

absolutos o relativos, posibilidad de desplazarse en milímetros o pulgadas, cambios de velocidad, movimientos circulares, y un largo etcétera. Ésto, además de ofrecer muchas posibilidades, facilita la comprensión del control pues existen asignaturas en el Grado en las que se ha estudiado en mayor o menor medida el G-Code, o código CNC, con lo que ninguno de los lenguajes hasta ahora tratados es desconocido para posibles alumnos que aborden cualquier ampliación o modificación de este proyecto. Adicionalmente, se comprobó que el robot permite comunicación mediante objeto serial virtual desde Matlab, con lo que se podría enviar G-Code fácilmente de forma directa, así como implementar códigos de control. Algunos ejemplos del tipo de código que se utilizó, junto con su significado:

G90	Desplazamiento en coordenadas absolutas
G91	Desplazamiento en coordenadas relativas
G92	Definición de punto actual como origen de coordenadas
G00 X10 Y20	Desplazamiento rápido de 10 milímetros en sentido positivo del eje X y de 20 milímetros en sentido positivo del eje Y si se trabaja en coordenadas relativas o desplazamiento al punto (10,20) si se trabaja en coordenadas absolutas.
G03 X20 Y0 I10 J0	Desplazamiento circular en sentido contrario a las agujas del reloj (COMPROBAR) al punto (20,0) con centro de giro 10 milímetros en sentido positivo del eje X relativo al punto actual.

Con lo que se cubrieron gran parte de las necesidades de desplazamiento a la hora de explorar las placas.

Los primeros pasos con el robot fueron comprobar su correcto funcionamiento con el Firmware que se le transfirió. Desde el software de Benbox, se probó la función “de fábrica” del plotter, y se probó a dibujar imágenes predeterminadas del programa, así como enviar G-Code directo desde Benbox, obteniéndose resultados bastante buenos. Sin embargo, se encontraron algunos problemas en cuanto a la transferencia de comandos y al control del robot:

- El envío de grandes cantidades de comandos satura la placa controladora, y bloquea el movimiento del Plotter. Este hecho podría generar problemas a la hora de realizar las exploraciones, por lo que se debería incluir tiempos de espera (Pausas) entre comandos.
- El servomotor no respondió en ningún momento ante los comandos G-Code. Tras varios e-mails a Makeblock, y a la empresa desarrolladora del Firmware de Benbox, se concluyó que, o bien el servomotor estaba defectuoso, o bien había algún problema con el Firmware, y se debía esperar a futuras actualizaciones. Se probó desde el programa base de ARDUINO (Firmware de ARDUINO con lenguaje de programación desconocido), y su funcionamiento era correcto. Para no obstaculizar el desarrollo del proyecto, y continuar con el uso de un Firmware que admitiera del que se disponía, se decidió desmontar el servomotor junto con su mecanismo (Se detallarán los cambios en el montaje más adelante). No por ello el plotter dejaría de tener utilidad, pues se dejó más espacio para colocar algún tipo de sujeción para el palpador, y se redujo la complejidad, tanto de la mecánica de la plataforma, como la del código en sí, pues se elimina la coordenada ‘Z’.

Se implementaron distintos códigos de cálculo de coordenadas, así como interfaces GUIDE para realizar los ensayos de manera sencilla. Más adelante se explicará detalladamente el funcionamiento del software.

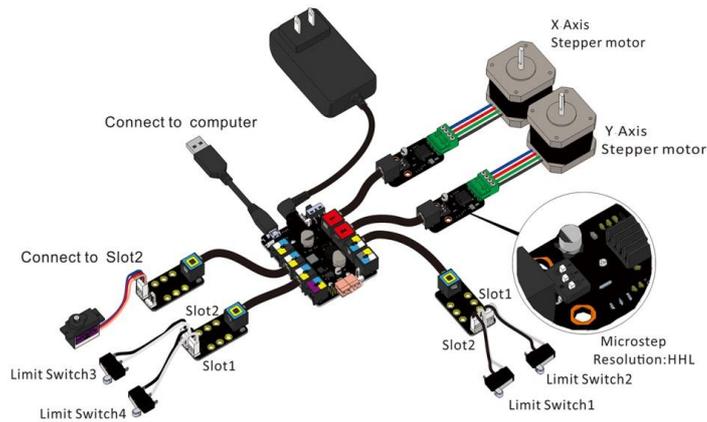


Figura 3-1. Esquema de la electrónica del plotter

3.1.2 Montaje

La disposición vertical del robot conllevó al reto de buscar una sujeción adecuada a la máquina de fatiga, teniendo en cuenta los posibles problemas que podrían darse, como el hecho de que el robot estaría expuesto durante largos periodos de tiempo a vibraciones producidas por los ensayos, así como buscar sujeciones lo suficientemente rígidas como para aguantar los casi 3 kg de peso del robot.

Se probaron dos tipos de montaje:

3.1.2.1 Montaje frontal

La primera idea consistió en realizar un montaje con 4 sujeciones a la máquina, dos en cada uno de los pistones. Cada sujeción consistía en un fijador de tuberías (Figura 3-2) empleados generalmente en fachadas o paredes de edificios. A cada sujeción se atornilló un segmento de barra roscada como el de la figura. Se incluyó una goma adhesiva interior a los fijadores para proteger los pistones de posibles daños, así como proveer a la estructura del robot de un amortiguador de vibraciones.

Se emplearon dos barras de aluminio de sección en “U”, con taladros convenientemente realizados para atornillar la barra al robot, así como fijar el robot a las sujeciones antes citadas a través de las barras roscadas.



Figura 3-2. Sujeciones del montaje frontal

Ventajas de este montaje:

- Se trata de una solución válida para el objetivo del proyecto.
- El tipo de sujeción elegido protege tanto a los pistones de cualquier tipo de daño por presión o roce, como al plotter por incluir un amortiguador de vibraciones.
- Las varillas roscadas permiten ajustar la inclinación del plotter respecto al plano de la placa, permitiendo así conseguir la máxima perpendicularidad palpador-placa.
- El montaje frontal permite observar fácilmente el movimiento plano del robot, y detectar rápidamente errores de desplazamiento.

Desventajas:

- Montaje relativamente complicado (Al menos dos personas para ello)
- Las barras en “U” mostraban ligera flexión en los extremos cercano a la unión con las sujeciones
- Las sujeciones parecían no ser suficientemente recias, y el peso del plotter flexionaba ligeramente la estructura. (Figura 3-4).
- Los cabezales de la 8801 podían girarse, según se reflejaba en el manual, pero tal y como indicó el técnico de laboratorio, el giro de los cabezales conllevaba a una pérdida de calibración de éstos, lo que daría lugar a un tedioso proceso de calibración que podría ser perfectamente evitable con un montaje lateral que hiciera innecesario tornar los cabezales.



Figura 3-3. Vista frontal del montaje frontal

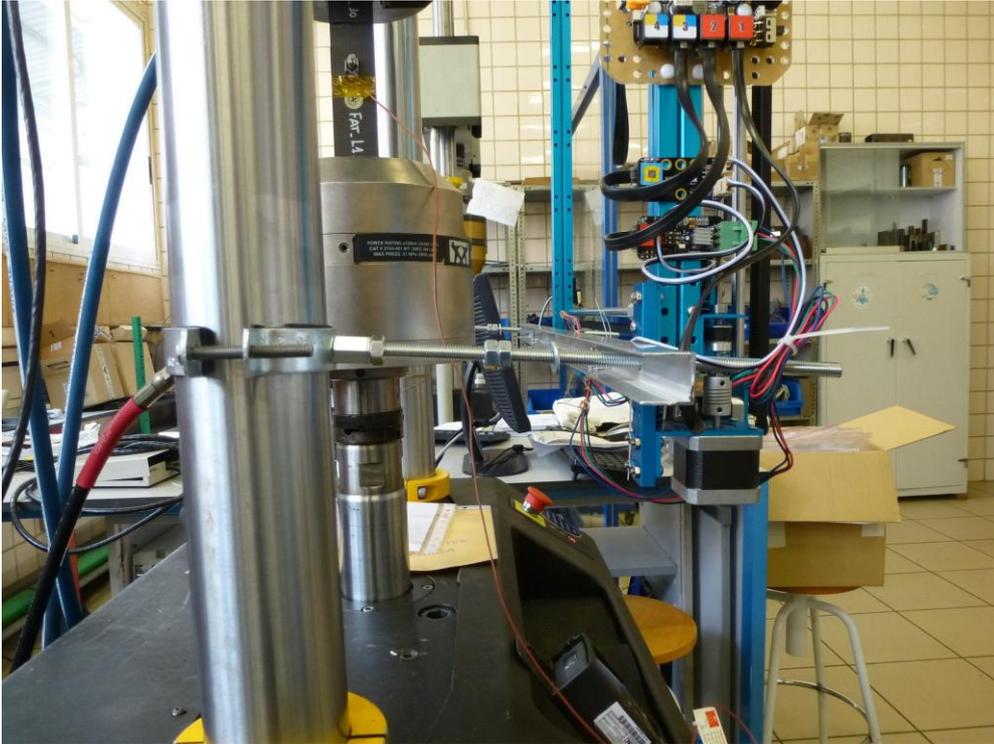


Figura 3-4. Detalle de la flexión de las sujeciones

3.1.2.2 Montaje lateral interior

Dada la cantidad de problemas encontrados en el primer montaje, se optó por buscar nuevas sujeciones para el robot, de tal manera que se consiguiera un montaje lateral en uno de los pistones.



Figura 3-5. Fotografía del montaje lateral interior

Se realizaron pequeños cambios al montaje previo:

- Se sustituyeron las barras de aluminio de sección en “U” por otras similares de sección cuadrada (Cerrada) y de menos longitud (Dado que en este montaje, la sujeción sería en la zona central), las cuales responderían con mayor estabilidad para formar parte de la estructura de sujeción.
- Se disponía en el laboratorio de dos mordazas de aluminio (Figura 3-5) propias de la 8801, a la cual se le realizaron dos taladros con rosca, para atornillar las barras de aluminio.



Figura 3-6. Pinzas de sujeción para el montaje lateral interior

Ventajas:

- Montaje mucho más sencillo
- Perpendicularidad palpador-placa dependiente del giro del montaje respecto del pistón, y no de 4 puntos de atornillado.
- Sujeción mucho más rígida. Desaparecen los problemas de flexión.
- Se evita la pérdida de calibración por giro de cabezales.

Desventajas:

- Robot expuesto a vibraciones al tratarse de una estructura muy rígida fijada a uno de los pistones sin ningún tipo de amortiguación.
- Detección de fallos de desplazamiento no tan sencilla.
- Perpendicularidad sujeta a precisión de los taladros

La decisión final fue dar por válido el montaje lateral, pues, como ya se ha comprobado, soluciona gran parte de los problemas que se daban con el montaje frontal, y posee unas desventajas no críticas para el desarrollo correcto de los ensayos.

3.1.2.3 Palpador

Respecto al montaje del palpador, la idea principal consistía en montar el palpador en la plataforma móvil para desplazarlo por las placas a voluntad. Se probaron distintas sujeciones para el palpador:

- Pequeña varilla hueca de plástico cortada convenientemente por uno de sus extremos para fijar el palpador. La sujeción a la plataforma se probó en un principio con pequeñas piezas de aluminio sobrantes del plotter (Repuestos), a través de las cuales se hizo pasar la varillas. Para ejercer cierta presión y asegurar contacto aceptable entre placa y palpador, se colocó una desde el extremo opuesto de la varilla hasta la plataforma. Los resultados no fueron del todo aceptables, pues no se conseguía perpendicularidad entre la varilla-palpador y la placa, se producía flexión en algunos cambios de dirección, e incluso se producían rebotes del palpador.
- Se buscaron dos tubos de aluminio huecos, uno de ellos de un diámetro algo menor, de tal manera que éste deslizaba dentro del otro. Se fijó la varilla de plástico dentro del tubo pasante (Pues la varilla sujetaba el palpador en su extremo bastante bien), de tal manera que se consiguió un mecanismo de extracción retracción (Figuras 3-7 y 3-8). Aprovechando la idea original de Makeblock, se le fijó un par de placas atornilladas cerca del extremo del palpador para colocar una gomilla que presionara el mecanismo hacia la placa, así como un par más de compensación para no aplicar una presión excesiva (Figuras 3-11 y -12). El mecanismo se fijó a la plataforma mediante bridas, aprovechando una placa de aluminio (Parte de la estructura de la plataforma) dispuesta de forma perpendicular a donde estaría colocada la placa. Los resultados fueron muy buenos, y se eliminaron los problemas de rebote y flexión.



Figura 3-7. Mecanismo retraído



Figura 3-8. Mecanismo extraído



Figura 3-9. Detalle de la sujeción del palpador 1



Figura 3-10. Detalle de la sujeción del palpador 2

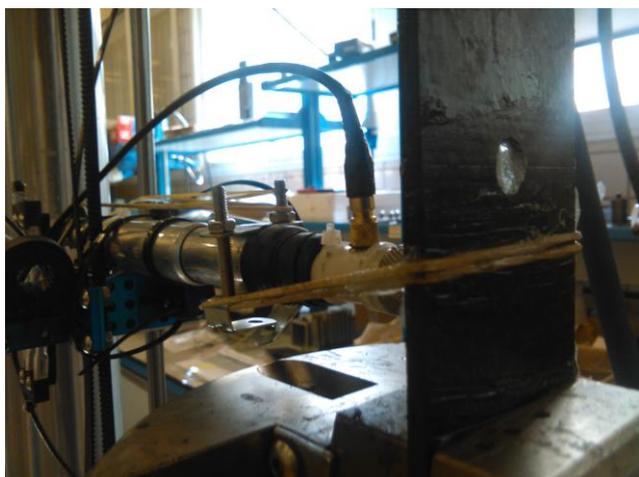


Figura 3-12. Detalle de gomillas de presión



Figura 3-11. Detalle de gomillas de compensación

3.2 EPOCH 1000i

El uso principal que se le dio al EPOCH 1000i fue, una vez configurados todos los parámetros de exploración para la placa en cuestión, fue el de almacenamiento de los datos de señales de eco de cada punto de exploración. El uso de las puertas (Rangos de señal recibida donde se realiza alguna medición) ha sido la base sobre la que se ha trabajado para realizar la adquisición de los datos de interés de la señal recibida. En este sentido, el dispositivo permite fijar qué parámetros son de interés para el operador, así como fijarlos en el registro de datos para que se almacenen y puedan ser recuperados más adelante.

Entre otras variables, permite guardar:

- Nivel de Eco en puerta 1 (%)
- Nivel de Eco en puerta 2 (%)
- Profundidad en eco de puerta 1 (mm)
- Profundidad en eco de puerta 2 (mm)
- Parámetros de configuración
- Imagen de la señal de ecos
- Etc

Con las 4 primeras se podía jugar para barrer todo el espesor de la placa en busca de imperfecciones, y así, por ejemplo, colocar una puerta en el eco de fondo para medir su atenuación, y otra a lo largo de todo el espesor para detectar nuevos picos que se traducen en posibles delaminaciones o defectos en general.

El palpador es de tipo emisor/receptor, con un delay de metacrilato.

3.2.1 Software y conectividad

El paquete de software adjunto, **GageView Pro**, consiste en un gestor de dispositivos de la marca Olympus, admitiendo numerosas funcionalidades tanto en control de dispositivos como en administración de bases de datos, con posibilidad de volcado de datos de puntos de exploración a formato Excel.

El programa incluye una sección de control remoto, tanto en envío de comandos como en manejo directo del teclado físico del EPOCH 1000i (Existe una función en la que se muestra por pantalla el teclado del dispositivo), con lo que el dispositivo es completamente controlable desde un ordenador, función interesante dado el objetivo de automatización que se tenía para este proyecto.

El EPOCH 1000i posee una salida para conexión USB con un PC. La conexión con el software de Olympus es exitosa, y permite acceder a todas sus funcionalidades: Control remoto, base de datos, configuración, etc. Además, existe un manual de comandos para manejar el EPOCH 1000i mediante protocolo Serial o USB, por lo que en principio el dispositivo cumple con los requerimientos.

Matlab posee diversas extensiones para comunicarse por USB con dispositivos de medida, tales como "Instrument Control Toolbox™", con la particularidad de que solo trabaja con ciertas marcas de instrumentos, entre las cuales desgraciadamente no se encuentra Olympus. Se probó a establecer comunicación, al igual que con el plotter, entre el EPOCH 1000i y Matlab mediante creación de objetos seriales en puertos predeterminados del ordenador, pero desafortunadamente la conexión EPOCH 1000i no genera un puerto de comunicación tipo serial.

Se probaron distintas opciones para conseguir conexión con Matlab:

- Generación de un puerto serial virtual con distintos programas encontrados en la red. No hubo éxito: O bien no se detectaba puerto alguno, o bien el ordenador sufría un fallo crítico, y reiniciaba (Pantallazo azul)
- Prueba de un cable de conversión serial-USB para intentar emplear el puerto serial real del ordenador. El resultado no fue exitoso (El PC no reconocía el dispositivo)
- Prueba de los dos puntos anteriores en distintos ordenadores con el mismo resultado

Finalmente, con el fin de avanzar con el proyecto, se decidió buscar soluciones alternativas aprovechando el software de Olympus que ya se ha analizado. La idea se centró en enviar una orden a GageView de "Guardado de datos" de cada punto de exploración cada vez que se le indicase desde Matlab.

Tras cierto tiempo de reflexión, y aprovechando que GageView ofrece la posibilidad de manejar el teclado virtual del EPOCH 1000i, se decidió probar una "macro" de control de ratón y teclado para Windows.

Hay cientos de programas grabadores de Macros en internet, pero el que ha mostrado mejores resultados es Jit Bit Macro Recorder.

Jit Bit Macro Recorder es un programa grabador de Macros que admite programación de alto nivel con comandos de Windows (Movimientos de ratón, clicks, escritura de texto, apertura o cierre de ventanas, y un largo etcétera). Entre muchas de sus posibilidades, existe la opción de crear un archivo ejecutable (.exe) de tal manera que al abrirlo, se ejecute una determinada acción o conjunto de acciones. Este tipo de archivos es perfectamente ejecutable desde Matlab, pues existen comandos como “system()” que permiten realizar llamadas a archivos ajenos a la interfaz operativa de Matlab.

La idea del uso de la macro consistiría en enviar la orden de guardado a “GageView” cada vez que se indicara desde Matlab. Lo único que realizaría el programa sería la acción de “hacer click” sobre el botón “SAVE” del teclado virtual cada vez que se ejecutase el archivo que generase al programar dicha acción.

Ventajas:

- Se soluciona el proceso automático
- Funcionamiento correcto y rápido

Desventajas:

- No ofrece control total del sistema desde MatLab
- Se inutiliza el ratón durante la exploración

Al ser la única solución que parecía funcionar, y dado que se debía avanzar con el proyecto, se optó por emplear esta herramienta a pesar de que, en futuros proyectos con este sistema de inspección, deba solucionarse la comunicación entre MatLab y el EPOCH 1000i de manera directa.

Con este último avance, el esquema de funcionamiento del sistema de exploración es el siguiente:

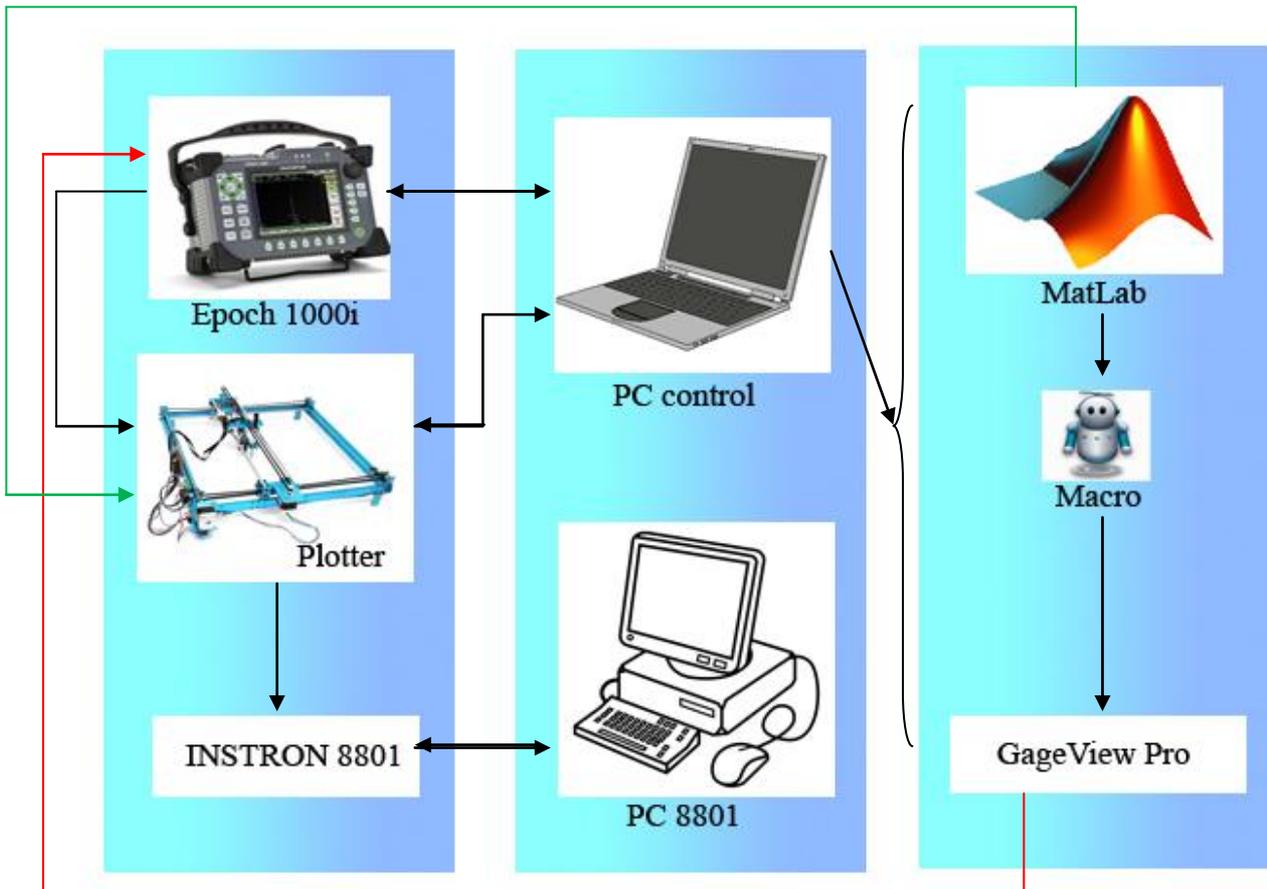


Figura 3-13. Esquema de funcionamiento del sistema

3.3 Placas de fibra de carbono

Dada la geometría de las mordazas de la máquina de fatiga 8801, ésta solo permitía sujetar placas de una anchura máxima de 50 mm. En un principio se decidió realizar la exploración de placas rectangulares, pero al consumirse mucha tiempo concentrando la carga de trabajo en el montaje y preparación de los dispositivos, se decidió fatigar placas con un orificio central, de tal manera que la sección neta mínima se vería reducida, con lo que las tensiones serían mayores en puntos cercanos al orificio, y se podrían conseguir resultados en los ensayos a fatiga más rápidamente. Dado que se necesitaría espacio suficiente para explorar las placas con el robot, se decidió cortar probetas con las siguientes geometrías:

- Anchura: 50 mm
- Altura: 200 mm
- Diámetro del orificio: 10 mm

Con lo que quedaría un espacio de aproximadamente 10 cm para explorar la placa con el robot.

