ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto / Trabajo Fin de Carrera

## SIMULACIÓN DE LA PROPAGACIÓN ULTRASÓNICA EN PIEZAS METÁLICAS PARA SU APLICACIÓN EN LA DETECCIÓN DE DEFECTOS

# (Simulation of ultrasonic propagation in metallic parts for application in detection of defects)

Para acceder al Titulo de

## INGENIERO TÉCNICO INDUSTRIAL ESPECIALIDAD ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

Autor: Javier Domínguez Ortega

Julio-2013

### Agradecimientos.

Ante todo agradecer a mis dos magníficas tutoras, <u>Cristina Rodríguez González</u> <u>y Mónica Fernández Moreno</u>. Son dos soberbias profesoras, y mejores personas, sin cuya infinita paciencia, extraordinario buen hacer y exquisita dedicación, este proyecto jamás hubiera llegado a buen puerto. Siempre atentas, fueron más allá de lo que se le puede pedir a un tutor, recibiéndome ante cualquier necesidad con una sonrisa, incluso cuando hubiera sido más práctico arrearme en la cabeza con un bate de béisbol. Cualquier palabra aquí escrita nunca podrá expresar suficientemente bien lo increible que ha sido trabajar junto a ellas.

A todos aquellos, familia, amigos e incluso algún desconocido, a los que he vuelto locos con mis dudas y crisis. A todos vosotros, si no os he agradecido todo lo bueno que hacéis por mi hasta ahora, es que no merezco vuestro cariño.

## Parte I ÍNDICE

## Índice general

Ι	ÍN	DICI	$\mathbf{T}$	3
II	$\mathbf{N}$	IEMO	DRIA	8
1.	Intr	oducci	ión	9
	1.1.	Justifi	cación	9
	1.2.	Objeti	ivos	10
2.	Esta	ado de	l Arte	11
	2.1.	Ensay	os No Destructivos	11
		2.1.1.	Definición	11
		2.1.2.	Historia de los END. $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$	12
		2.1.3.	Campos de aplicación de los END	14
			2.1.3.1. Evaluación de calidad: $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$	14
			2.1.3.2. Evaluación de vida: $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$	14
		2.1.4.	Propósito de los END	15
		2.1.5.	Calidad de los END	17
			2.1.5.1. Rendimiento de la inspección	17
			2.1.5.2. Balance económico	18
			2.1.5.3. Fiabilidad y probabilidad de detección	18
		2.1.6.	Normas y certificaciones de los END	19
		2.1.7.	Tipos de END. $\ldots$	20
		2.1.8.	Características de los métodos de END más usuales	20
			2.1.8.1. Ensayo radiográfico	21
			2.1.8.2. Ensayo ultrasónico	22
			2.1.8.3. Ensayo de Partículas Magnetizables	22
			2.1.8.4. Ensayo termográfico	23
			2.1.8.5. Ensayo de líquidos penetrantes	25
			2.1.8.6. Ensayo por corrientes inducidas o de Eddy. $\ldots$	26
			2.1.8.7. Ensayo visual	27
	2.2.	Ultras	onidos	27