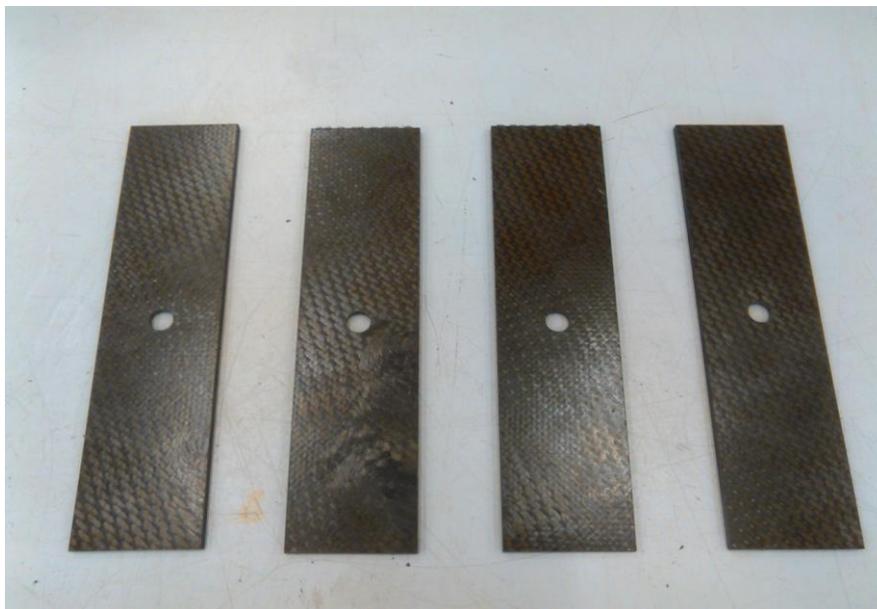


Figura 3-14. Probetas

4 CÓDIGO DESARROLLADO

*"El ordenador nació para resolver problemas
que antes no existían."
- Bill Gates -*

Tras haber expuesto todo el montaje experimental, se va a describir en este capítulo todo el software de control desarrollado para llevar a cabo las distintas inspecciones durante los ensayos.

Como ya se ha introducido en capítulos anteriores, se ha desarrollado un código desde Matlab para controlar todo el proceso de exploración de las placas.

En un principio, se desarrollaron pequeños códigos de creación de coordenadas en función de datos de entrada como geometría de la placa, dimensiones del palpador, márgenes, etc. El plotter responde, como ya se ha citado, ante comandos de G-Code, por lo que fue necesario añadir un conversor de coordenadas numéricas a comandos G-Code. Algunos ejemplo de conversión y empleo de órdenes G-Code en variables matlab:

[20 40]	comando=['G00 X20 Y40']
[50 0]	comando=['G00 X50']
Definir origen de coordenadas	comando=['G92']

El uso de las comillas en la segunda columna significa que lo que hay dentro de los corchetes son caracteres de texto ('Strings' tal y como se denomina en Matlab), y son estos caracteres los que se pueden enviar perfectamente por comunicación serial al robot.

La conversión de número a string se realiza fácilmente. Un ejemplo de código sería el siguiente:

```
coordenada=[20 50]
```

```
comando=['X',num2str(coordenada(1)), ' Y',num2str(coordenada(2))];
```

```
Resultado: comando=['X20 Y50']
```

En la primera fila se ha definido un vector fila, siendo la primera coordenada en el eje X, y la segunda en el eje Y.

En la segunda fila se define una variable con strings en lugar de números. La función num2str() convierte el número al que se le aplique en caracteres (Strings).

Cabe decir que, dada la orientación de los ejes del firmware del plotter respecto la placa en el montaje lateral interior (Si vemos el plotter en horizontal, la placa estaría encima del mismo), se realiza la siguiente transformación sencilla de coordenadas:

$$x_{calculada} = -y_{real}$$

$$y_{calculada} = -x_{real}$$

Con lo que, para representar puntos en Matlab, se emplean las coordenadas calculadas, mientras que para darle las órdenes al plotter se emplean las reales, de tal manera que el movimiento que se observa en la realidad relativo a la placa es igual al de las representaciones.

La comunicación con el robot es sencilla:

- Se crea un objeto serial en el puerto correspondiente:
`plotter=serial('COM7')`
 - Se abre el puerto:
`fopen(plotter)`
 - Se envía el comando:
`fprintf(plotter,comando)`
- o bien
- `fprintf(plotter,'X20 Y-5')` (Envío de string directo)
- Se cierra el puerto (Si es necesario):
`fclose(plotter)`

Si no se cierra el puerto, se pueden enviar comandos cuantas veces se desee, teniendo en cuenta la restricción de tiempo de interpretación de la placa controladora (Puede saturarse como ya se ha dicho).

Con estas premisas, se procedió a ampliar el código, y a probar la respuesta del plotter ante comandos programados en código, con lo que se pudieron realizar diferentes rutas de exploración que se explicarán en el siguiente apartado.

4.1 Interacción Matlab-GageView

Como ya se ha indicado en el capítulo anterior, la orden de guardado se lleva a cabo llamando a un archivo ejecutable “.exe” que realiza la función de guardado haciendo un “click” programado en la macro sobre el botón “SAVE” del teclado virtual del EPOCH 1000i en el programa GageView.

Este archivo ejecutable debe ser modificado para cada PC, pues JitBit Macro Recorder sigue coordenadas relativas a la resolución de pantalla. Dicha modificación se puede realizar de una manera muy sencilla y se explica en el Anexo adjunto.

4.2 Interfaz GUIDE

Antes de exponer los distintos programas de exploración desarrollados, es importante introducir el que ha sido una de las decisiones más importantes en cuanto a la orientación del desarrollo del software para el control del sistema.

GUIDE es una extensión de Matlab que permite crear interfaces gráficas sencillas para manipular código implementado de una manera más rápida y visual. En este sentido, GUIDE permite crear menús de control con botones, formularios y gráficas, de tal manera que todo el código de definición de parámetros (Geometría, número de puntos de exploración, etc.), cálculo de coordenadas, rutas de exploración, representación de resultados, cómputo de defectos, entre otros, puede ser manipulado desde un solo menú interactivo.

La justificación de emplear esta herramienta radica en uno de los objetivos fundamentales del proyecto: Ofrecer a aquella persona que manipule este montaje todas las facilidades posibles para quitar carga de trabajo de exploración, pudiendo centrar el estudio en caracterizar el material o pieza a ensayar.

Previamente a crear los distintos menús, se probó la funcionalidad del plotter junto con la idea de emplear interfaces gráficas. El resultado fue exitoso, aunque se debían tener en cuenta diversas cosas:

- Abrir más de una vez el puerto de comunicación (Ejecutar dos veces la función `fopen()`) daba lugar a un conflicto en Matlab y bloqueaba el puerto, de manera que para volver a ponerlo en marcha era necesario reiniciar el programa. Como contramedida, se incluyeron avisos en el programa para evitar este error.

- Fue necesario crear códigos ejecutores para cambiar entre menús, esto es, para pasar de un menú a otro, se pulsa un botón para abrir un código cuyas órdenes son:
 - o Cerrar menú actual
 - o Abrir menú siguiente

Por lo demás, el funcionamiento era totalmente correcto, y se procedió al desarrollo de los distintos programas atendiendo a la tipología de placa a ensayar (Con y sin orificio), pues cada una implicaba definición de rutas (Y de coordenadas) distintas.¹

4.3 Programas implementados

4.3.1 Programa zig-zag

Uno de las primeras ideas del proyecto consistía en explorar placas sin orificios con recorrido del palpador en Zig-Zag, barriendo gran parte de la superficie de la placa en busca de defectos (Porosidades, delaminaciones, etc.). Las mediciones de interés en el EPOCH 1000i son:

- Ganancia de eco de fondo (Puerta 1 cubriendo eco de fondo)
- Ganancia de ecos intermedios (Puerta 2 cubriendo todo el espesor)

De tal manera que se cubre todo el espesor de la placa en busca de defectos.

El cálculo de coordenadas es sencillo, se pide como datos de entrada la geometría de la placa (Ancho y alto), número de puntos de exploración en dirección X y en dirección Y, y los márgenes superior, inferior, izquierdo y derecho, de tal manera que quedaba definido un rectángulo de puntos en torno al centro de la placa.

Sin entrar mucho en detalle (Código adjunto en el anexo), el cómputo de coordenadas se realiza mediante la función “inspace”, que define un vector de ‘n’ componentes equiespaciadas entre dos puntos definidos. Mientras se calcula la matriz de ‘n’ coordenadas (Cada fila corresponde a un punto de exploración), se establece el orden entre ellos de manera que el camino se realiza en Zig-Zag.

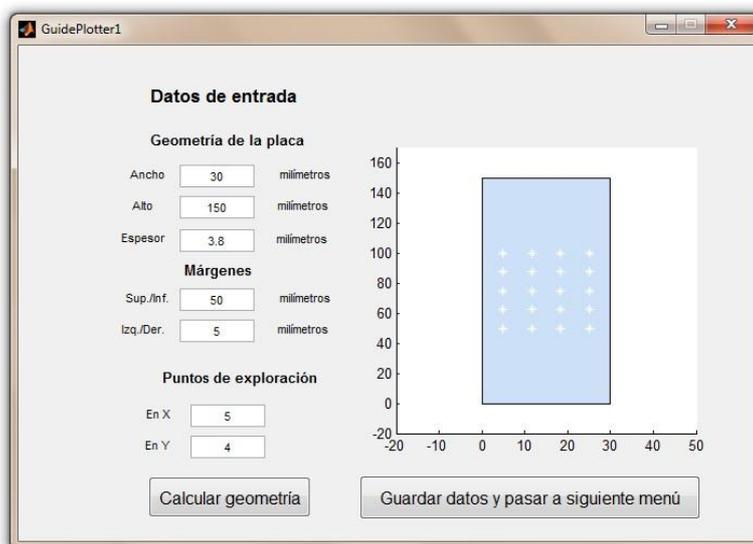


Figura 4-1. Interfaz Zig-Zag 1

En la Figura 4-1 se puede ver el programa de definición de geometría y coordenadas, junto con una representación gráfica del cómputo de puntos de exploración a escala real, el cual es de gran ayuda para comprobar que se ha definido la ruta de exploración tal y como se desea.

¹ Todo esto está desarrollado en el anexo

El siguiente menú se emplea para definir el objeto serial 'plotter' y abrir el puerto de comunicaciones. Así mismo, se ha incluido un cuadro de mandos para llevar el plotter al primer punto de exploración (Representado en la figura) para definirlo como origen de coordenadas, ya que el programa parte de ese punto para calcular todas las coordenadas de la ruta de exploración. Además, se puede volver a este menú para redefinir el origen de coordenadas en caso de que se haya producido algún tipo de desplazamiento involuntario de la plataforma que haya podido alterar el posicionamiento del palpador. Igualmente, se han incluido dos botones de desplazamiento en centímetros o en milímetros para el posicionamiento del origen de coordenadas para realizarlo con la mayor facilidad y precisión posible.

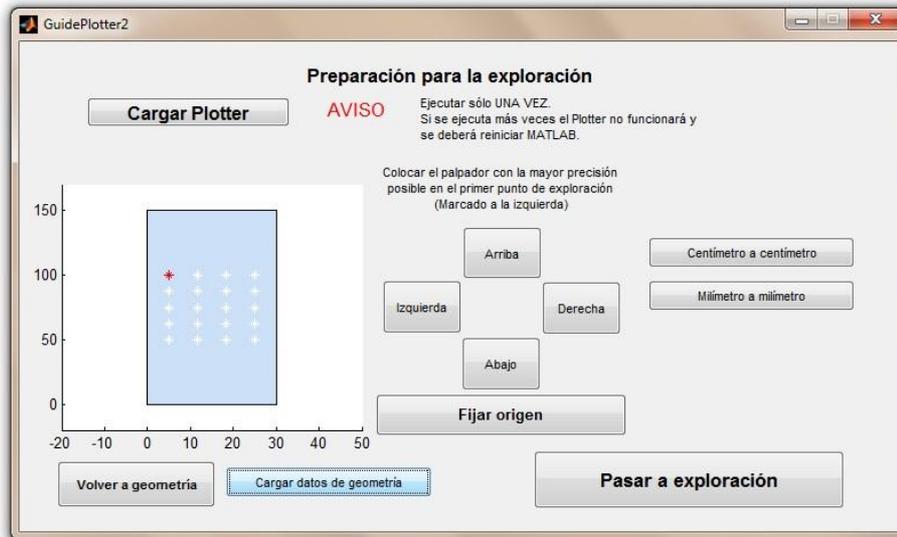


Figura 4-2. Interfaz Zig-Zag 2

En el tercer menú se incluye el botón de exploración, el cuál ejecuta el programa de exploración definido en los menús anteriores. El programa de ruta convierte las coordenadas calculadas en strings de G-Code, las cuales son enviadas siguiendo un bucle hasta que llega al último punto.

Mientras se realiza la exploración, se va indicando en pantalla:

- Número de puntos explorados.
- Número de puntos restantes.
- Coordenada actual (Relativa al origen definido)
- Aviso de "Exploración finalizada" al terminar.

Así mismo, se ha adjuntado un cuadro de representación donde se va marcando los puntos que van siendo inspeccionados en tiempo real, por lo que el control de la exploración es total.

Cabe mencionar que en el propio código de exploración, se ha incluido una orden de ejecución de "Macro" al pasar por cada punto, que simplemente ejecuta el archivo "Macro.exe" que realiza la operación de guardado en GageView.

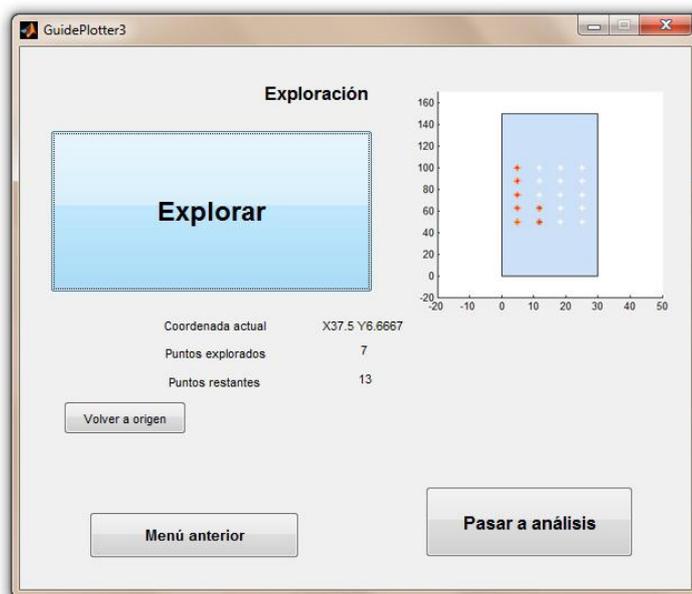


Figura 4-3. Interfaz Zig-Zag 3

Una vez terminada la exploración, es necesario volcar manualmente los datos guardados en el EPOCH 1000i a través de GageView en una hoja Excel. Una vez movida dicha hoja de cálculo a la misma carpeta donde se encuentra el código, el programa obtiene los datos automáticamente y refleja en una gráfica los resultados atendiendo a una serie de criterios de atenuación incluidos en el código: Tolerancias máximas de disminución de señal del eco de fondo, y comparativa con aparición de picos intermedios detectados en la puerta 2 (Que como ya se ha dicho, cubre todo el espesor), los cuales son perfectamente modificables. El programa define, según los resultados:

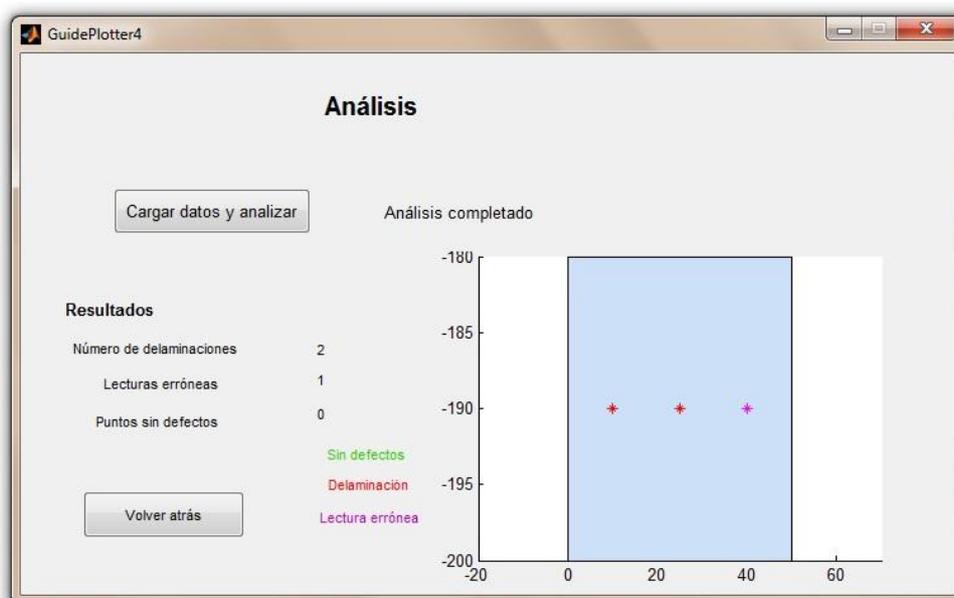


Figura 4-4. Interfaz Zig-Zag 4²

² La placa representada y su configuración no se corresponde con la de los menús anteriores

- Punto sin defectos (Variación del eco de fondo dentro de un rango definido)
- Punto con defecto (Eco de fondo disminuye notablemente, y aparece algún pico en el espesor)
- Punto con medición errónea (Eco de fondo desaparece y no aparece ningún pico intermedio)

Todas las variables son guardadas en archivos Matlab en la misma carpeta desde la que se ejecuta el código, por lo que todos los valores pueden ser recuperados para otros análisis fuera de la interfaz GUIDE.

4.3.2 Programa circunferencial

El programa circunferencial se desarrolló específicamente para las placas con orificio central. Dado que no se disponía de un mecanismo para levantar el palpador, se debía desarrollar una ruta de exploración que inspeccionara la placa sin dejar “caer” el palpador en el agujero central.

Una de las primeras ideas fue desarrollar algún tipo de algoritmo que aprovechara el programa de cálculo de coordenadas de barrido en Zig-Zag, pero con rutas centrales alternativas para “esquivar” el orificio. Sin embargo, y dado que la implementación de ese código no sería tarea sencilla, se estudió el empleo de rutas circulares en torno al orificio central, de tal manera que se establecerían los puntos de exploración en ángulo y en radio respecto al centro del agujero.

El Firmware G-Code transferido reconoce también las órdenes G02 y G03, las cuales sirven para definir arcos de circunferencia entre dos puntos en sentido positivo o negativo, por lo que el movimiento circular respecto al orificio parecía posible.

Como ya se ha introducido, la única particularidad que tiene este programa es que se emplearon coordenadas polares para su definición, siendo transformadas posteriormente a órdenes de movimiento circular en G-Code. Las coordenadas se definen en este código de una manera parecida al programa en Zig-Zag, solo que se emplean variables polares:

DATOS DE ENTRADA

- Ancho de la placa
- Alto de la placa
- Espesor de la placa
- Diámetro del agujero
- Número de sectores en cada radio
- Número de radios
- Separación entre radios

De tal manera que el programa realiza una división mediante la función “inspace” en ángulo y en radio. Además, para no dejar sectores vacíos (Pues así solo se definen haces de rectas en torno al centro del orificio, tal y como se refleja en la Figura 4-5), se introdujo un desfase angular (La mitad del incremento entre dos ángulos consecutivos) entre radios consecutivos, de tal manera que se cubría gran parte del área adyacente al orificio.

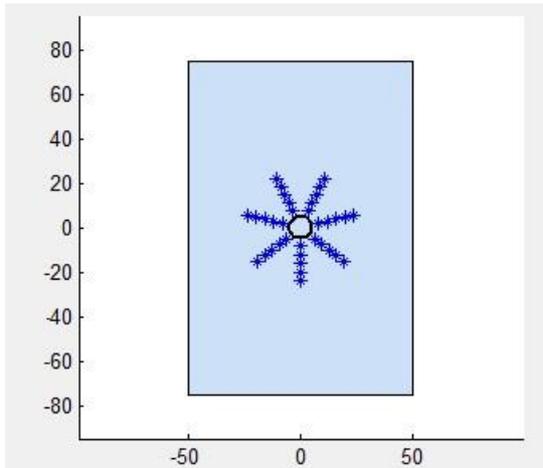


Figura 4-6. Puntos de exploración sin desfase angular

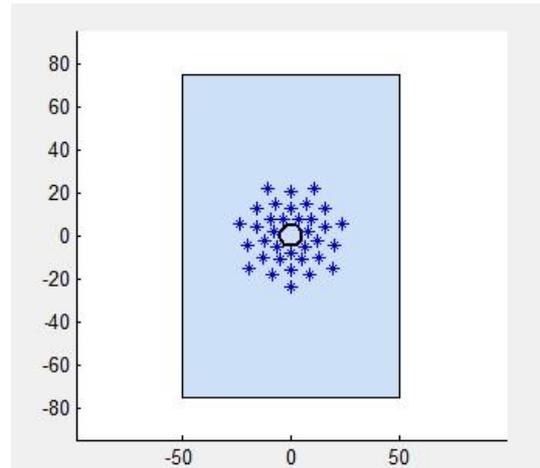


Figura 4-5. Puntos de exploración con desfase angular

En el primer programa se incluyen los formularios de introducción de datos de entrada, incluyendo la función de cómputo y guardado de datos. Al pulsar este botón, aparece la placa definida junto con los puntos de exploración en una gráfica a escala. Así mismo, se realiza el cómputo de la sección neta, y del número de puntos de exploración definidos. Por último, mencionar que se ha añadido una protección para el cálculo de coordenadas, de tal manera que si algún punto cae fuera de la placa (Con cierto margen de seguridad respecto a los bordes) el programa no calcula los puntos y se muestra un aviso indicando que hay puntos fuera de la placa.

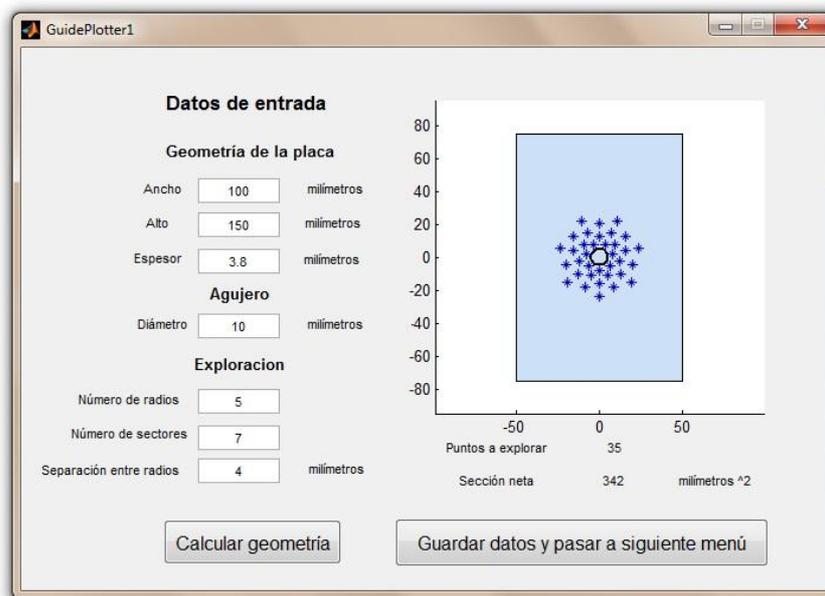


Figura 4-7. Interfaz Circunferencial 1

El siguiente menú (Figura 4-8) es igual al segundo menú del programa zig-zag, con la particularidad de que se pide colocar el palpador sobre el “primer punto de exploración” que no coincide con el origen de coordenadas, pues este es el centro del orificio. Al pulsar el botón “Fijar origen”, el plotter se desplaza al centro del agujero, fija el origen, y posteriormente vuelve al primer punto de exploración para completar la puesta a punto, por lo que para realizar esta operación no se debe presionar el palpador contra la placa, pues este quedaría atrapado en el orificio.