		2.2.1.	Definición		
		2.2.2.	Historia de los ultrasonidos	28	
2.2.3. Propiedades de las ondas ultrasónicas			Propiedades de las ondas ultrasónicas	29	
			2.2.3.1. Parámetros comunes de las ondas	29	
			2.2.3.2. Parámetros dependientes del medio de propagación.	30	
		2.2.4.	Rango de frecuencias	30	
		2.2.5.	Tipos de ondas ultrasónicas	31	
	2.3.	Propag	gación Ultrasónica en Sólidos	32	
		2.3.1.	Comportamiento en superficies límite.	32	
			2.3.1.1. Incidencia normal	33	
			2.3.1.2. Incidencia angular.	33	
		2.3.2.	Mecanismos de atenuación.	34	
			2.3.2.1. Dispersión	34	
			2.3.2.2. Absorción	35	
			2.3.2.3. Interferencia	35	
			2.3.2.4. Otros factores	35	
	2.4.	Evalua	ación No Destructiva con Ultrasonidos	36	
	2.4.1. Principios				
		2.4.2.	Generación de ondas	36	
			2.4.2.1. Efecto piezoeléctrico	36	
			2.4.2.2. Efecto magnetoestrictivo	37	
		2.4.3.	Haz ultrasónico.	37	
			2.4.3.1. Zona muerta	38	
			2.4.3.2. Zona de campo cercano	38	
			2.4.3.3. Zona de campo lejano	38	
		2.4.4.	Tipos de ensayos	38	
		2.4.5.	Palpadores	41	
		2.4.6.	Equipos de exploración	42	
	2.5.	Softwa	re de Simulación	42	
9	Mat	adalaa	ría da Trabaja	16	
J.	2 1	Matori	ial Evaminada	40	
	J.1.	2 1 1	Propiedades del material	40	
		3.1.1.	Probata experimental	40	
	<u> </u>	Captu	ra experimental de geopulses	41	
	J. <u>4</u> .	Captu 201	Fauipo de captura ultrasónica	40 /18	
		J.⊿.⊥. २ ე ე	Equipo de captura utrasonica.		
	2 2	J.Z.Z.	.2. Proceso de captación de datos		
	ა.ა.	51111118 2 2 1	Simulación modiente COMSO	50 51	
		J.J.T.		91	

		3.3.2.	Simulación mediante MATLAB	60	
4. Resultados 71					
	4.1.	Ensay	nsayos experimentales.		
		4.1.1.	Material libre de defectos.	71	
		4.1.2.	Material con defectos.	71	
			4.1.2.1. Comparativa de defectos	72	
	4.2.	Result	ados de la simulación.	73	
		4.2.1.	Resultados frente a defectos con la misma forma pero dis-		
			tintas dimensiones.	73	
			4.2.1.1. Defectos de tipo cuadrangular	73	
			4.2.1.2. Defectos de tipo circular	74	
		4.2.2.	Resultados frente a defectos del mismo tamaño pero dife-		
			rente forma	77	
			4.2.2.1. Defectos de tamaño 1 mm	78	
			4.2.2.2. Defectos de tamaño 2 mm	79	
			4.2.2.3. Defectos de tamaño 3 mm	80	
			4.2.2.4. Defectos de tamaño 4 mm	81	
			4.2.2.5. Defectos de tamaño 5 mm	82	
5	Δné	licic v	Discusión do Rosultados	83	
9.	5.1	Result	ados experimentales	83	
	5.1.	Result	ados experimentales.	84	
	0.2.	rtoburt		01	
6.	Con	nclusio	nes	86	
7.	Líne	eas de	trabajo futuro	87	
тт	тт	PT.AN	JOS	88	
11	1 1			00	
тт	7 <b>T</b>			00	
1 \		PLIE(	<b>GO DE CONDICIONES</b>	90	
8.	Plie	ego de	condiciones	91	
	8.1.	Descri	pción del estudio.	91	
	8.2.	Prescr	ipciones técnicas	91	
	8.3.	Revisi	ón de precios	92	
	8.4.	Verific	ación y funcionamiento	92	
	8.5.	Seguri	dad e higiene	92	
	8.6.	Dispos	siciones aplicables.	92	

## V PRESUPUESTO

9.	Presupuesto			
	9.1.	Presu	puesto de realización del proyecto.	95
		9.1.1.	Mano de obra	95
		9.1.2.	Materia prima.	95
		9.1.3.	Puesto de trabajo.	96
	9.2.	Presu	ouesto de comercialización del proyecto	98

## VI BIBLIOGRAFÍA

**99** 

## Parte II MEMORIA

## Capítulo 1

## Introducción

#### 1.1. Justificación

Desde que se crearon los primeros procesos industriales, se hizo necesario analizar las calidades de los bienes fabricados. Pronto se constató que, usando unos métodos de análisis cualitativos convencionales, se producía un continuo malgasto de recursos, al provocar que aquellos materiales analizados quedasen inutilizados para su uso posterior.