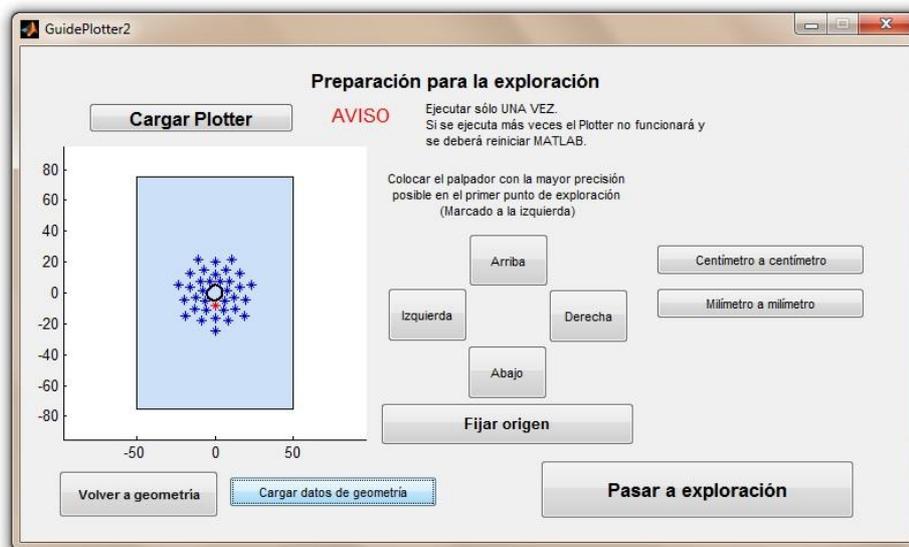


Figura 4-8. Interfaz Circunferencial 2

El tercer programa es imilar al caso zig-zag. Mientras se realiza la exploración, se va indicando en pantalla:

- Número de puntos explorados.
- Número de puntos restantes.
- Coordenada actual (Relativa al origen definido)
- Aviso de “Exploración finalizada” al terminar.

Para el caso circunferencial no se ha creado una interfaz de análisis, pues dado que se empleó este tipo de ruta para realizar un seguimiento de la atenuación del eco de fondo a lo largo de un ensayo de fatiga, se optó por tratar los datos de manera directa, y no a través de una interfaz GUIDE.

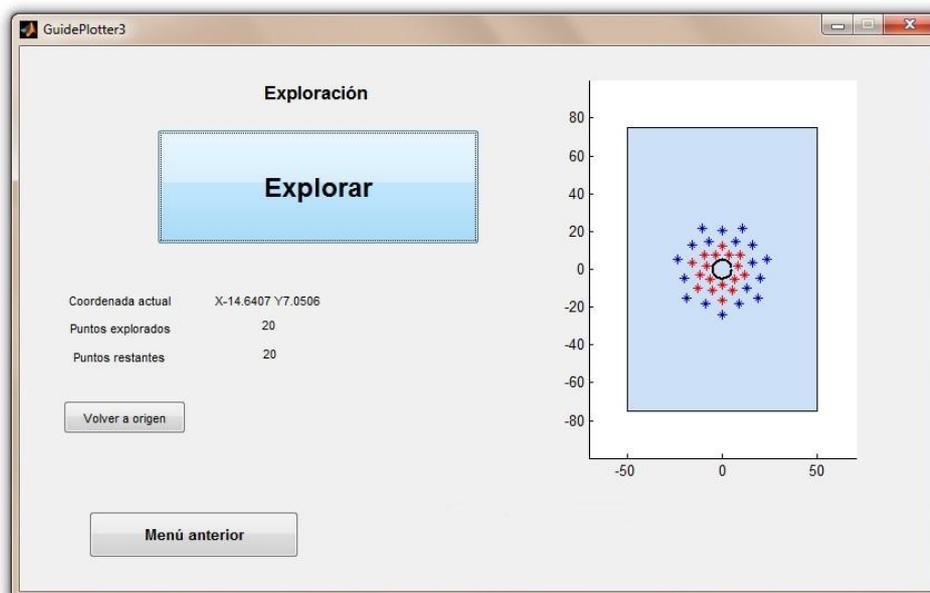


Figura 4-9. Interfaz Circunferencial 3

5 ENSAYOS

*«Los hechos pueden destruir nuestros raciocinios
pero no viceversa».*
- Alessandro Volta -

Una vez realizado el montaje, la implementación de los distintos programas, y la configuración del dispositivo de inspección, se procedió a realizar los diversos ensayos de las placas de fibra de carbono con orificio central, midiéndose la atenuación del eco de fondo de puntos adyacentes al orificio, de tal manera que se pudieron elaborar mapas de daño progresivo a medida que se aumentaban los ciclos de carga.

5.1 Tracción

Se llevó a cabo un ensayo de tracción con una de las placas con el fin de conocer el valor aproximado de la carga de rotura de todas las probetas, para así poder definir los intervalos de carga de los ensayos de fatiga. Se incluye una fotografía de la probeta después del ensayo de tracción.

Carga máxima: **67502.61 N**



Figura 5-1. Probeta ensayada a tracción

5.2 Fatiga

5.2.1 Metodología

Una vez realizado el montaje del plotter sobre el pistón izquierdo de la máquina de fatiga, se conectan todos los dispositivos al PC y a la red eléctrica, se conecta el palpador al detector, y se configura el programa de fatiga en la computadora de la máquina de ensayos.

Las placas deben sujetarse con mordazas planas estriadas o ásperas para evitar que se deslice la probeta al aplicar las cargas. Se puede emplear papel de lija para contribuir a la sujeción de las mismas, pero en principio no es recomendable ya que puede crearse una película arenosa entre las mordazas y la probeta que puede provocar deslizamiento. Así mismo, se debe fijar la presión hidráulica de la máquina convenientemente, ya que en los primeros ensayos se vio necesario incrementarla al producirse resbalamiento de las probetas.



Figura 5-2. Indicación del manómetro durante los ensayos

Cada vez que se realice una toma de datos, los pasos a seguir son los siguientes:

- Aplicar acoplante tanto en zona de exploración como en palpador³
- Colocar gomilla para presionar palpador contra probeta⁴
- Iniciar exploración en Guide
- Retirar palpador

Después de introducir los datos de geometría y exploración en GUIDE, debe realizarse con cuidado el proceso de definición de origen de coordenadas. Es aconsejable comprobar cada cierto tiempo que el origen de coordenadas no se ha desplazado, pues en tal caso el palpador puede atorarse en el orificio y dañar los motores paso a paso.

La toma de datos se realiza cada cierto número de ciclos, el cual depende, como ya se ha dicho, del ensayo que se realice. Sin embargo, debe ser común con cada espécimen medir la señal de eco de fondo con la placa sin fatigar para tomar esta medición como referencia y así cuantificar posteriormente la atenuación relativa al valor inicial en cada punto. La razón de tomar la referencia en cada punto radica en que el palpador no es perfectamente perpendicular a la probeta, y su inclinación dependerá de imperfecciones superficiales en cada punto, de esfuerzos de flexión (Según el movimiento en cada punto), y de la presión que se realice contra la probeta. Con esto, se introduce una de las hipótesis experimentales que se han tenido en cuenta: El contacto entre el palpador y la placa se supone distinto en cada punto, pero cada punto mantiene (Aproximadamente) la condición de contacto inicial, por lo que en teoría, la medición de la atenuación del eco de fondo sería aceptable. Obviamente, este comentario no deja de ser una hipótesis, y como ya se verá más adelante, en algunos puntos la condición de contacto cambia⁵, y puede producirse un aumento del eco de fondo medido entre una inspección y la siguiente. Estos resultados, aunque erróneos, pueden suavizarse si se realizan el

³ Se recomienda aplicar acoplante de manera generosa para evitar que se realicen mediciones erróneas.

⁴ Se debe aplicar una presión adecuada. Demasiada presión provoca rebotes del palpador y escape de acoplante en el espacio existente entre el palpador y la superficie de la probeta. Una presión insuficiente atenúa la señal recibida y da lugar a mediciones erróneas. Se recomienda emplear gomillas de diferente rigidez.

⁵ Debido a las vibraciones, a la distinta cantidad de acoplante en cada inspección, desplazamiento del origen de coordenadas, flexión de la barra, etc.

suficiente número de medidas permitiéndose estudiar su evolución y tendencia.

Si se detectan errores de inspección, se recomienda eliminar el contenido del fichero de guardado que esté abierto en EPOCH 1000i⁶, y proceder a realizar los pasos citados en la lista anterior.

Por último, si se produce un atasco del palpador en el orificio, se recomienda retraer inmediatamente el mecanismo de sujeción, pues los motores paso a paso pueden dañarse.



Figura 5-3. Montaje experimental

En la Figura 5-3 se puede observar todo el sistema conectado y funcionando. A la derecha, la pantalla del PC al que está conectada la máquina 8801. A la izquierda, el plotter montado en el pistón, conectado al ordenador y a la red eléctrica. Abajo a la izquierda, mesa de trabajo con el PC de control, y el EPOCH 1000i conectado igualmente a PC y red eléctrica.

5.2.2 Ensayos

Una vez obtenido el valor de la carga de rotura en el ensayo de tracción, se definieron los parámetros de los ensayos de fatiga en función de dicho valor:

- Ensayo con $P_{m\acute{a}x} = 0.9 P_{rotura}$
 - Ensayo con $P_{m\acute{a}x} = 0.8 P_{rotura}$
 - Ensayo con $P_{m\acute{a}x} = 0.7 P_{rotura}$
- ($R = 0.1$ para todos los ensayos⁷)

⁶ En la metodología seguida, se ha creado un archivo de guardado para cada exploración (Es decir, un fichero por cada segmento del ensayo de fatiga)

⁷ El factor 'R' es el cociente de la mínima tensión de carga entre la máxima.

5.2.2.1 Expectativas

El orificio central de las placas actúa como un concentrador de tensiones que favorecerá la aparición temprana de daños durante los ensayos de fatiga. Con el fin de tener una visión general de lo que cabe esperar en cuanto a la respuesta de las placas durante los ensayos, se va a realizar la suposición de que el comportamiento de los daños en las placas de fibra de carbono (Material ortótropo) no será muy diferente del comportamiento de los mismos en una placa similar de un material isótropo si consideramos el primero cuasi-isótropo. El problema de una placa isótropa de espesor nulo traccionada con un orificio central posee la siguiente solución elástica:

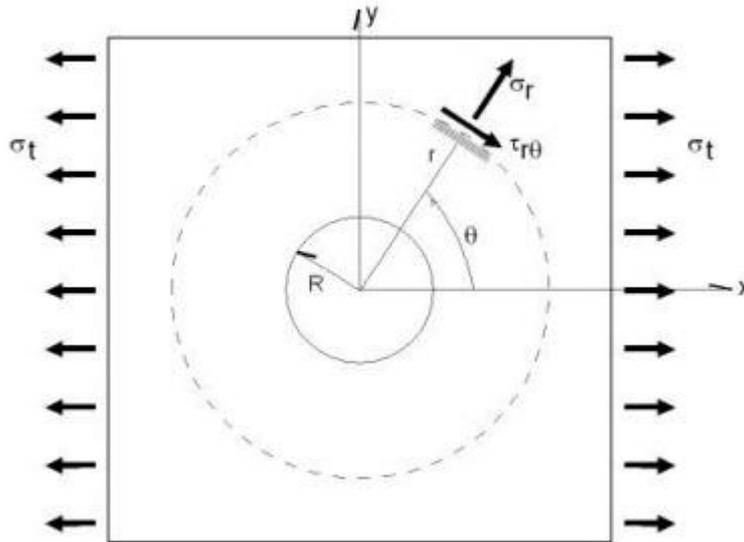


Figura 5-4. Problema de placa con orificio

$$\sigma_r = \frac{\sigma_t}{2} \cdot \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_t}{2} \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{R^4}{r^4} - 4 \cdot \frac{R^2}{r^2}\right) \cdot \cos(2\theta)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_t}{2} \cdot \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_t}{2} \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{R^4}{r^4}\right) \cdot \cos(2\theta)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_t}{2} \cdot \left(1 - 3 \cdot \frac{R^4}{r^4} + 2 \cdot \frac{R^2}{r^2}\right) \cdot \text{sen}(2\theta)$$

De donde se deduce que la tensión máxima se produce en la componente normal tangencial cuando:

$$r = R$$

$$\theta = \pi/2$$

Siendo este valor:

$$\sigma_\theta = 3\sigma_t$$

Si se representan los resultados numéricamente:

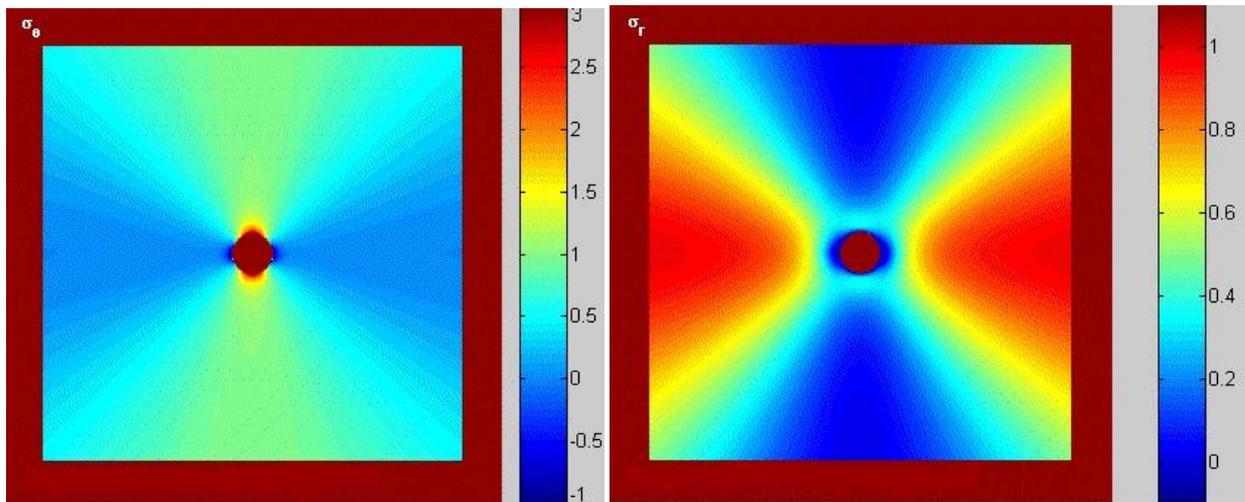
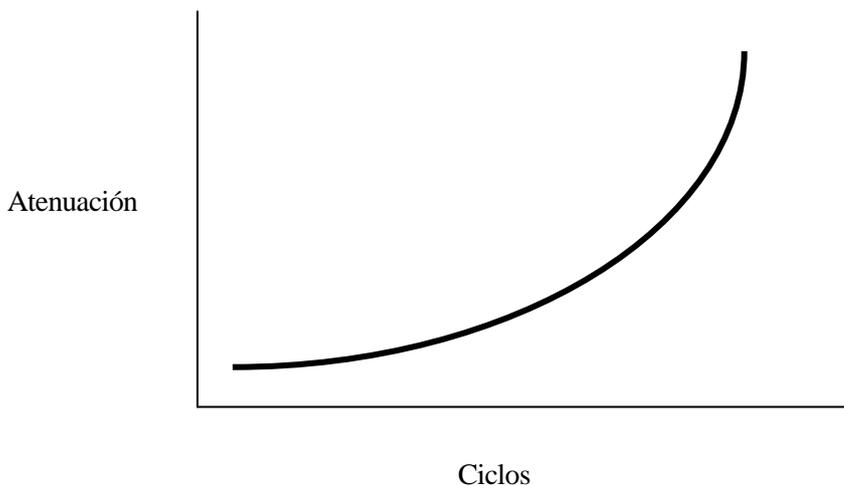


Figura 5-5. Simulación de la solución tensional (Código de poloestable.wordpress.com/)

Donde se observa que en principio, los daños aparecerán primero en ángulos cercanos a $90^{\circ}/270^{\circ}$, y crecerán desde el agujero hacia los bordes de la placa. Estos resultados son perfectamente comparables a la inspección visual de la placa rota a tracción, donde se observa que la zona de mayor daño corresponde a la “cruz” de tensiones mayores en ángulos próximos a $90^{\circ}/270^{\circ}$. Se puede decir que en esta zona la componente de tensión dominante es la normal tangencial, mientras que en ángulos próximos a $0^{\circ}/180^{\circ}$, la componente dominante es la radial.

El ensayo a fatiga dará lugar a una atenuación progresiva del eco de fondo debido a la aparición de defectos internos a medida que se le aplican ciclos de carga. A priori, se sabe por diversos estudios que la evolución de la atenuación es de la forma:



Por lo que se evaluarán los resultados de los ensayos en base a estas premisas.

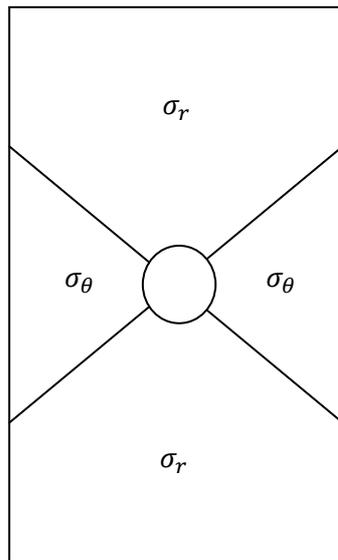


Figura 5-6. Zonas de dominio de las componentes tensionales

6 RESULTADOS

«... El experimento debería diseñarse para abrir tantas ventanas como sea posible a lo imprevisto».

- Frédéric Joliot-Curie -

Los resultados de todas las inspecciones se analizaron en Excel y en Matlab, realizándose la obtención curvas de atenuación y de tendencia en el primero, y suavizado de datos y mapas de daño en el segundo. En este capítulo se muestran las gráficas de atenuación (En porcentaje respecto al valor inicial), y los mapas de daño sobre placas virtuales a escala. Las tablas de datos se incluyen en el anexo.

6.1 Ensayos al 90% de la carga de rotura

Al producirse la rotura de una primera probeta con pocos ciclos, se ensayaron dos probetas con estas condiciones:

- Carga máxima: 60752.349 N
- Carga mínima: 6075.2349 N

6.1.1 Observaciones preliminares

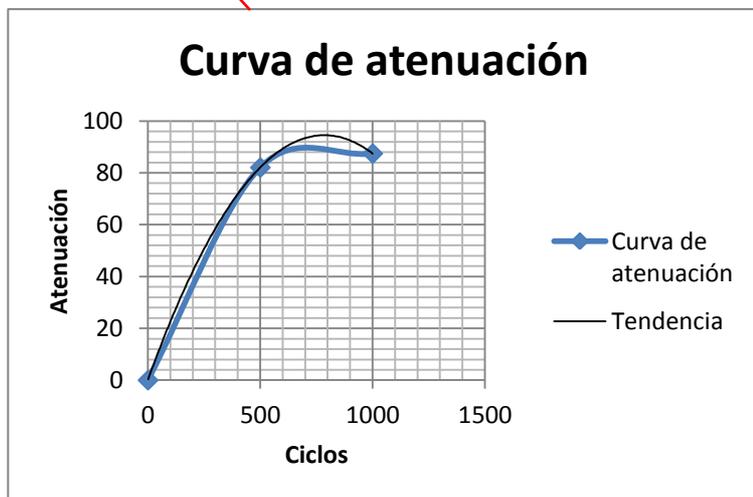
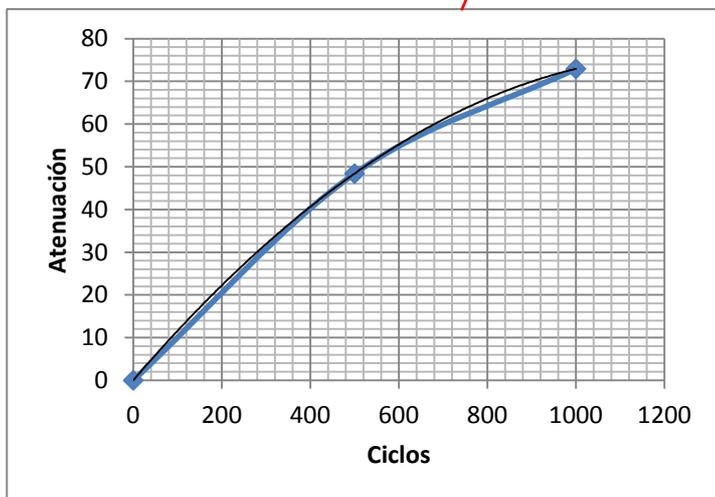
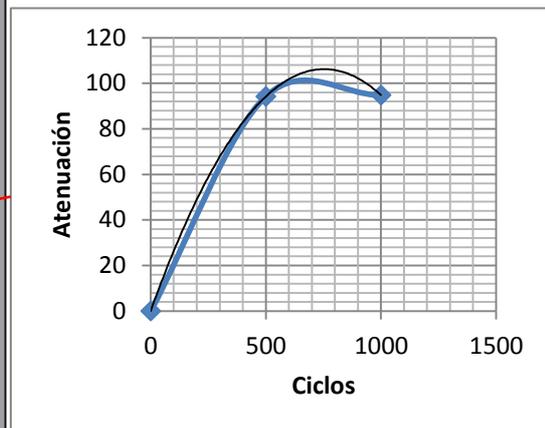
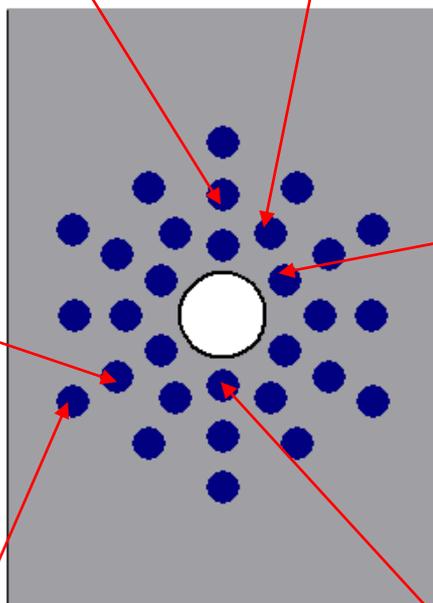
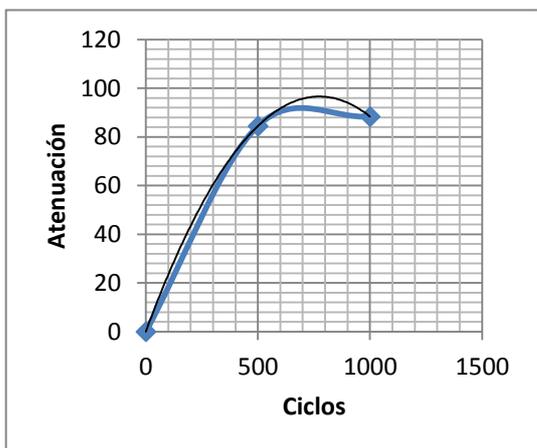
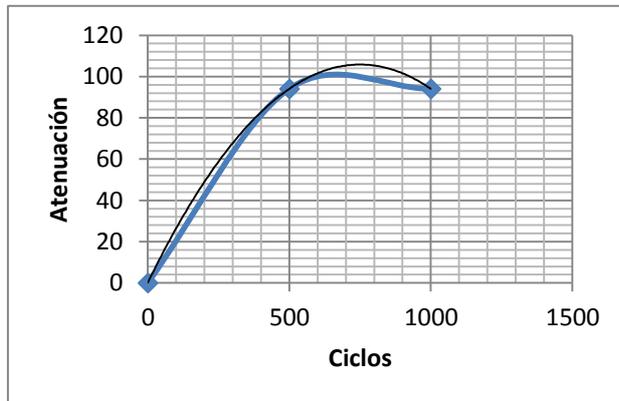
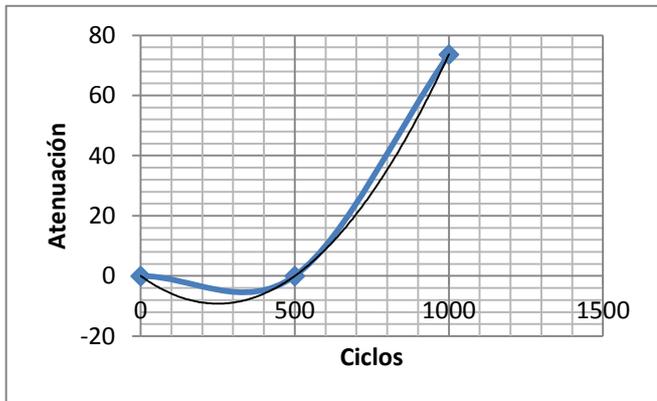
Durante el ensayo, y desde el primer ciclo, se escuchaba rotura de fibras, y se observaba una deformación de la placa importante a simple vista.