Es por esto que fue necesario desarrollar los ensayos no destructivos. Se trata de técnicas que permiten la exploración interna de los materiales sin que se modifiquen sus propiedades y sin perder las características que los hacen útiles.

Se han desarrollado diversas técnicas de ensayos no destructivos, entre las que destaca la ultrasónica debido a la facilidad de su manejo, a sus múltiples aplicaciones y a su rentabilidad económica. Además permite la inspección in situ de los materiales.

La metodología de trabajo consiste en la detección de discontinuidades en el interior del material y la identificación de sus características (tamaño, forma, posición) mediante la lectura de la señal reflejada por el ultrasonido a través del material (ecopulso), una vez conocida la señal que se obtiene del material libre de defectos. Comparando ambas señales y aplicándoles distintas técnicas de reconocimiento, y basándose en su amplitud y su dependencia con el tamaño, se puede establecer una relación entre los defectos y las correspondientes amplitudes y anchos de los ecopulsos. De esta forma, se obtienen distintos clasificadores que proporcionan una caracterización de las heterogeneidades en cuanto a morfología, posición, profundidad o tamaño.

Para el desarrollo y análisis de los clasificadores es necesario obtener piezas de ensayo denominadas probetas, que se realizan del mismo material que se está examinando y en las cuales se inducen una serie de defectos artificiales (cilíndricos, esféricos, circulares) que se asemejan lo más posible a defectos naturales (poros, grietas). La utilización de las probetas se hace imprescindible para obtener el patrón de ecopulsos correctos. Es decir, la forma de los ecos resultantes de un ensayo en el que la pieza puede considerarse válida. Sin embargo, dependiendo del tamaño de la pieza que se quiere examinar y del tamaño de los defectos que se quieren detectar, las probetas pueden ser muy difíciles de elaborar y, según el material objeto de estudio, ser realmente costosas.

Para abaratar el estudio y caracterización de los defectos con distintos clasificadores la solución propuesta es utilizar un software de análisis y resolución de elementos finitos para ver si es viable simular el proceso de inspección de materiales con ultrasonidos. Para ello hay que comparar los resultados simulados con resultados experimentales y obtener, si existiese, una correlación entre ambos que permitiese la creación de modelos que permitan la supresión de la necesidad de las probetas.

Por un lado se disponen de varias probetas con defectos de distintas formas y tamaños localizados a diferentes profundidades que se analizarán empíricamente utilizando los ecopulsos obtenidos a unas posiciones concretas que se adquieren con el equipo de captura ultrasónica USLT2000 de Krautkramer. Por otro lado, se simularán las mismas probetas capturando los ecopulsos en las mismas posiciones. Posteriormente se compararán los ecopulsos de las probetas simuladas con los debidos a probetas experimentales para estudiar la viabilidad de esta técnica.

Si los resultados experimentales son similares a los obtenidos mediante la simulación se favorecerá el desarrollo e implementación de clasificadores que sean capaces de caracterizar las heterogeneidades detectadas abaratando los costes del estudio.

#### 1.2. Objetivos

Debido a todo lo anterior, el propósito del proyecto consiste en demostrar que la simulación de la propagación ultrasónica en sólidos, mediante el software de modelización COMSOL, es de utilidad para estudiar el diseño de clasificadores que facilite la inspección de materiales. El procesado de datos y su posterior clasificación se realiza con el software matemático MATLAB.