6.1.2 Ensayo 1

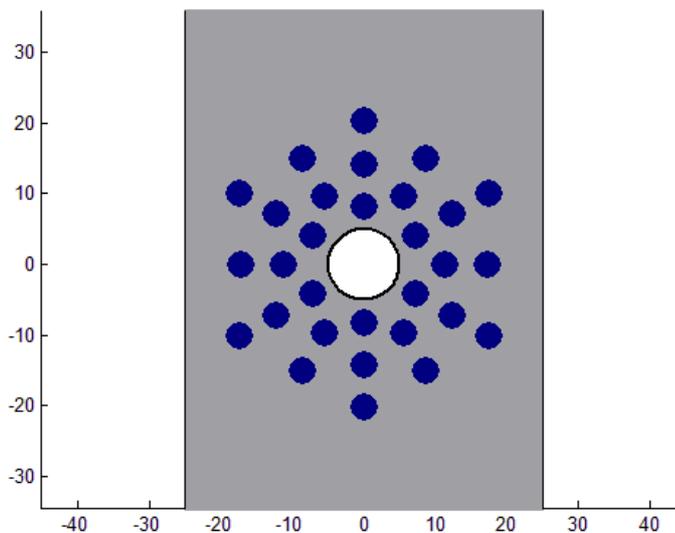
6.1.2.1 Resultados generales

La probeta rompió a 1610 ciclos.

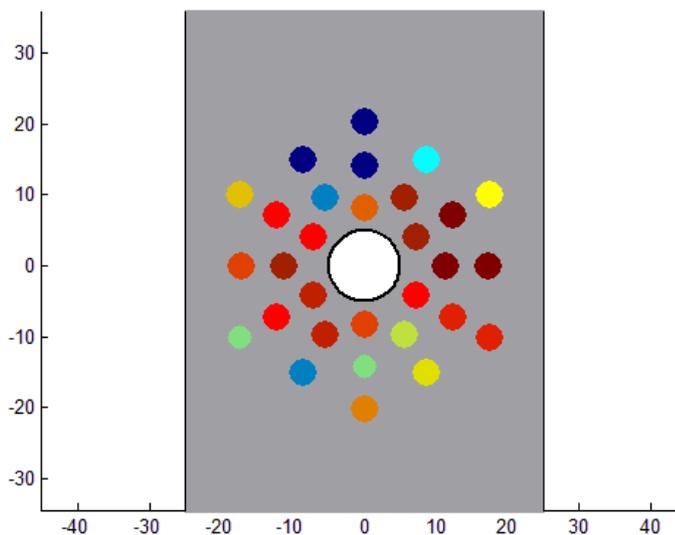
6.1.2.2 Gráficas



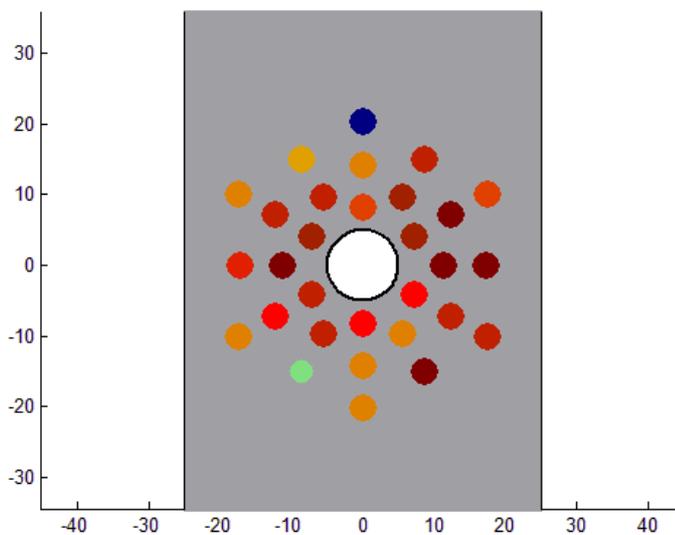
6.1.2.3 Mapas de daños



0 ciclos



500 ciclos



1500 ciclos

Daño máximo



Daño mínimo



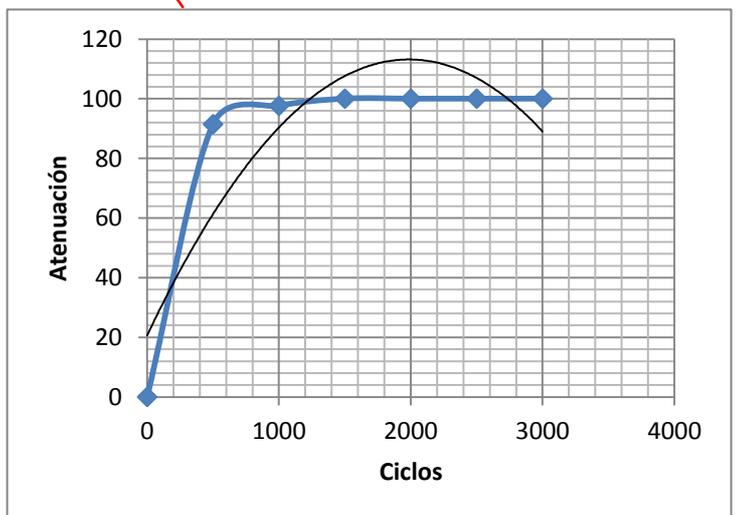
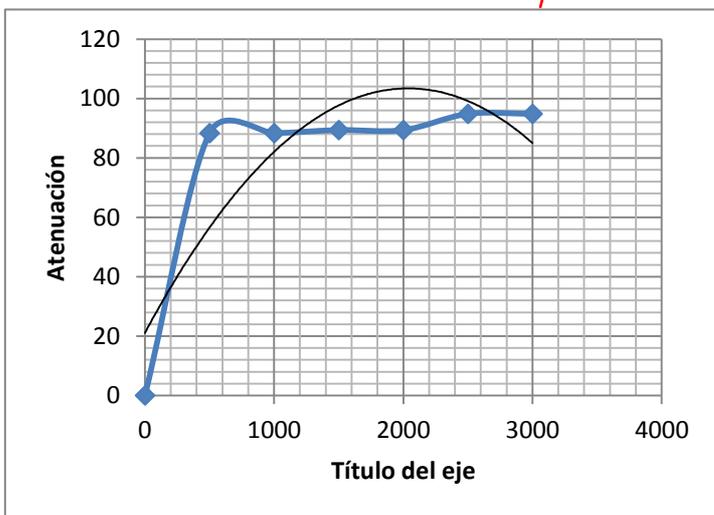
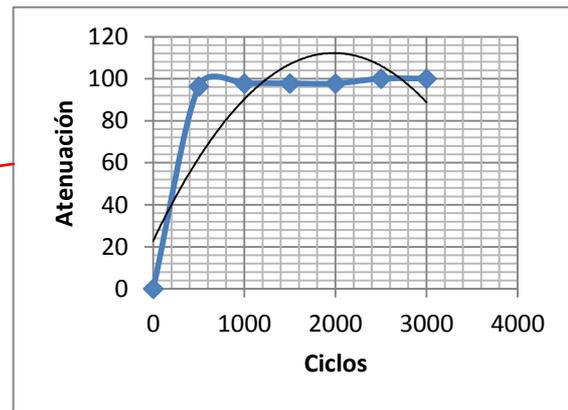
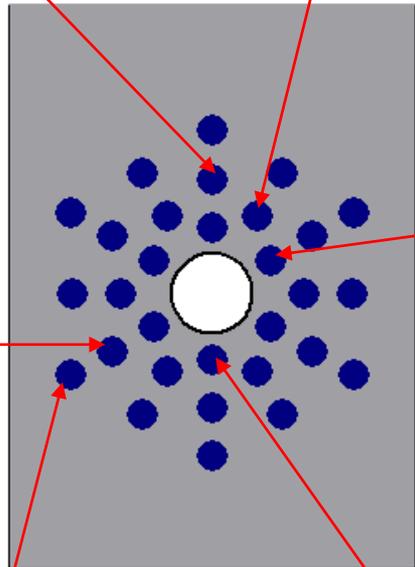
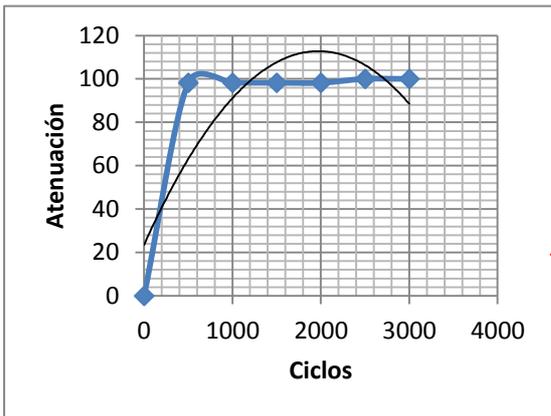
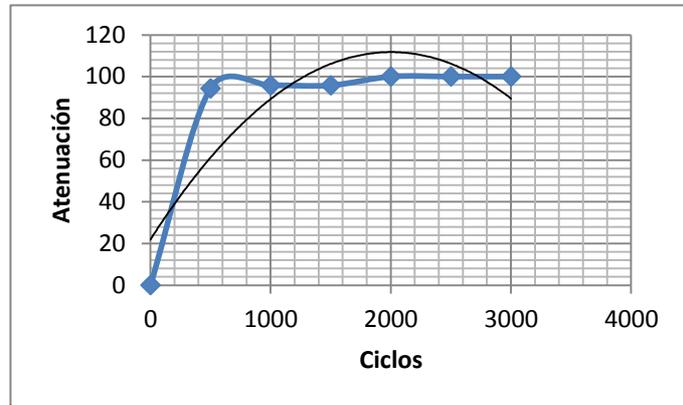
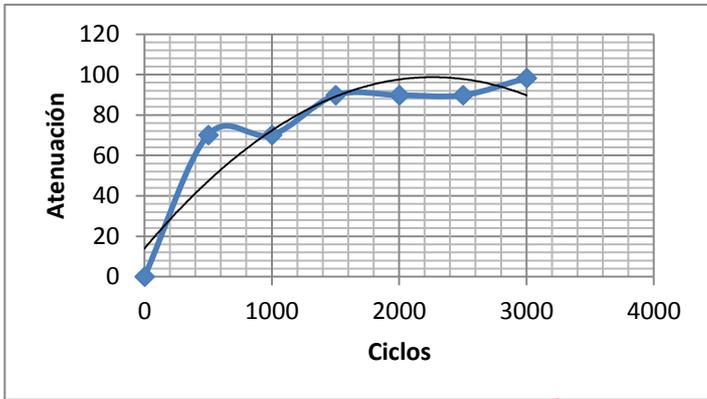
1610 ciclos

6.1.3 Ensayo 2

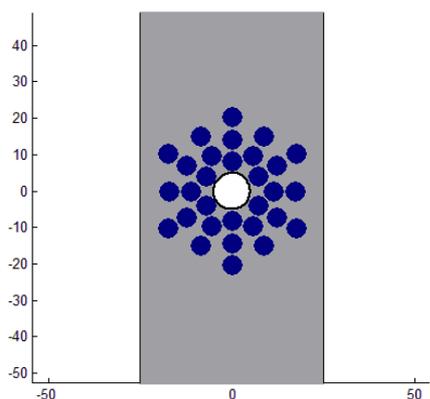
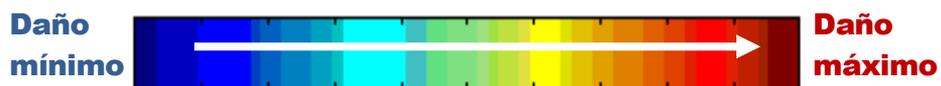
6.1.3.1 Resultados generales

La probeta rompió a los 3210 ciclos.

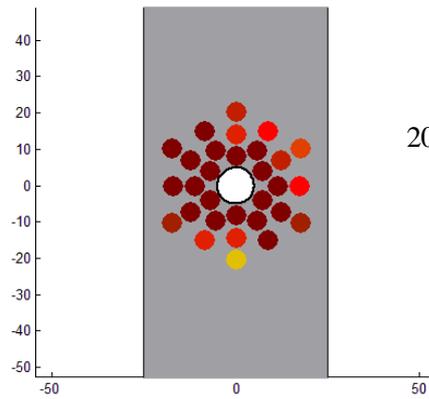
6.1.3.2 Gráficas



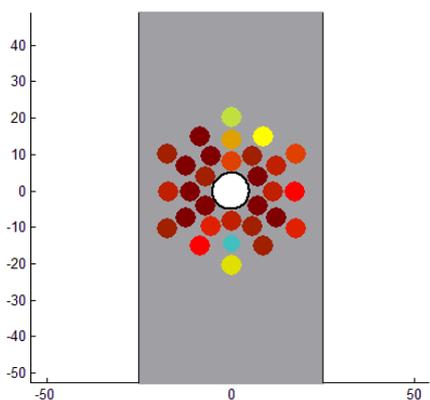
6.1.3.3 Mapas de daños



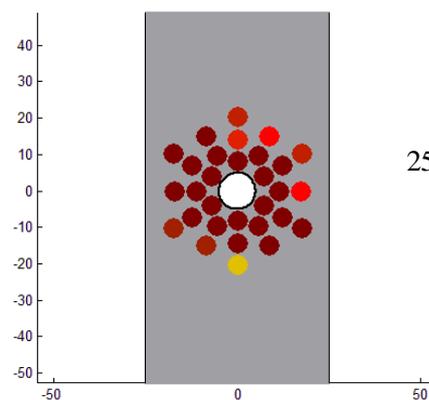
0 ciclos



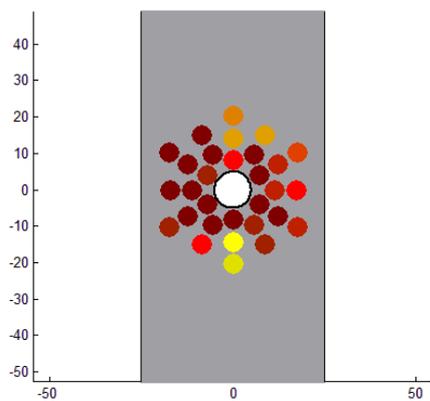
2000 ciclos



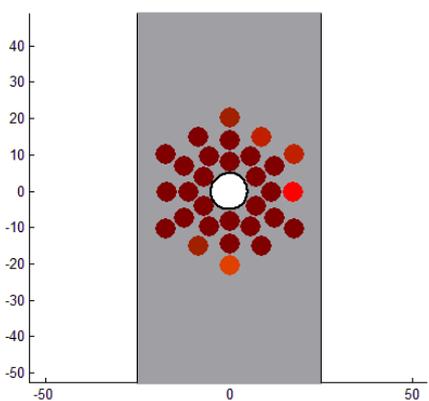
500 ciclos



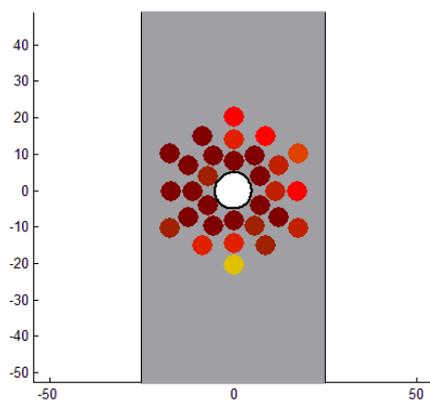
2500 ciclos



1000 ciclos



3000 ciclos



1500 ciclos



3210 ciclos

6.1.4 Discusión de resultados

Los ensayos de las probetas con una carga tan cercana a la rotura hacen evidente la necesidad de realizar otros ensayos con menos carga de manera que pueda observarse mejor la evolución de los daños antes de la rotura del espécimen. Como se ha visto, numerosos puntos de la probeta pierden el eco de fondo⁸ (Si consideramos que la inspección es correcta) en los primeros 500 ciclos de fatiga, resultado que también puede observarse en las gráficas. Los puntos que se dañan antes son los que se encuentran en la zona de tensiones normales tangenciales mayores.

En el primer ensayo se observa mejor el daño a los 500 ciclos, donde se puede ver que los puntos en el ángulo 90°/270° (Si entendemos por 0° la dirección de aplicación de la carga) sufren antes los daños mayores, y en general, a medida que nos alejamos del agujero (Concentrador de tensiones) los daños van siendo menores.

En cuanto al segundo ensayo, podemos destacar que la pérdida del eco de fondo es casi total después de 1500 ciclos. No se tiene certeza de si las inspecciones de este segundo ensayo se realizaron correctamente, pues tal y como se observa en los mapas de daño, la pérdida de eco de fondo es casi total en todos los puntos antes de romper, y esto puede significar, aparte de que pueda ser cierto que todos los puntos se dañaron severamente, que el palpador no contactó adecuadamente con la superficie de la placa, y no recibiera bien las ondas ultrasónicas.

Tras esta discusión, y dado que aparecieron algunas incertidumbres en los resultados, se procedió a disminuir la carga para evitar la rotura temprana de los especímenes.

6.2 Ensayo al 80% de la carga de rotura

- Carga máxima: 54002.088 N
- Carga mínima: 5400.2088 N

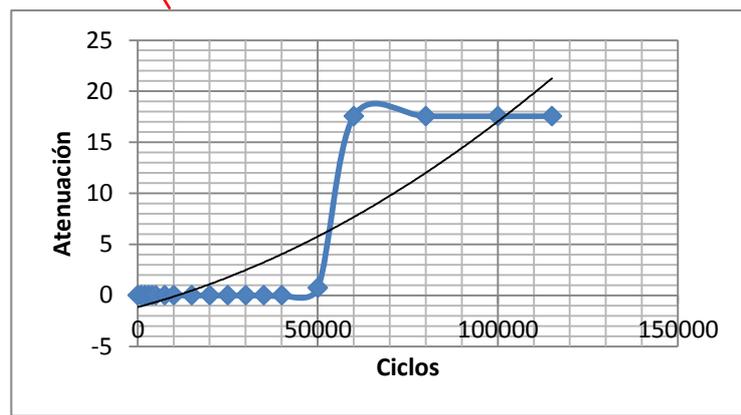
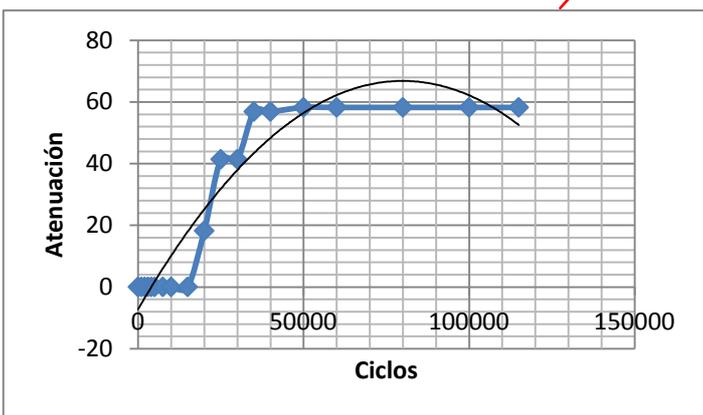
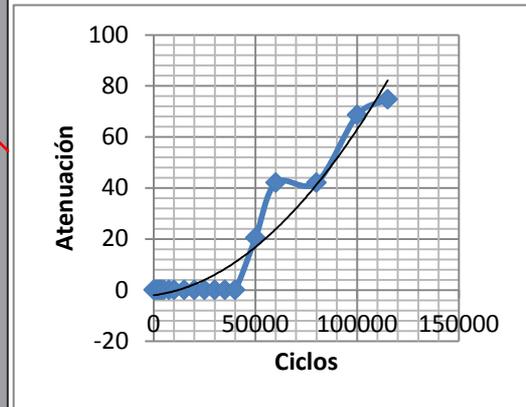
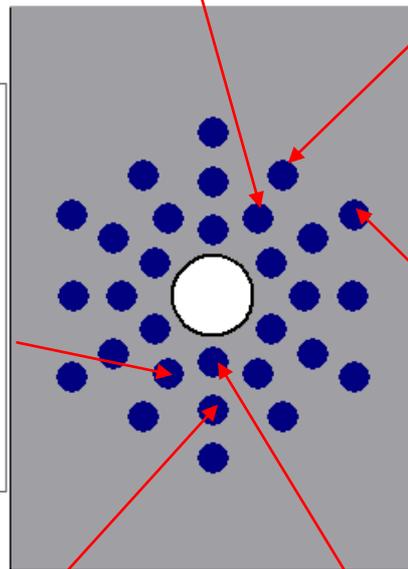
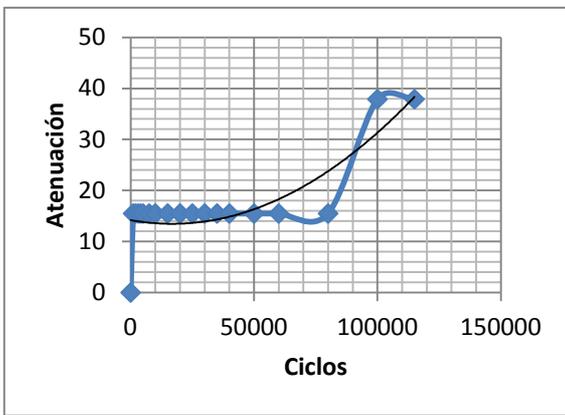
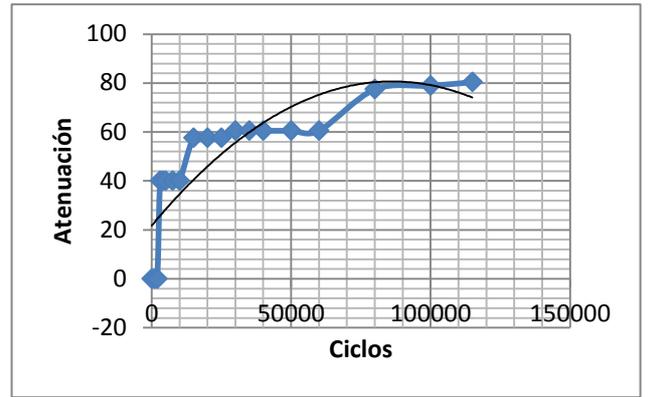
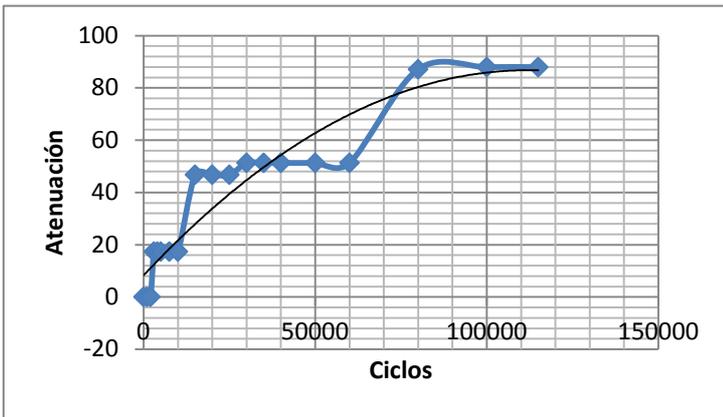
6.2.1 Ensayo

6.2.1.1 Resultados generales

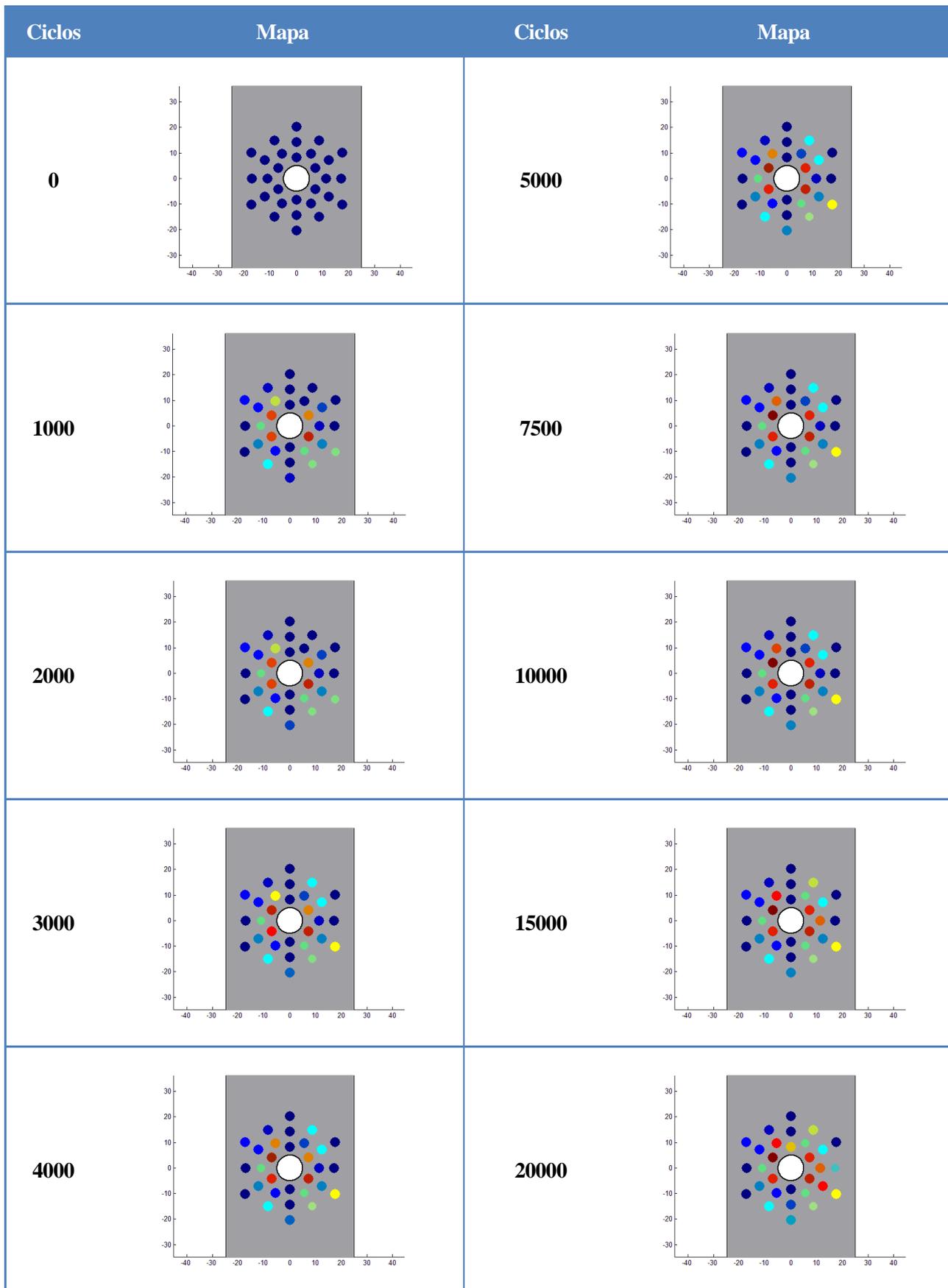
Se sometió el espécimen a 115000 ciclos sin producirse la rotura. El número de ciclos final se consideró suficiente para observar resultados.

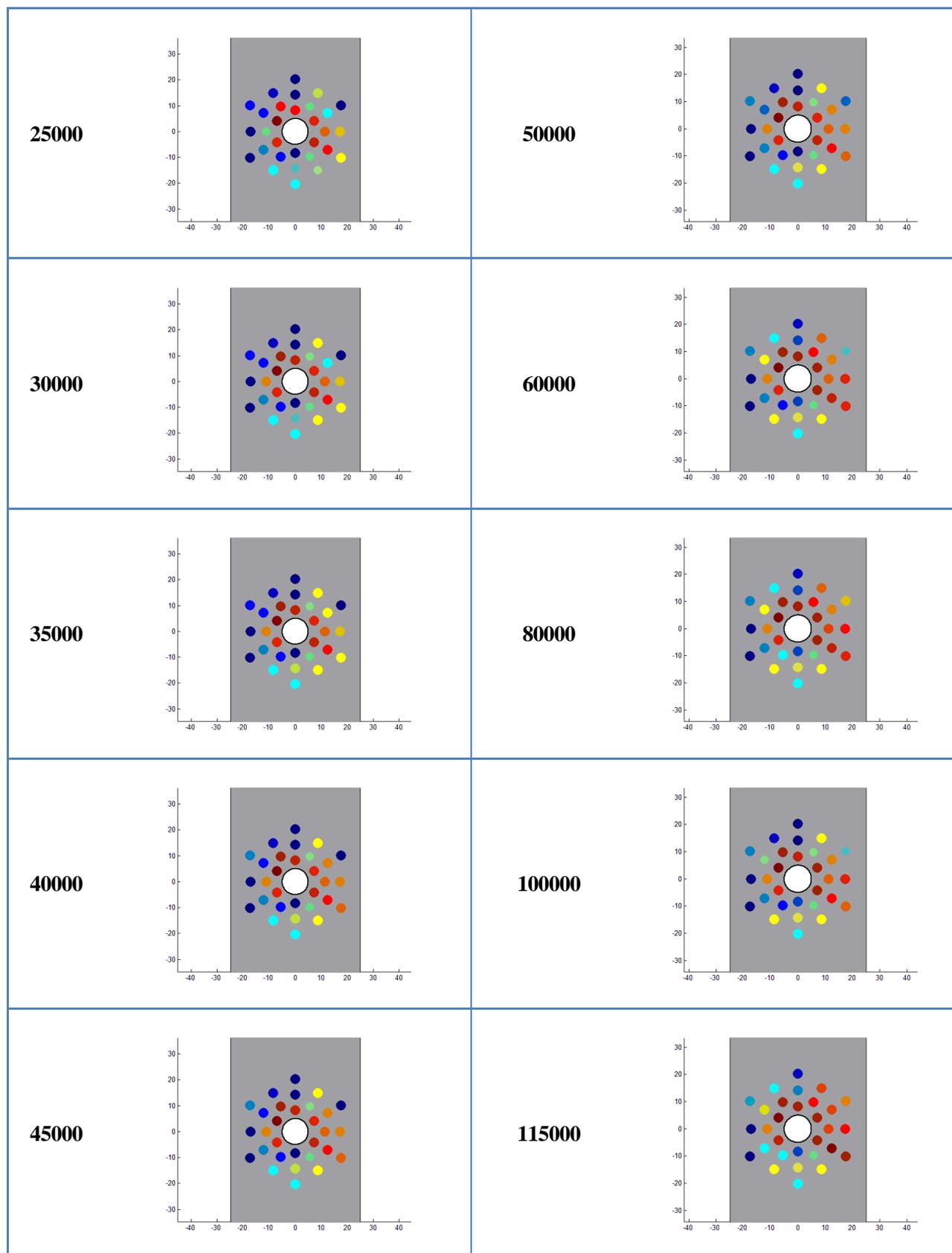
⁸ Se considera eco de fondo perdido cuando la atenuación es mayor al 85%

6.2.1.2 Gráficas



6.2.1.3 Mapas de daños





6.2.2 Discusión de resultados

El ensayo al 80% de la carga de rotura aportó un mayor intervalo de datos de atenuación del eco de fondo. Las curvas de atenuación comienzan a parecerse en tendencia a las primeras estimaciones que se realizaron. Además, se vuelve a observar que los puntos en dañarse primero son los cercanos al punto de tensión normal tangencial máxima, tal y como puede observarse en los mapas de los primeros ciclos de carga. De nuevo, se observa que puntos más cercanos a los ángulos de 90°/270° sufren más daño que los ubicados cerca de 0°/180°. En este caso se han obtenido resultados mucho mejores que en el ensayo al 90% de la carga de rotura. Sin embargo, con el objetivo de afianzar la evaluación del sistema de inspección, y descartar cualquier tipo de duda (Existen algunas asimetrías en los daños), se decidió disminuir aún más la carga de fatiga.

6.3 Ensayo al 70% de la carga de rotura

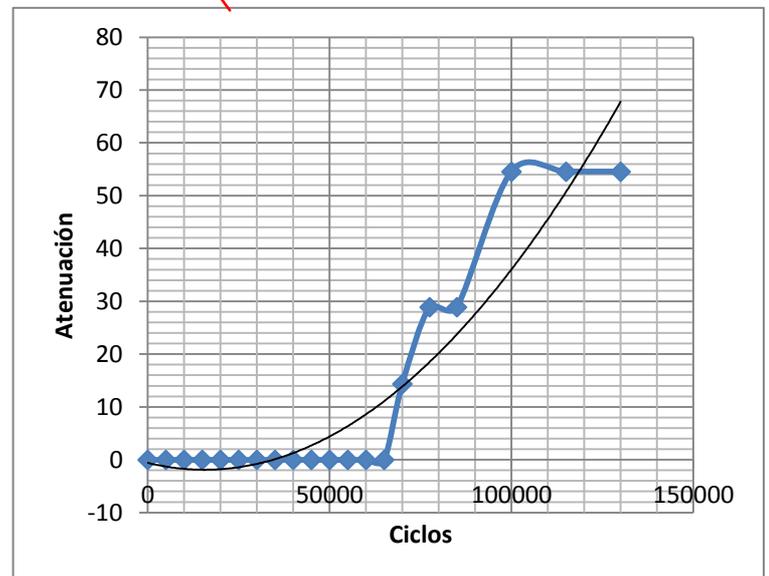
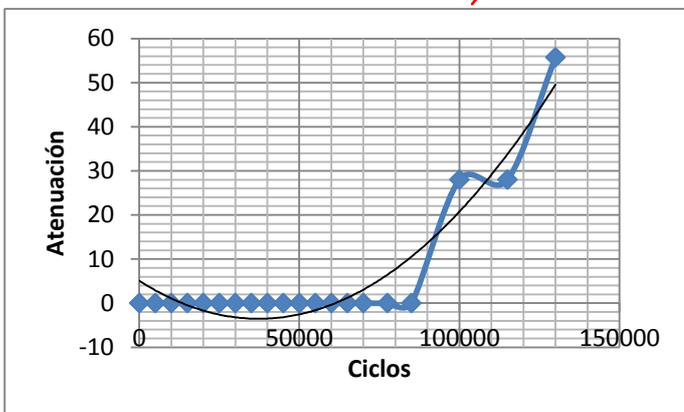
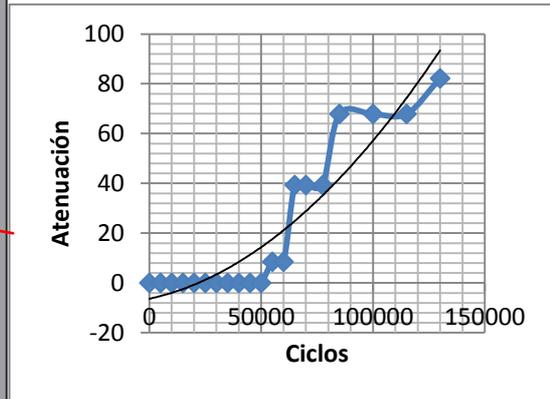
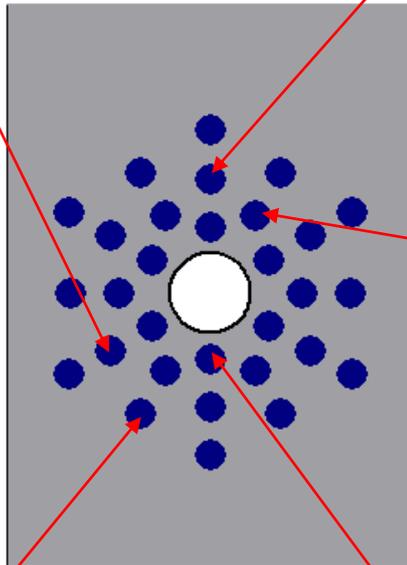
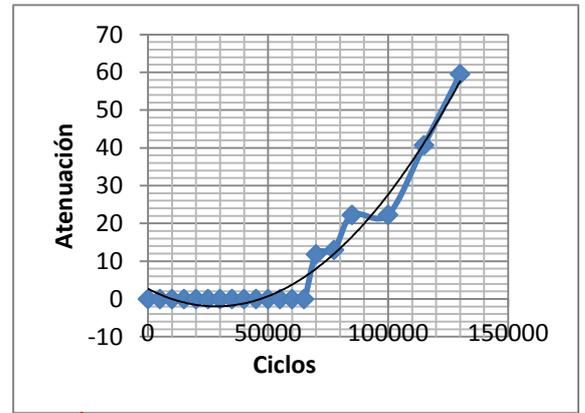
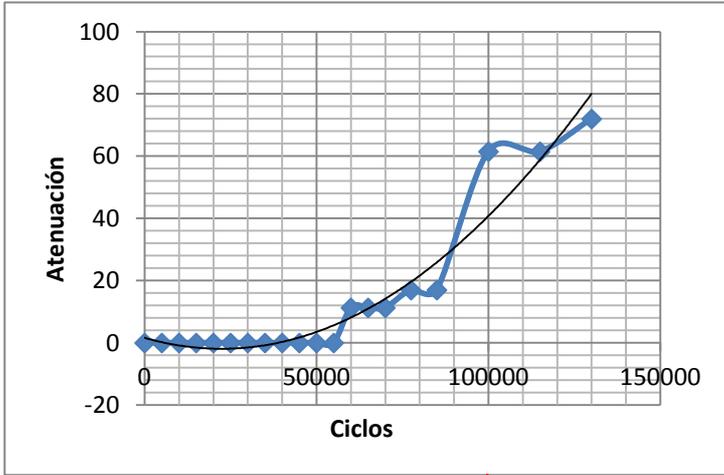
- Carga máxima: 47251.827 N
- Carga mínima: 4725.1827 N

6.3.1 Ensayo

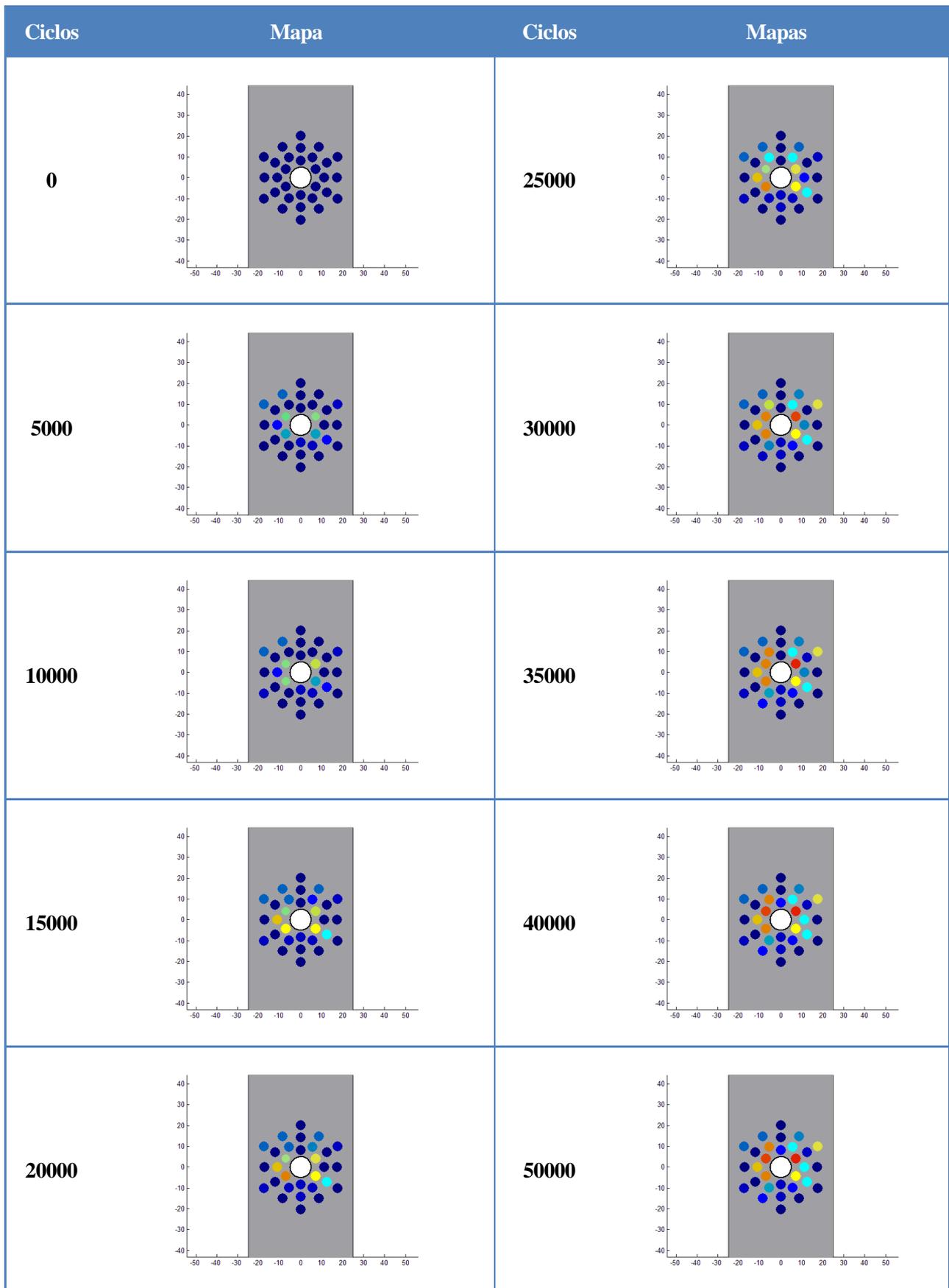
6.3.1.1 Resultados generales

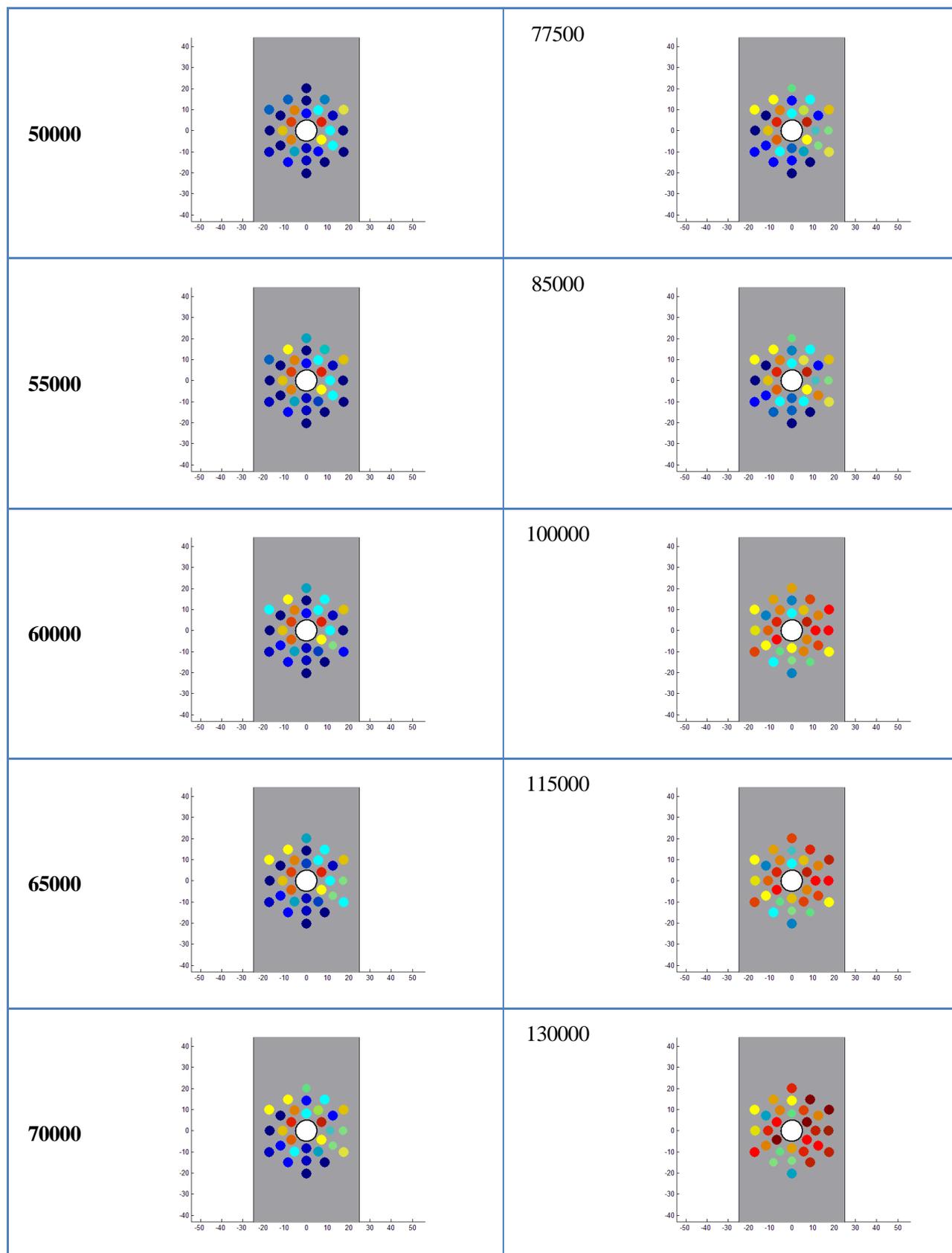
Se sometió el espécimen a 130000 ciclos sin producirse la rotura. El número de ciclos final se consideró suficiente para observar resultados.

6.3.1.2 Gráficas



6.3.1.3 Mapas de daños





6.3.2 Discusión de resultados

El ensayo al 70% de la carga de rotura ha sido el que ha aportado unos resultados mucho más claros y visuales.

Como se ha podido observar en las curvas de atenuación, la tendencia es similar a la que se había predicho en la curva de atenuación teórica: Se observa un crecimiento casi exponencial de la atenuación a lo largo de la historia de carga en la mayoría de los puntos. En definitiva, la evolución de los ecos de fondo se puede considerar correctamente medida.

En cuanto a los mapas de daño, se puede observar que los daños se propagan más tarde que en los ensayos anteriores, hecho coherente al haberse aplicado menos carga. Así mismo, se hace notable la aparición temprana de daños cerca del punto de tensión normal tangencial máxima, así como la expansión de los mismos a medida que aumentan los ciclos formando la “cruz” que se describía en la sección 5.2.2.1. La zona de dominio de las tensiones radiales sufre daños de manera más tardía, hecho coherente dado que esta componente es menor que la normal tangencial.

Nota: Los colores de los mapas de atenuación no se pueden comparar entre ensayos distintos pues cada uno está ajustados al daño máximo de cada uno, es decir, el daño máximo del ensayo al 80% de la carga de rotura puede ser mayor que en el de 70%, pero sin embargo ambos colores son iguales. Este ajuste se ha realizado para poder exagerar los colores en un mismo mapa de daño y poder observar mejor la expansión de los daños.

6.4 Evaluación global

En líneas generales, los resultados aportados por las inspecciones son aceptables a partir de las hipótesis de las que se han partido para poder evaluar el sistema. Como se ha visto, los ensayos más longevos son los que han permitido estudiar la evolución de los daños, los cuales han mostrado comportamientos muy fieles a las hipótesis y estudios realizados a priori.

Las curvas de atenuación muestran la tendencia exponencial que se predecía en un principio, salvo en algunos puntos en los que la tendencia se alejaba bastante de la curva teórica. Esto puede deberse, o bien a que el material ha respondido así en dicho punto, o bien a que se ha producido un error de contacto localizado durante toda la inspección (Rebotes, pérdida de acoplante, etc.)

Los mapas de daño reflejan, en general, una evolución de los daños coherente con el estudio tensional que se realizó en el capítulo anterior. Las inspecciones realizadas muestran que los daños se han expandido desde los puntos de tensión máxima hacia los bordes de las placas, tal y como se predecía con el estudio del problema elástico de placa plana con orificio sometida a tracción.

El suavizado de los datos ha sido crucial para conseguir estudiar las tendencias de las atenuaciones. Las gráficas de datos “brutos” muestran grandes oscilaciones de los ecos medidos (Fundamentalmente debido a cambios en la perpendicularidad palpador-placa), por lo que en principio, el análisis bruto de datos no es aconsejable para caracterizar piezas con pocos ensayos.

Globalmente, el sistema de exploración ha dado muy buenos resultados, y su empleo en inspección de placas es aceptable siempre y cuando se realicen ciertas mejoras en el montaje para optimizar las exploraciones y evitar rebotes, flexiones, o cualquier otro tipo de fenómenos que provoquen errores de medida.

7 CONCLUSIONES

7.1 Comentarios

Tal y como se ha visto, lo que en un principio parecía estar orientado al ensayo y caracterización de piezas, ha terminado por concluir en un proceso de diseño y evaluación de un sistema de inspección robotizado. Estos cambios de objetivos dieron lugar a la aparición de problemas u obstáculos desde que se comenzó a abordar el proyecto donde fue necesario emplear juicio crítico para decidir qué solución dar a dichos problemas, o bien cuál de todas las soluciones propuestas era la más acertada para avanzar un paso más. Esta dinámica problema-solución tuvo que llevarse a cabo a lo largo de todo el proyecto: En el estudio preliminar se vio necesario adquirir nuevo material para cumplir con los objetivos del proyecto; en el primer diseño del montaje aparecieron numerosos problemas (Montaje frontal), por lo que se tuvo que idear de nuevo el montaje al completo; el desarrollo del software fue largo y tedioso, pues se dieron muchos pasos en falso hasta conseguir comunicación entre el robot y MatLab; las interfaces de control tuvieron que pasar por un proceso de depurado, ya que a veces enviaban órdenes erróneas, o saturaban la placa controladora; el cambio de la configuración de placa (En un principio no incluía taladro central) obligó a volver a implementar el calculador de trayectorias, e idear rutas que sorteasen el orificio (Programa circunferencial); en los ensayos aparecieron problemas de sujeción de las placas, además de problemas de excesos de presión del palpador contra la placa; etc. Por ello, es remarcable el hecho de que cada solución adoptada ha sido meditada, valorada y comparada en su caso, con el fin de no arrastrar problemas que pudieran entorpecer o imposibilitar la conclusión del proyecto. Esta idea recuerda bastante a lo que durante toda la carrera se ha intentado inculcar a los alumnos: La ingeniería implica saber cuál es el problema, y saber cuál es la solución más acertada.

El desarrollo de un sistema robotizado, tal como se introdujo en el estudio preliminar, hace ver el porqué de la cada vez más presente automatización de actividades en la industria. La necesidad de conseguir facilidades y eliminar carga de trabajo para el operario con el fin de centrar el trabajo del mismo a la caracterización o valoración de materiales se hacen evidentes, y fue a partir de este concepto donde se centró el desarrollo del software, que como ya se ha mostrado, incluye todas las funcionalidades y protecciones (Avisos y bloqueos) necesarios para asegurar la correcta ejecución del proceso

El estudio del problema elástico plano, que como se ha visto posee una solución analítica, ha sido crítico para poder calificar los resultados obtenidos, sobre todo en cuanto a distinción de zonas de propagación de daños y magnitud relativa de los mismos.

La valoración de los resultados de inspección ha requerido, como ya se ha citado varias veces en el capítulo interior, un suavizado de los datos basado en la comprensión de la magnitud que se está midiendo (Intensidad de señal), teniendo en cuenta que una atenuación del eco puede deberse, o bien a defectos, o bien a mal contacto del palpador con la placa. Este comentario refleja la necesidad de introducir mejoras en el montaje por parte de futuros alumnos que aborden este sistema.

Como conclusión, el proyecto ha constituido en un auténtico reto de diseño ingenieril desde la concepción de su idea, pasando por su montaje y puesta a punto, hasta su evaluación, en el cual ha sido necesario emplear todo tipo de destrezas y conocimientos para llevarlo a cabo.

7.2 Lecciones aprendidas

- Abordar un proceso de diseño de principio a fin
- Detectar problemas y proponer soluciones
- Elección entre distintas soluciones
- Búsqueda de material
- Trabajo en equipo en el laboratorio
- Dinámica de ensayos
- Trabajo con máquinas de ensayo

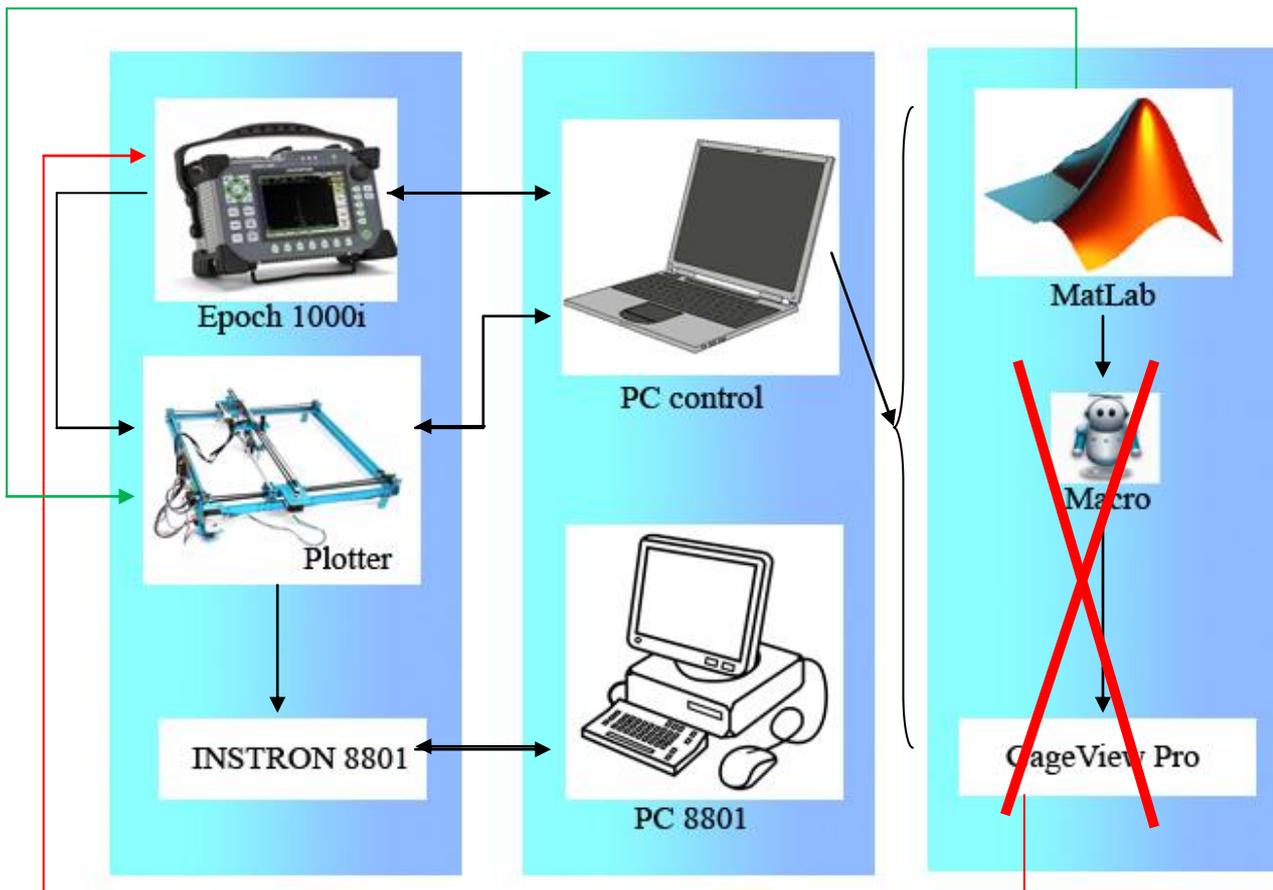
- Tratamiento y análisis de resultados experimentales
- Valoración del funcionamiento de un diseño propio

Además, el desarrollo de este sistema automático de inspección de placas ha necesitado del empleo de numerosas herramientas aprendidas durante la carrera para poder llevarlo a cabo satisfactoriamente: Conocimientos de informática (Manipulación de software profesional, desarrollo de interfaces, control de robots, etc.), conocimientos de fabricación (Lenguaje G-Code, diseño y fabricación de especímenes, etc.), conocimientos de elasticidad (Modelado de la situación ensayada, aplicación de la teoría de la elasticidad para valorar resultados, etc.), conocimientos en inspección (Ultrasonidos, ensayos no destructivos, estado del arte, metodología, datos de interés, etc.), entre otras cosas.

7.3 Propuestas de mejora

Como ya se ha mencionado, el sistema desarrollado necesita de ciertas modificaciones o mejoras para conseguir mejores resultados de inspección. Algunas de las propuestas son las siguientes:

- Incluir accionamiento del servomotor para mover el mecanismo de extracción-retracción y evitar flexión por rozamiento del palpador contra la placa.
- Mejorar el sistema de sujeción del palpador para conseguir máxima perpendicularidad.
- Mejorar la sujeción de las pinzas para quitar vibraciones.
- Combinar las interfaces GUIDE para, dentro de un mismo programa, poder configurar las rutas de exploración según el tipo de placa a explorar.
- Eliminar el uso de la “Macro” para enviar la orden de guardado al EPOCH 1000i. Sustituir la llamada al ejecutable por un envío directo de comandos al dispositivo (Debe conseguirse comunicación con MatLab)



- Incluir un sistema de inyección de acoplante automático.
- Comunicación con la máquina de fatiga, de tal manera que realice todo el ensayo e inspección por sí solo.

REFERENCIAS

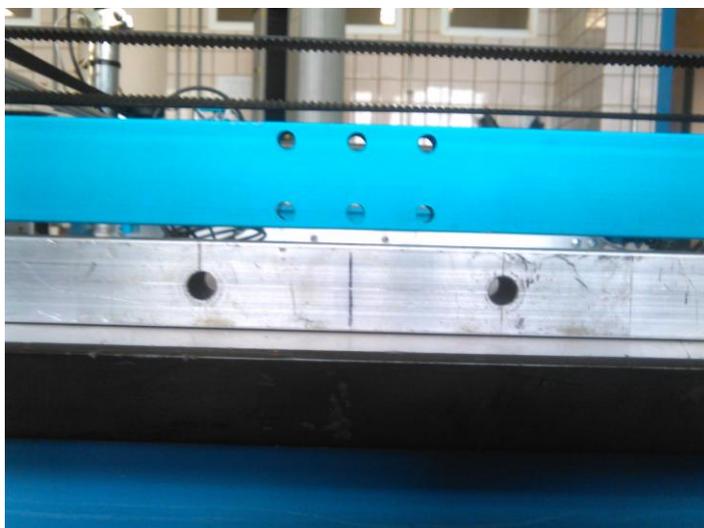
- [1] Carlos López Almenara, «Inspección en materiales compuestos mediante técnicas de ultrasonidos»
- [2] Documentación sobre ultrasonidos aportada por el tutor
- [3] Mikell P. Groover, , «Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing»
- [4] Manual de uso del USD 10 KrautKramer
- [5] Manual de uso de la máquina INSTRON 8801
- [6] Manual de uso del plotter 2D de Makeblock
- [7] Manual de uso del EPOCH 1000i
- [8] Manual de uso de GageView Pro
- [9] Instrucciones del programa de Benbox 2.12.45
- [10] www.arduino.cc
- [11] www.mathworks.com

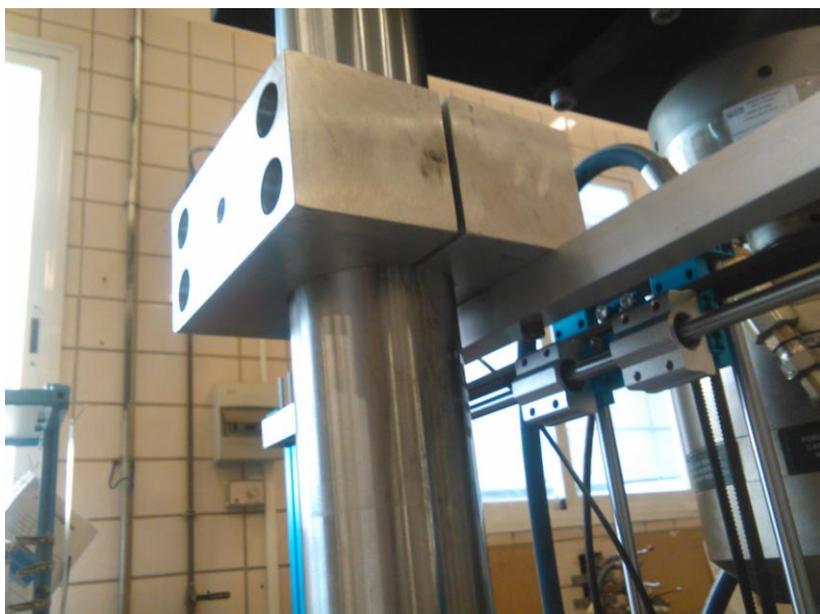
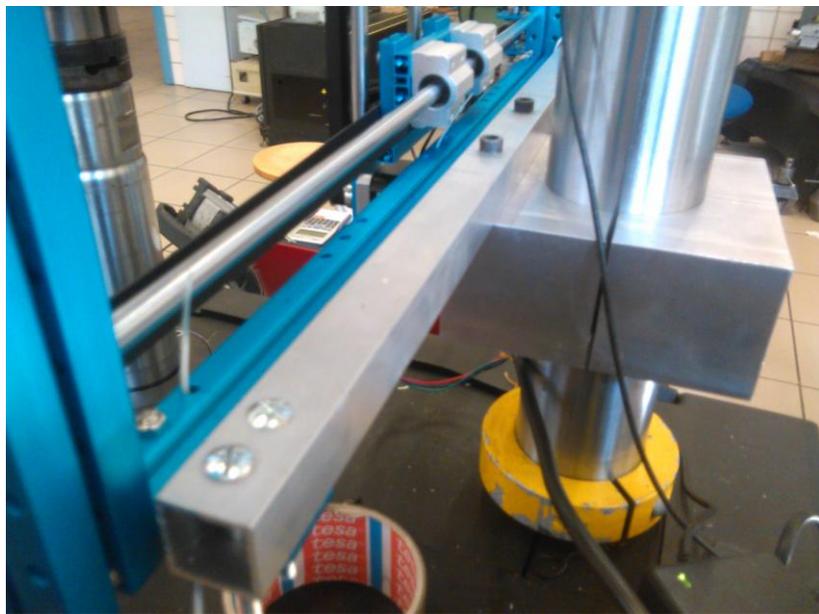
Detalles del montaje

Los materiales empleados para realizar el montaje final han sido:

- Dos barras de aluminio huecas de sección cuadrada (2x2 cm) de longitud 50 cm aproximadamente
- 8 tornillos, 8 arandelas, y 8 tuercas en las uniones plotter-barras
- 2 pinzas metálicas de aluminio
- 8 tornillos para cierre de pinzas
- 4 tornillos para unión barras-pinzas
- Mecanismo de sujeción del palpador formado por dos barras de aluminio huecas circulares, y tubo de plástico interior
- Bridas
- Gomillas de presión y compensación

A continuación, se incluyen diversas fotografías del montaje y los materiales:

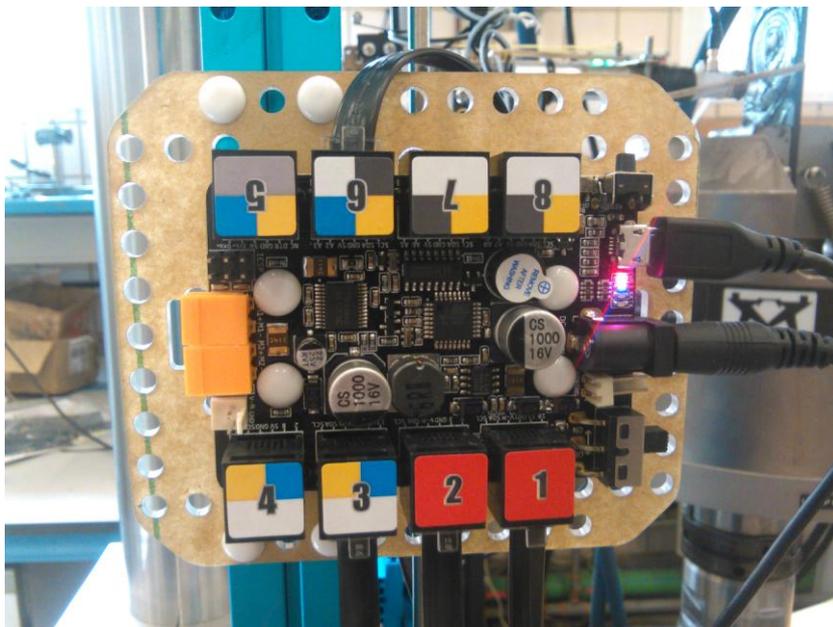






Así mismo, se adjuntan fotografías de los distintos dispositivos electrónicos:

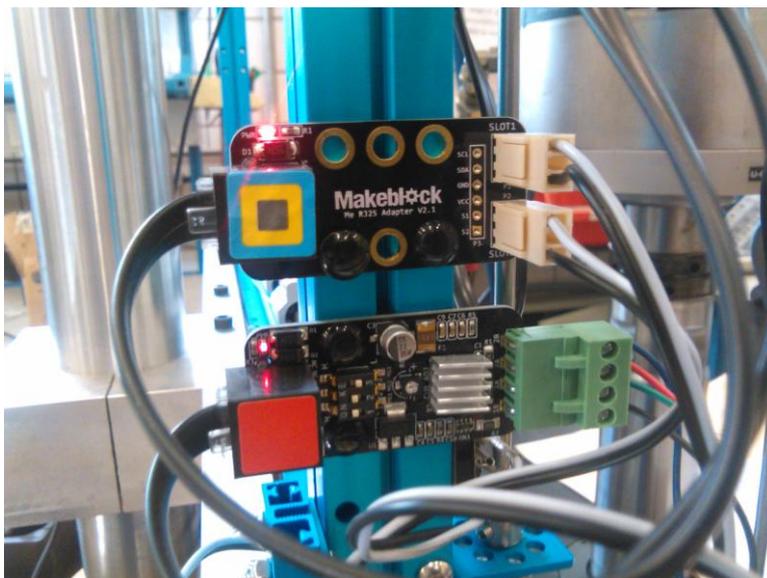
- Placa controladora



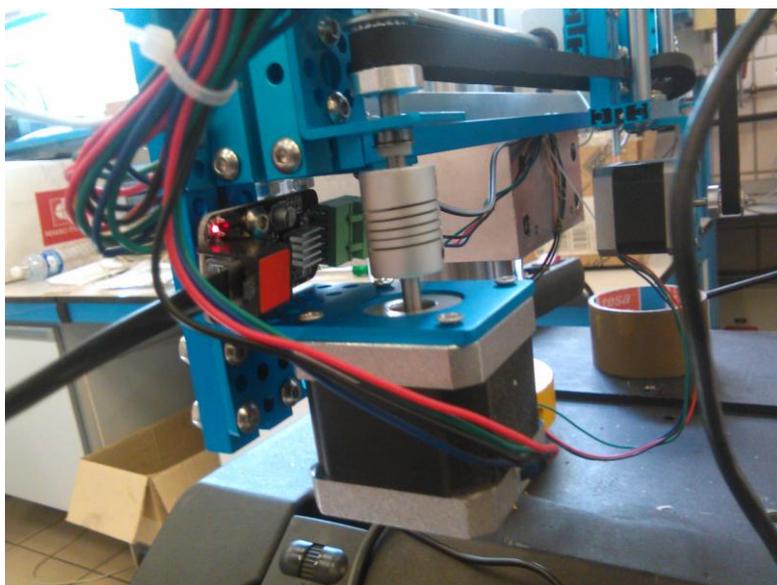
- Interruptores final de recorrido



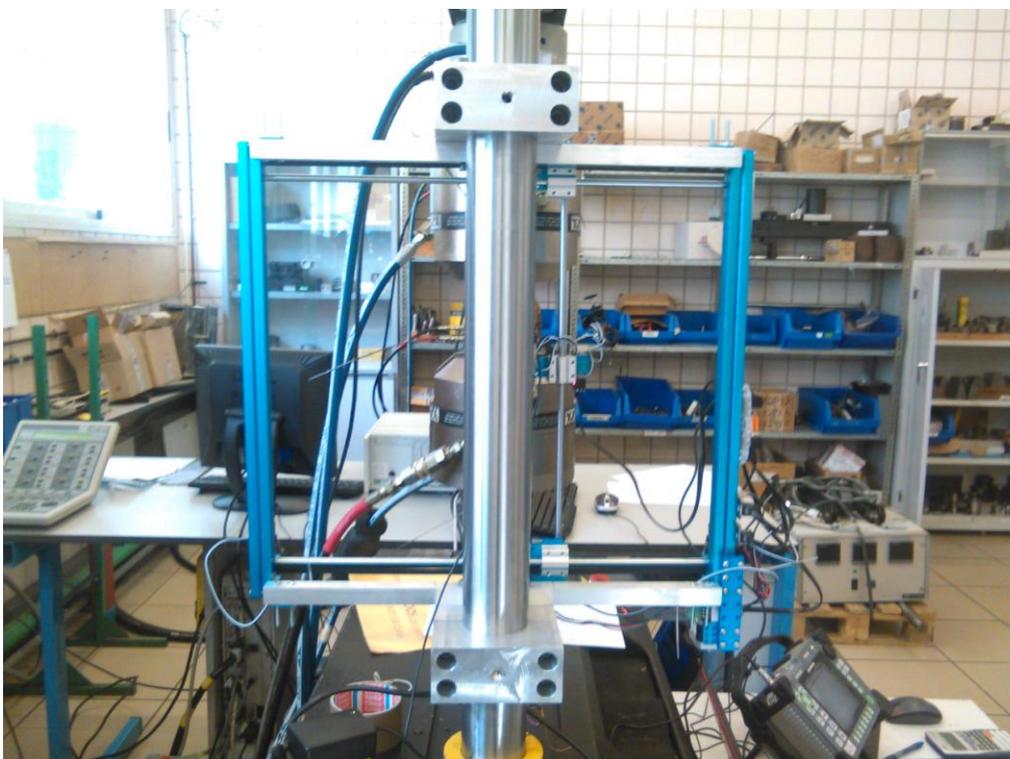
- Controladores de motor y de interruptores



- Motores paso a paso



El aspecto final del montaje:

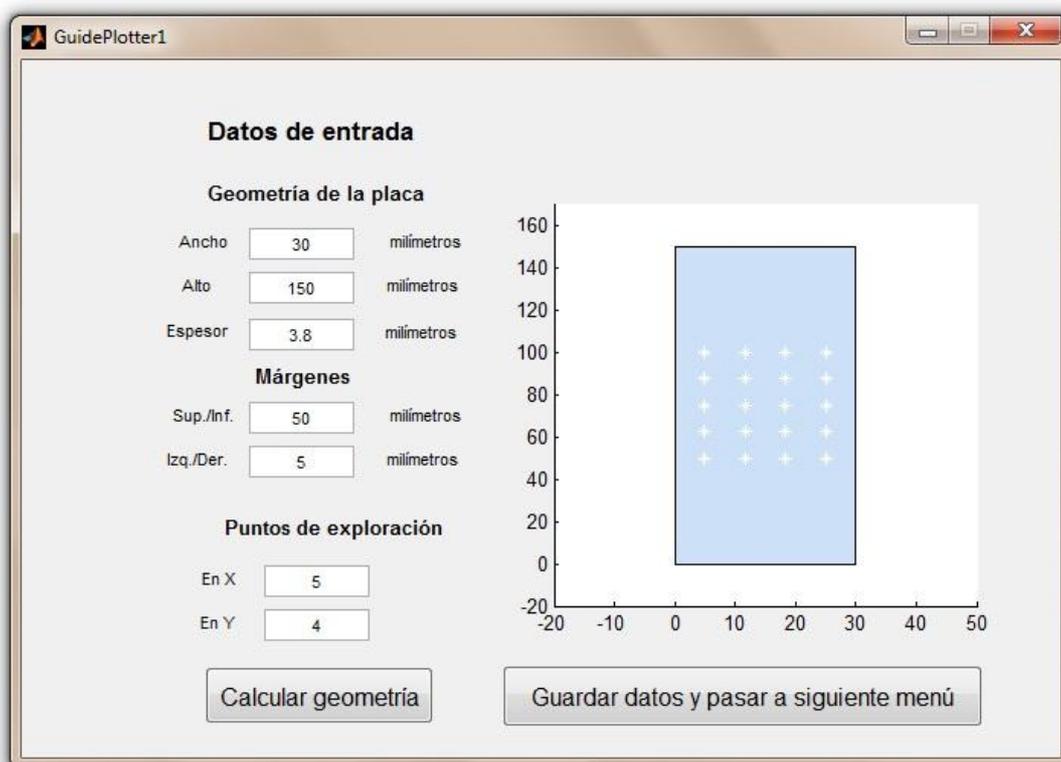


Manual de uso del sistema

Como ya se ha dicho en el documento, el software desarrollado está orientado a facilitar la labor de exploración al operario. A continuación, se va a explicar el funcionamiento del sistema para las dos tipos de ruta implementados.

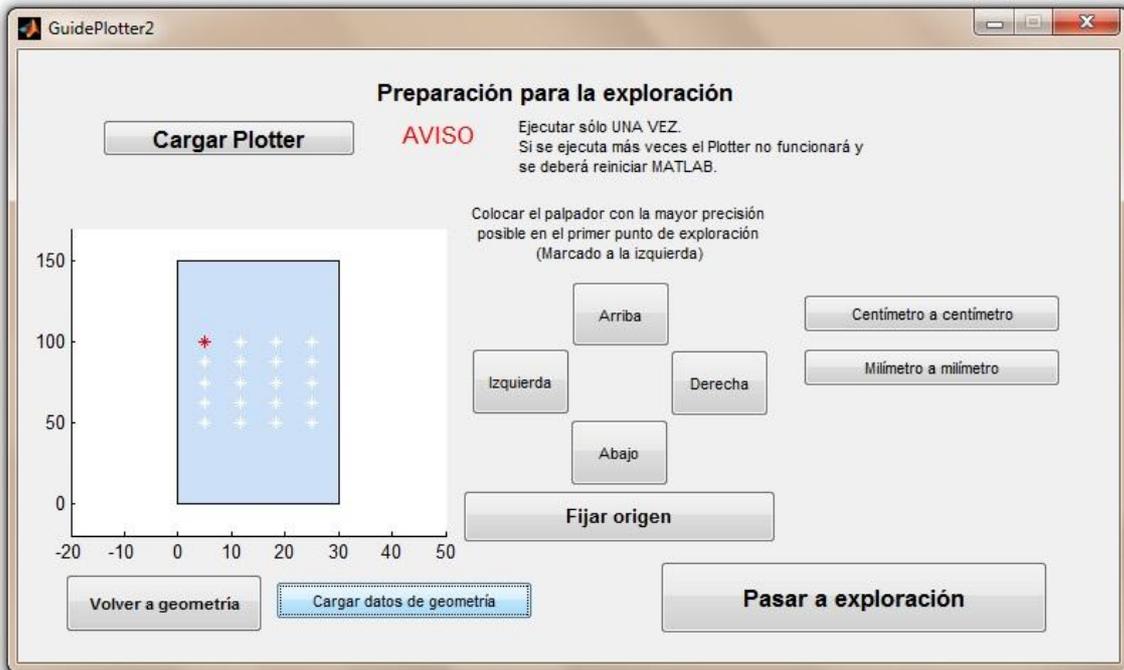
Ruta en Zig-Zag

En el primer programa se piden los datos de entrada en formularios donde se pueden introducir manualmente. El programa genera un rectángulo de puntos ordenados para recorrido en Zig-Zag centrado en la mitad de la placa. Los márgenes sirven para evitar que el palpador caiga fuera de la placa (Márgenes horizontales) y para evitar que el palpador choque con las mordazas (Márgenes verticales). Como aclaración, la coordenada X corresponde al eje horizontal, y la coordenada Y corresponde al eje vertical. Si se desea ver el resultado del cómputo de puntos, cada vez que se modifiquen los datos, se puede pulsar el botón “Calcular geometría” antes de pasar al siguiente menú.

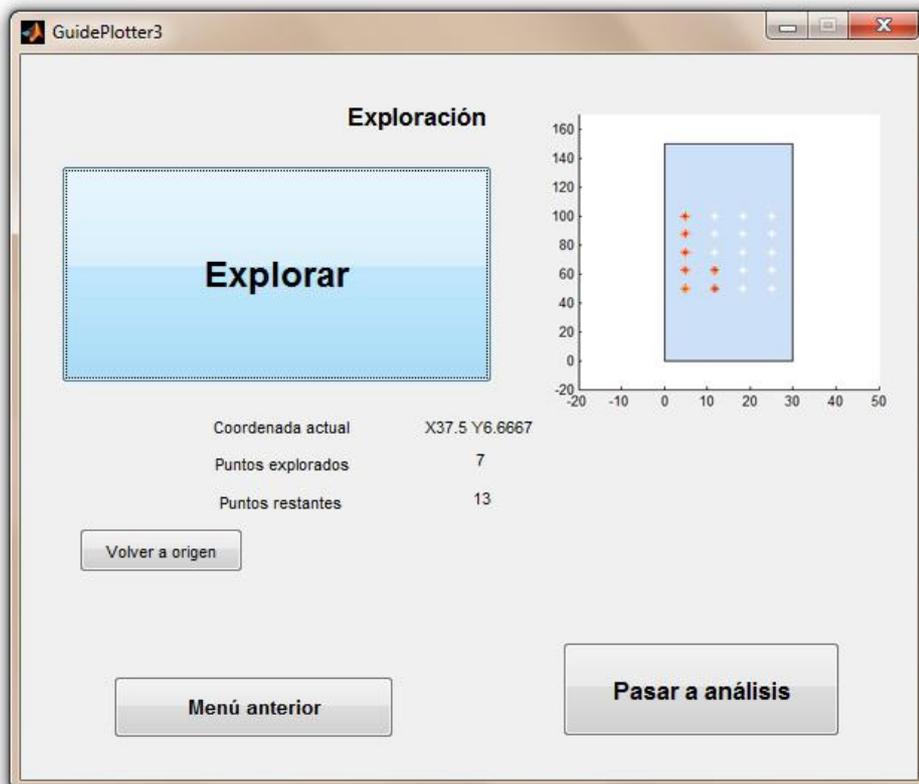


El segundo menú se emplea para calibrar el posicionamiento del plotter. Al comienzo, se debe pulsar el botón “Cargar Plotter” para establecer comunicación con el mismo. Se debe prestar atención al aviso que se incluye en la interfaz, pues cargar más de una vez el Plotter crea conflicto en MatLab, y en tal caso se debe reiniciar el programa.

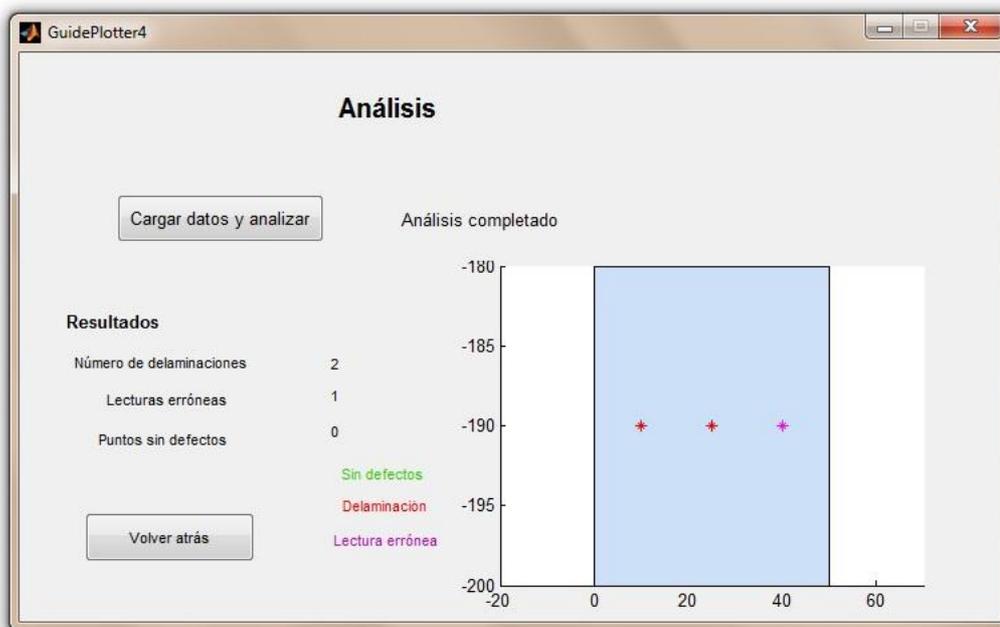
El cuadro de mandos permite mover el plotter a voluntad. Las direcciones indicadas en los botones se corresponden a mirar la placa desde la zona de contacto palpador-placa. El cuadro de mandos permite mover el plotter centímetro a centímetro, o milímetro a milímetro, cada vez que se pulsan alguna de las direcciones, con el fin de posicionar el origen de coordenadas de la forma más precisa posible. Una vez posicionado el palpador donde se indica en la figura, se pulsa “Fijar origen” para terminar la operación.



El tercer menú es sencillo. Simplemente debe pulsarse el botón “Explorar” para comenzar la exploración. Como recomendación, y a la hora de crear la macro (Que se explicara en la siguiente sección), se recomienda minimizar todas las ventanas salvo la interfaz GUIDE y el programa GageView. Acto seguido, y tal como se ha llevado a cabo en las inspecciones de este proyecto, dejar la interfaz a un lado de la pantalla, y el teclado virtual del EPOCH 1000i a otro lado de la misma, de tal manera que la Macro se realiza de forma normal para guardar los datos de inspección.

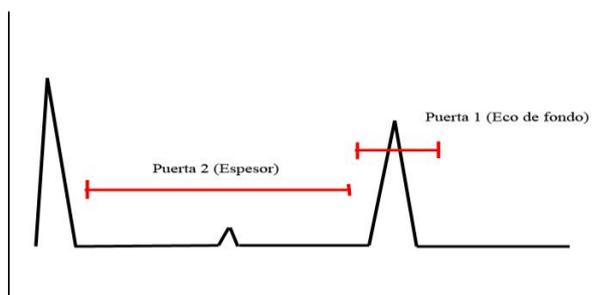


El cuarto menú también es sencillo. La única particularidad que tiene es que se debe ubicar en la carpeta del programa el archivo de datos Excel con el nombre “inspección.xlsx”⁹ (Para conocer como obtener el archivo Excel, se recomienda revisar el manual de uso de GageView, donde se pueden encontrar todos los pasos a llevar a cabo para ello). Una vez colocado el archivo en la misma carpeta que los códigos, simplemente se debe pulsar el botón “Cargar datos y analizar”, el cual ejecuta un código que está preparado para leer el archivo Excel con la cantidad de puntos que se haya calculado en el primer programa. En la interfaz se muestra el número de puntos con delaminaciones, sin defectos o con lectura (inspección) errónea. Si se desea ver el criterio seguido para evaluar el estado de cada punto, se recomienda revisar el código correspondiente en la sección “Códigos implementados” del anexo de este documento.



Respecto a este último programa es conveniente realizar una aclaración: En el EPOCH 1000i se debe colocar una puerta para medir el eco de fondo (Puerta 1) y otra para medir picos a lo largo de todo el espesor (Puerta 2). Así mismo, en la toma de datos del dispositivo, debe configurarse para que el primer dato de medición sea el valor de pico en la puerta 1, y el segundo el valor de pico en la puerta 2 (Esto aparece en el manual del EPOCH 1000i, por lo que no se considera necesario incluirlo aquí para no extender demasiado el documento).

La ubicación de las puertas tendría el siguiente aspecto:



⁹ Como ya se ha indicado en el documento, se debe colocar una puerta en el eco de fondo, y otra a lo largo del espesor, para obtener los valores de señal que se emplean en este programa. Al final de esta sección se incluye una aclaración al respecto.

Ruta circunferencial

El funcionamiento de esta interfaz es muy parecido al del programa en Zig-Zag, por lo que solo se va a hacer aclaración del primer menú, que es el que presenta más cambios.

En el primer menú del programa se muestra, al igual que en Zig-Zag, los formularios para introducir los datos de entrada. El programa calcula trayectorias circulares alrededor de un orificio central de diámetro el introducido por el usuario en la interfaz. En los formularios de exploración se pide el número de radios (Número de circunferencias concéntricas), el número de sectores (Número de puntos en cada circunferencia), y la separación en milímetros entre las circunferencias. Se ha incluido una protección en el cómputo de puntos para evitar que se puedan ubicar puntos fuera de la placa, de tal manera que aparece un aviso en pantalla indicándolo. La sección neta indicada corresponde con la sección transversal mínima existente en la placa (Área de la sección al cortar la placa horizontalmente por su centro).

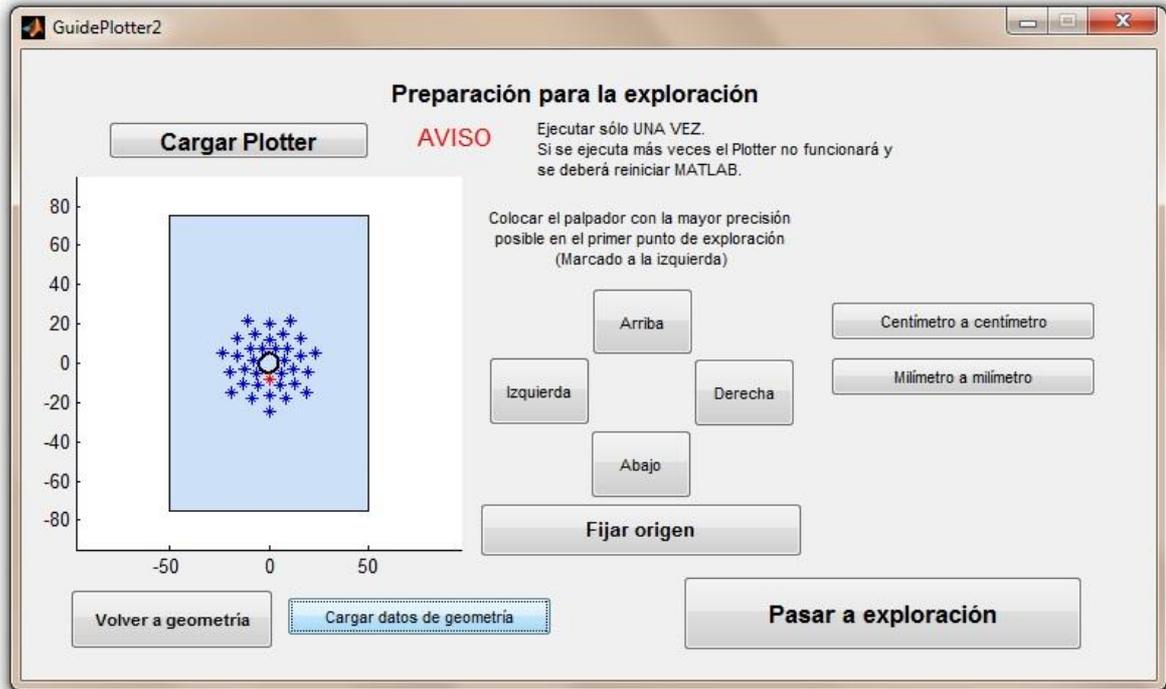
The screenshot shows the 'GuidePlotter1' application window. It features a 'Datos de entrada' (Input Data) section on the left and a plot area on the right. The input fields are as follows:

Geometría de la placa	
Ancho	50 milímetros
Alto	200 milímetros
Espesor	3.8 milímetros
Agujero	
Diámetro	10 milímetros
Exploración	
Número de radios	5
Número de sectores	6
Separación entre radios	3 milímetros

The plot area shows a rectangular plate with a central hole. The axes are labeled 'Puntos a explorar' (Points to explore) and 'Sección neta' (Net section). The 'Puntos a explorar' value is 30, and the 'Sección neta' value is 152 milímetros². The plot shows a grid of points forming a circular path around the central hole.

Buttons at the bottom include 'Calcular geometría' (Calculate geometry) and 'Guardar datos y pasar a siguiente menú' (Save data and go to next menu).

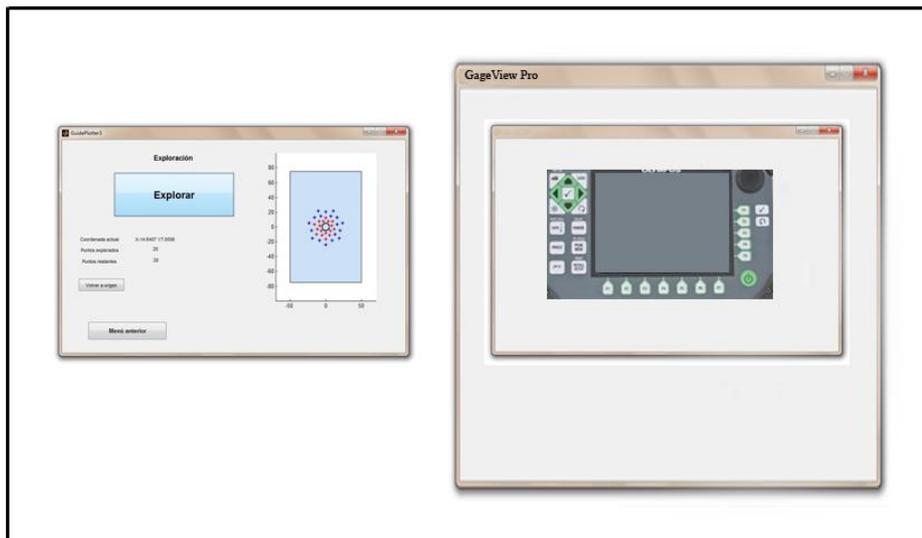
El resto de menús son muy parecidos. La única salvedad puede encontrarse en el segundo menú, donde se pide que se ubique el palpador sobre el primer punto de exploración sin presionar el palpador con las gomillas, pues al pulsar "Fijar origen", el palpador se desplaza al centro del agujero, que se fija como origen de coordenadas, y vuelve al primer punto para terminar la puesta a punto.



Como ya se ha indicado en el documento, no se ha incluido menú de análisis de datos, pues los ensayos de estas placas se centraron en obtener un gran número de serie de datos de exploración para su posterior tratamiento y análisis, por lo que no se vio necesario implementar un programa para visualizar los datos de cada exploración.

Macro

El funcionamiento del programa creador de Macros es sencillo. Previo a grabar el “click” de ratón, se recomienda ubicar la ventana de teclado virtual del EPOCH 1000i a un lado de la pantalla separado de la interfaz GUIDE:



Para acceder al teclado virtual:

- Conectar EPOCH 1000i
- Inicializar dispositivo en GageView Pro
- Entrar en herramientas del dispositivo
- Entrar en “Remote Display”

Se debe grabar una Macro de “Click” sobre el botón “SAVE” del teclado virtual.

Pasos a seguir:

- Abrir el programa Jit Bit
- Pulsar la combinación de teclas Ctrl + R (Comenzar grabación)
- Hacer click en el botón “SAVE” del teclado virtual del EPOCH 1000i
- Pulsar la combinación de teclas Ctrl + R (Parar grabación)
- Crear el archivo ejecutable con nombre “Macro.exe” (Archivo -> Compilar como ejecutable)
- Mover archivo a carpeta de código

El código grabado en la Macro puede depurarse fácilmente en la interfaz de Jit Bit. La única recomendación es no realizar una Macro muy larga, pues el programa Matlab tiene programada una pausa entre mediciones de unos 3 – 4 segundos (Perfectamente modificable), que es el tiempo del que se dispone para ejecutar la acción de guardado con la Macro.

Tablas de atenuación**Primer ensayo con 90% carga de rotura**

0	500	1000
0	82	87,4
0	91,6	92,9
0	87,4	94,6
0	79	82,1
0	94,1	94,8
0	87,2	88
0	91,2	91,6
0	93,8	96,7
0	24,7	92,8
0	94	94
0	96,1	96,1
0	56,6	73,7
0	51,1	75
0	84,4	88,3
0	86,5	93,4
0	0	73,6
0	96	96,7
0	90,4	92,2
0	24,9	48,6
0	82,1	90
0	0	69,8
0	32,7	92,1
0	95,6	98,3
0	64,8	99,6
0	92,4	92,6
0	48,3	72,9
0	66,6	75
0	0	0
0	60	82,3
0	84,2	90,9

Segundo ensayo con 90% carga de rotura

0	500	1000	1500	2000	2500	3000
0	91,4	97,6	100	100	100	100
0	96,1	96,1	97,6	97,6	97,6	97,6
0	94,2	94,2	94,2	97,3	97,3	97,3
0	81,1	88,1	95,6	95,6	95,6	97,4
0	96,3	97,7	97,7	97,7	100	100
0	97,9	97,9	98,3	98,3	100	100
0	83,9	96	97	97	100	100
0	98,1	98,1	98,1	98,1	98,1	98,1
0	95,7	95,7	95,7	97,4	97,4	97,7
0	94,2	95,7	95,7	100	100	100
0	91,5	91,5	91,5	96,6	100	100
0	93,9	94,7	94,7	98,3	98,3	100
0	42,2	63,1	89,3	89,3	98	98
0	98,2	98,2	98,2	98,2	100	100
0	97,7	97,7	98,7	98,7	98,7	100
0	70	70	89,7	89,7	89,7	98,2
0	92	92	92	93,4	96,9	96,9
0	100	100	100	100	100	100
0	88,3	88,3	89,3	89,3	94,8	94,8
0	92,9	96,2	96,2	97,7	100	100
0	96	96	96	98,4	98,7	98,7
0	60,9	71,5	86,4	88,7	88,7	93
0	85,5	85,5	85,5	85,5	88,7	88,7
0	93,8	95,3	95,3	97,9	98,5	98,5
0	66,8	68,8	71,8	72,7	72,7	72,7
0	94,5	94,5	94,5	94,5	94,5	98,5
0	94,8	97,7	97,7	97,7	97,7	100
0	57,7	73,5	87,7	92,3	93	95
0	81	81	81	81	90,7	90,7
0	90,2	91,3	91,3	94,1	97,2	97,2

80% carga de rotura

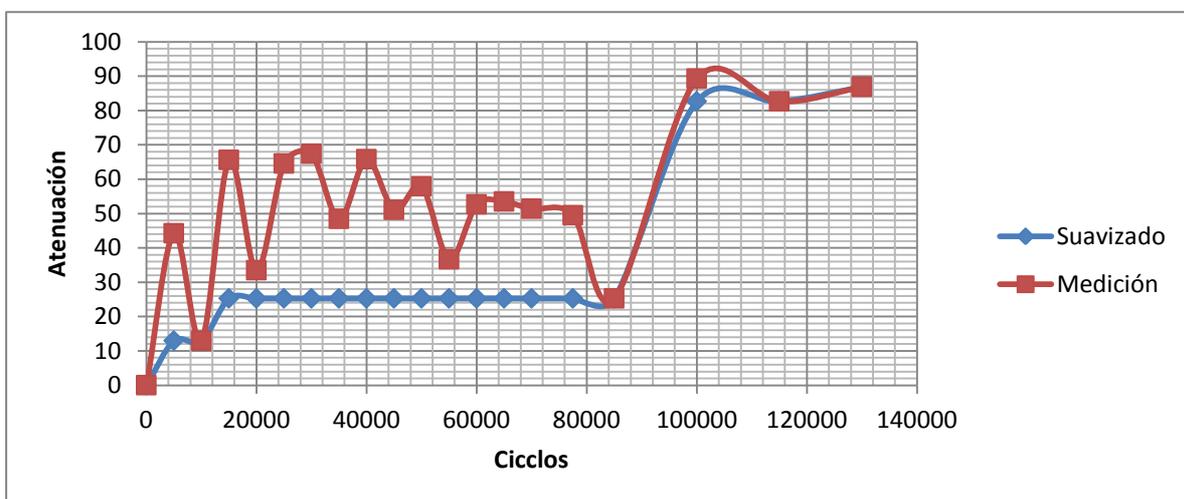
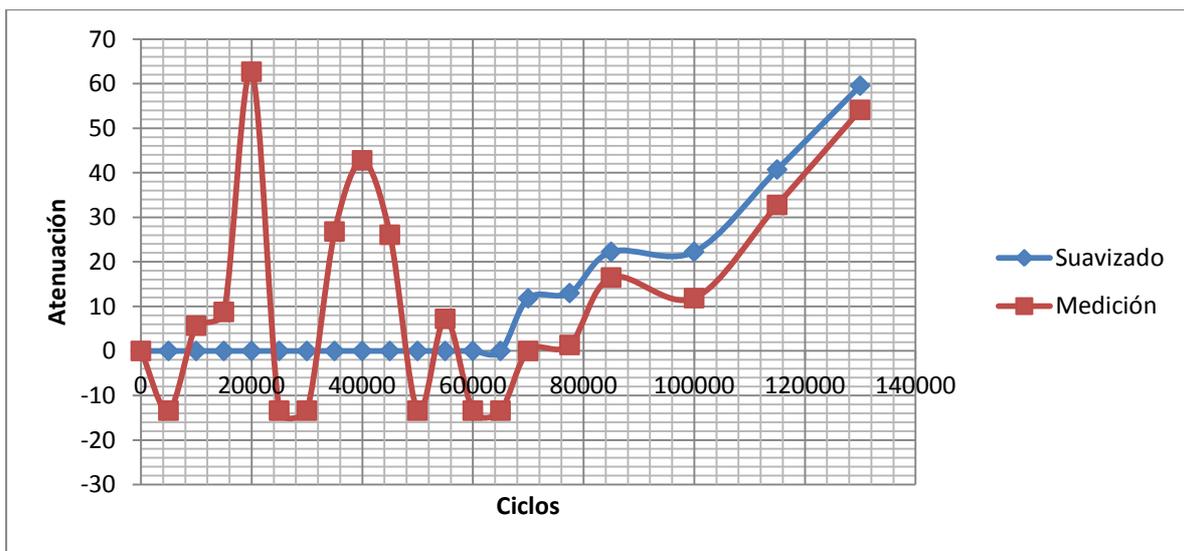
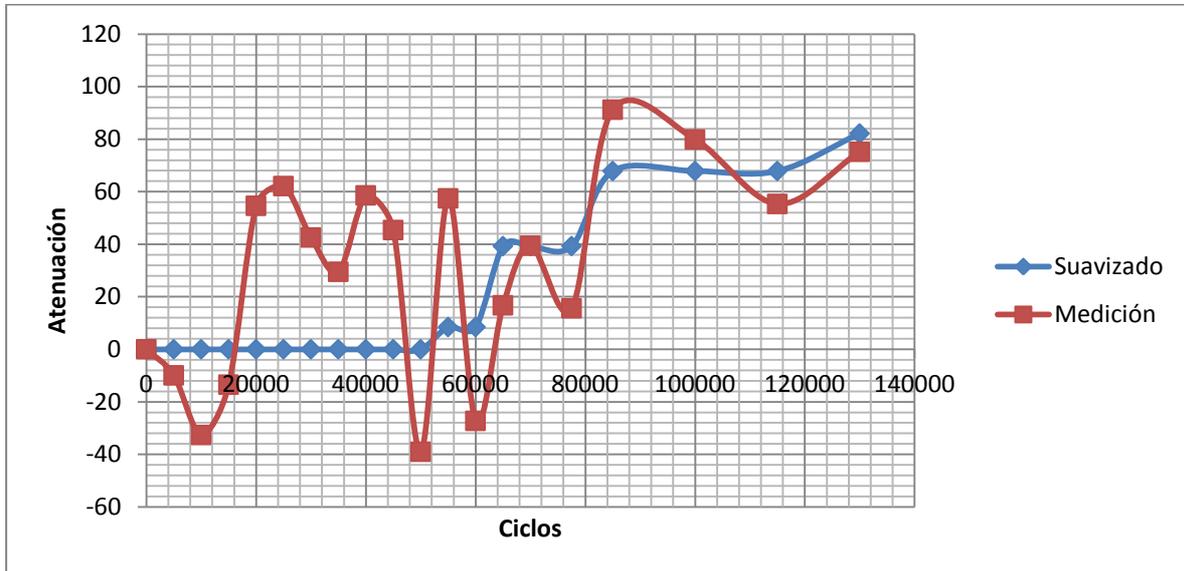
0	1000	2000	3000	4000	5000	7500	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	50000	60000	80000	100000	115000
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,7	17,5	17,5	17,5	17,5
0	82,5	82,5	87,5	90,5	90,5	90,5	90,5	90,5	90,5	90,5	90,5	90,5	90,5	90,5	90,5	90,5	90,5	92,8
0	82,6	82,6	92,6	94,6	94,6	95,3	95,3	95,3	95,3	95,3	95,3	95,3	95,3	95,3	95,3	97,8	98,5	98,5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	68,6	85,7	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8	94,3	94,3	94,3
0	72,6	72,6	72,6	72,6	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	94,2	94,2	94,2	94,2
0	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8	91,8	94	94	94	94
0	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	37,8	37,8
0	44,2	44,2	44,2	44,2	44,2	44,2	44,2	44,2	44,2	44,2	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	75,5	75,5	75,5
0	57,4	57,4	62,5	75	76,3	78,1	81,7	88,2	88,2	88,2	94,2	94,2	94,2	94,2	94,2	94,2	94,2	94,2
0	0	0	17,3	17,3	17,3	17,3	17,3	46,7	46,7	46,7	51,2	51,2	51,2	51,2	51,2	87	87,8	87,8
0	6	6	6	6	6	6	6	79,2	79,2	79,2	79,2	79,2	79,2	79,2	79,2	79,2	82	82
0	44	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6	45,6
0	0	0	0	0	0	0	0	0	18,1	41,3	41,3	56,8	56,8	58,1	58,1	58,1	58,1	58,1
0	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	36,4
0	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	14,9	21,4	51	61	61	64,2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17,9	17,9	23,7
0	18,1	18,1	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	60,6	72,7	75,7	75,7	75,7	75,7	80,6
0	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	23,7	87,1	87,1	87,1	87,1	87,1	87,1	87,1	90,9	93,2	96,9
0	32,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	63,5	63,5	63,5	63,5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	32,8	32,8	32,8
0	0	0	40	40	40	40	40	57,6	57,6	57,6	60,5	60,5	60,5	60,5	60,5	77,4	78,9	80,4
0	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	41,9	67,3	67,3	67,3	76	76	83,8	83,8	87,5	87,5
0	46,9	46,9	46,9	51,5	51,5	51,5	51,5	51,5	51,5	51,7	62,3	62,3	62,3	62,3	62,3	62,3	62,3	62,3
0	0	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3	12,7
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	23,4	23,4	23,4	23,4	25,8	26,8
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,4	4,4	4,4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20,4	42	42	68,5	74,6
0	49,2	49,2	60,7	63	63	63	63	63	63	63	63	63	79,2	79,2	79,2	89,2	89,2	94,6

70% carga de rotura

0	5000	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	55000	60000	65000	70000	77500	85000	100000	115000	130000	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14,3	28,9	28,9	54,5	54,5	54,5
0	27,5	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	86,6	87,3	95,3
0	8,6	8,6	8,6	8,6	92,5	92,5	92,5	92,5	92,5	92,5	92,5	92,5	92,5	92,5	92,5	92,5	92,5	92,5	92,5	92,5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	43,9
0	57,1	57,1	57,1	58,4	58,4	81,4	83,9	89,5	89,5	89,5	89,5	89,5	89,5	92,8	92,8	92,8	92,8	92,8	92,8	95,4
0	26,8	26,8	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3	75,7	75,7	85
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30,7	30,7	42,5
0	12	12	43,1	43,1	43,1	43,1	43,1	43,1	43,1	43,1	43,1	43,1	43,1	43,1	43,1	43,1	43,1	79,1	79,1	90,4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42,8	42,8	42,8	42,8	42,8	42,8	42,8	42,8	52,3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8,4	8,4	39,2	39,2	39,2	67,8	67,8	67,8	67,8	82,1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	18,1	91,3	91,3	93,6
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8,1	75,9	80,2	84,3	84,3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,7	3,6	55,7	55,7	55,7	55,7
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11,3	11,3	11,3	17	17	61,5	61,5	72	72
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22,2	22,2	28,1	28,1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11,8	13	22,2	22,2	40,7	59,5	59,5
0	0	0	0	0	0	1,1	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	4	10,9	10,9	10,9	72	72	72	72
0	12,9	12,9	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	25,2	82,6	82,6	86,8	86,8
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	28	55,7	55,7
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,8	64,8	64,8	64,8	64,8
0	5	5	5	5	5	20	20	20	20	20	61	61	61	61	61	61	61	69,8	69,8	69,8
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	40	40	40	40	82	90	96,8	96,8
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50,4	50,4	50,4	50,4	86,8	86,8	94,5	94,5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45,7	45,7	91,3	91,3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15,2	15,2	30,2	30,2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	83,6	83,6	89,8	89,8
0	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	32,2	62,7	62,7	62,7	62,7	62,7	62,7	62,7	62,7
0	0	0	0	0	0	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	28,7	28,7	28,7	45,3	45,3	45,3	71,7	81,5	90	90
0	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	59,1	59,1	59,1	59,1	59,1	66,6	66,6	66,6	66,6	66,6	66,6	88,7	92,8	96,9	96,9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	40,2	58,6	58,6	58,6	63,6	63,6	93,1	93,1

Nota: Las filas se corresponden con el orden de los puntos de exploración

Nota: Suavizado de datos (Se incluye en el apartado “Códigos). Algunos ejemplos del suavizado:



Códigos

Calculador de coordenadas programa Zig-Zag:

```
load('Datos')
%% Definición de las coordenadas de los puntos de exploración
coordx=linspace(margenV,alto-margenV,nx);
coordy=linspace(margenH,ancho-margenH,ny);

%% Definición de puntos de exploración en coordenadas absolutas
% Definimos el vector 'puntos' para poder graficar después resultados en 2D
puntos=zeros(nx*ny,2);
n=0;
avance=1; % Variable para ordenar en Zig-Zag
for i=1:ny
    puntoy=coordy(i);
    if avance>0
        for j=1:nx
            n=n+1;
            puntox=coordx(j);
            puntos(n,1:2)=[puntox,puntoy];
        end
    else
        for j=1:nx
            n=n+1;
            puntox=coordx(nx+1-j);
            puntos(n,1:2)=[puntox,puntoy];
        end
    end
    if i~=ny
        avance=avance*(-1);
    else
        end
end
puntosG(:,1)=puntos(:,1)-puntos(1,1); % Corrección de coordenadas
puntosG(:,2)=puntos(:,2)-puntos(1,2);
puntosG(:,1)=x;
puntosG(:,2)=y;
puntosG(:,1)=-y;
```

```
puntosG(:,2)=-x;
save('Puntos.mat','puntos','coordx','coordy','puntosG')
```

Calculador de coordenadas programa Circunferencial:

```
load('Datos')
% Datos placa
clc
% ancho
% alto
% radioor (Radio del orificio)
radioor=diamor/2;
dpalp=6.5;

%
% % Datos exploración
% ntetha
% nrho
ntetha=ntetha+1;

haces=linspace(0,360,ntetha)/180*pi;

i=0;
j=0;
l=-1;
for r=radioor+dpalp/2:sep:radioor+dpalp/2+(nrho-1)*sep
    l=l*(-1);
    j=j+1;
    if l==1
        for k=1:length(haces)
            angulo=haces(k)
            i=i+1;
            x=r*cos(angulo);
            y=r*sin(angulo);
            puntos(i,1)=x;
            puntos(i,2)=y;

        end
    else
        for k=1:length(haces)
```

```

    angulo=haces (k)+(haces (2)-haces (1))/2; % Desfase entre radios

    i=i+1;
    x=r*cos(angulo);
    y=r*sin(angulo);
    puntos(i,1)=x;
    puntos(i,2)=y;
end
end
end
% X=-Y (Corrección de coordenadas)
% Y=-X
puntosplot(:,1)=-puntos(:,2);
puntosplot(:,2)=-puntos(:,1);
%
for i=1:length(puntos)
    modulos(i)=sqrt(puntos(i,1)^2+puntos(i,2)^2)
end

save('Puntos.mat','puntosplot','puntos','modulos')

```

Bucle de envío de ordenes programa Zig-Zag:

```

for i=1:nx*ny
system('Macro.exe') % Ejecución de la macro para guardar punto de exploración

fprintf(plotter,['X',num2str(puntosG(i,1)),'Y',num2str(puntosG(i,2))])

    coordact=['X',num2str(puntosG(i,1)),' Y',num2str(puntosG(i,2))];
    set(handles.coordenada,'String',coordact)
    set(handles.explorados,'String',i)
    set(handles.restantes,'String',length(puntos)-i)
plot(puntosplot(i,1),puntosplot(i,2),'*r')
pause(3)
end
set(handles.conclusion,'String','EXPLORACIÓN FINALIZADA')

```

Bucle de envío de órdenes programa Circunferencial:

```

for i=1:nrho*ntheta
system('Macro.exe') % Ejecución de la macro para guardar punto de exploración

    modulo1=sqrt((puntos(i,1))^2+(puntos(i,2))^2);
    modulo2=sqrt((puntos(i-1,1))^2+(puntos(i-1,2))^2);
    if i<length(puntos)
    modulo3=sqrt((puntos(i+1,1))^2+(puntos(i+1,2))^2);
    end

    if abs(modulo3-modulo1)>TOL
% Para evitar repetir puntos
% La tolerancia se establece dado que a veces se calculan ceros que MatLab los
computa como un número de orden muy pequeño (10 elevado a menos 15 o menos 16) y
puede dar lugar a errores
    else
        if abs(modulo1-modulo2)>TOL
fprintf(plotter,['G03','X',num2str(puntos(i,1)),'X',num2str(puntos(i,2)),
'I',num2str(-puntos(i-1,1)),'J',num2str(-puntos(i-1,2))])
        coordact=['X',num2str(puntos(i,1)),'Y',num2str(puntos(i,2))];
        set(handles.coordenada,'String',coordact)
        set(handles.explorados,'String',i)
        set(handles.restantes,'String',length(puntos)-i)
        pause(2)
        else
        if puntos(i,1)<1e-12 && puntos(i,1)>-1e-12
            puntos(i,1)=0;
        elseif puntos(i,2)<1e-12 && puntos(i,2)>-1e-12
            puntos(i,2)=0;
        end
fprintf(plotter,['G03','X',num2str(puntos(i,1)),'X',num2str(puntos(i,2)),
'I',num2str(-puntos(i-1,1)),'J',num2str(-puntos(i-1,2))])
        coordact=['X',num2str(puntos(i,1)),'Y',num2str(puntos(i,2))];
        set(handles.coordenada,'String',coordact)
        set(handles.explorados,'String',i)
        set(handles.restantes,'String',length(puntos)-i)

pause(3)

```

```

end
plot(puntosplot(i,1),puntosplot(i,2),'*r')
end
end
set(handles.conclusion,'String','EXPLORACIÓN FINALIZADA')

```

Análisis de datos programa Zig-Zag:

```

load('Datos.mat')
load('Puntos.mat')
% Lo que se hará será emplear 3 medidas
% Teniendo en cuenta la disposición en EXCEL:
%%% 1) Porcentaje de señal en PUERTA1 -> Corresponde con intensidad de
%%% señal en el pico de fondo. Se utilizará como señal de referencia de que se
ha
%%% producido una delaminación
%%% 2) Porcentaje de señal en PUERTA 2 -> Valor de pico en mitad del
%%% espesor. Se recomienda estudiar delaminaciones en probetas parecidas
%%% para ver el valor de pico que suele alcanzarse en zonas intermedias
%%% del espesor
%%% 3) Espesor en PUERTA 2 -> Distancia desde el palpador donse se ha producido
un pico en
%%% mitad de la probeta (Delaminación)

% Lectura del archivo EXCEL
% [NUM,TXT,RAW]=xlsread('inspeccion.xlsx');

% % Se coge uno de los valores de interés
% numero=RAW(10,4);
% % Se quita el formato celda y pasamos a string
% numero=cell2mat(RAW(10,4));
% % Se convierte a número para poder manipular y analizar
% numero=str2num(numero);

load('Datos.mat')
[NUM,TXT,RAW]=xlsread('inspeccion.xlsx');

% La matriz analisis incluye
% Columna 1 y 2: Coordenadas de los puntos
% Columna 3: Porcentaje de señal en PUERTA 1
% Columna 4: Porcentaje de señal en PUERTA 2

```

```

% Columna 5: Espesor en PUERTA 2
% Columna 6: Valoración de la exploración en ese punto:
%% 0 - Lectura errónea
%% 1 - Sin defectos
%% 2 - Delaminación
 analisis=puntos;
for i=1:nx*ny
    % Medida 1 (Porcentaje en PUERTA 1)
    numero=cell2mat(RAW(9+i,4));
    numero=str2num(numero);
    analisis(i,3)=numero;
    % Medida 2 (Porcentaje en PUERTA 2)
    numero=cell2mat(RAW(9+i,6));
    numero=str2num(numero);
    analisis(i,4)=numero;
    % Medida 3 (Espesor en PUERTA 2)
    numero=cell2mat(RAW(9+i,8));
    numero=str2num(numero);
    analisis(i,5)=numero;
end

% 'min' Mínimo valor de señal para considerar que se está produciendo una
% lectura correcta
% 'ValorFondo' Valor medio de referencia de señal en el eco de fondo
% 'TOL' Tolerancia de variación de señal de fondo para considerar que se
% pierde eco por la existencia de algún defecto

min=10;
ValorFondo=80;
TOL=0.2;
delam=0;
correct=0;
errores=0;
for i=1:nx*ny
    error=0;
    % Se comprueba primero si la lectura ha sido errónea mirando si no hay
    % ningun pico en ninguna de las puertas
    if analisis(i,3)<min && analisis(i,4)<min
        analisis(i,6)=0;
    end
end

```

```
errores=errores+1;
error=1;
end
% Si en la PUERTA 2 hay un pico notable, se considera delaminación
if error==0
    if analisis(i,4)>min || abs((analisis(i,3)/ValorFondo)-1)>TOL
        analisis(i,6)=2;
        delam=delam+1;
    else
        analisis(i,6)=1;
        correct=correct+1;
    end
end
end

save('Resultados.mat')
```

Suavizado de datos:

% Este cómputo simplemente considera que, de dos mediciones simultáneas, la mayor de las dos es la medición válida, pues si después de someter la placa a fatiga se mide un eco mayor, eso implica que la medición anterior no se realizó correctamente, y por tanto la primera pasa a tener el valor de la segunda. Con ello, se consigue un suavizado de los datos, obteniendo atenuaciones que aumentan siempre al aumentar el número de ciclos. El valor inicial también puede verse modificado.

```
N=[]; % Número de ciclos
M=[]; % Número de puntos
for j=1:M
    for i=1:N
        a(j,i)=max(a(j,i:N)); % "a" es la matriz de mediciones con los datos brutos.
    end
end
```