## Capítulo 2

## Estado del Arte

#### 2.1. Ensayos No Destructivos.

En este apartado se desarrollarán los aspectos necesarios para entender qué es un Ensayo No Destructivo, la finalidad y los beneficios que conllevan, así como los distintos tipos de END. Este apartado estará desarrollado a partir de las referencias bibliográficas [1, 2, 4, 5, 6, 7, 8].

#### 2.1.1. Definición.

Los ensayos no destructivos (de aquí en adelante END o en inglés, NDT de non destructive testing), tal y como indica su nombre, son ensayos para la evaluación de propiedades, ubicación de discontinuidades, etc que se realizan sin producir marcas y sin destruir la pieza, o sea, no quitando aptitud para el servicio al objeto de ensayo. Esto es, se trata de una evaluación de la calidad de una pieza sin producir daños que luego puedan evitar que ésta sea aprovechada para el uso para el que fue fabricada.

Esto significa que se denominará como END a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Los ensayos no destructivos deben implicar un daño imperceptible o nulo. Los diferentes métodos de ensayos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no implique un daño considerable a la muestra examinada.

Estos métodos por tanto son ensayos tecnológicos utilizados en el control de calidad y seguridad de materiales, aparatos y estructuras. En general los ensayos no destructivos proveen datos menos exactos acerca del estado de la variable a medir que los ensayos destructivos. Sin embargo, suelen ser más baratos para el propietario de la pieza a examinar, ya que no implican la destrucción de la misma. En ocasiones los ensayos no destructivos buscan únicamente verificar la homogeneidad y continuidad del material analizado, por lo que se complementan con los datos provenientes de los ensayos destructivos.

Los principales tipos de END son el ensayo visual (EV), el ensayo radiográfico (ER), el ensayo ultrasónico (US), el ensayo magnético (EM), el ensayo termográfico (ET), el ensayo con líquidos penetrantes (LP), ensayo por corrientes inducidas (CI) y el ensayo por medición de tensiones (MT). La selección de cada método de ensayo depende del propósito que se busque, por lo que será necesario seleccionar entre ellos el que mejor se adapte para cada caso, aplicando el procedimiento adecuado.

#### 2.1.2. Historia de los END.

Los principios físicos aplicados en los END datan del siglo XIX. Se tiene registro desde 1868 cuando se comenzó a trabajar con campos magnéticos. En 1879, el físico David Edward Hughes estableció un campo de prueba y estudio las Corrientes Inducidas o de Eddy. En 1895 Wilhelm Rontgen estudió el tubo de rayos catódicos descubriendo los rayos X. En 1896, Henri Becquerel descubrió los rayos Gamma que es una radiación electromagnética mucho mas energética que la luz visible o los rayos X.

No fue hasta el siglo XX cuando se desarrollaron técnicas no destructivas aplicadas a la producción en serie. En 1900 se comenzó a usar una nueva técnica para analizar ruedas y ejes de ferrocarril y así detectar grietas superficiales. Para ello se desarrolló el siguiente método: las piezas se sumergían en aceite, seguidamente se limpiaban y se esparcía polvo sobre ellas. Cuando una grieta estaba presente, el aceite que se había filtrado en la discontinuidad mojaba el polvo que se había esparcido, indicando que el componente estaba dañado en ese punto. Esta aplicación dio pie al desarrollo de esta nueva técnica con la búsqueda de nuevos aceites para mejorar la inspección de los ferrocarriles y para tener uso con otras aplicaciones. De esta manera nació la inspección por líquidos penetrantes (LP).

Con el avance de los procesos de producción, la detección de discontinuidades ya no era suficiente. Era necesario también contar con información cuantitativa sobre el tamaño de la discontinuidad, para utilizarla como fuente de información, con el fin de realizar cálculos matemáticos y poder predecir así la vida mecánica de un componente. Estas necesidades, condujeron a la aparición de la Evaluación No Destructiva (Non Destructive Evaluation, NDE en sus siglas en inglés) como nueva disciplina.

A raíz de esta revolución tecnológica comenzarían a darse los pasos en el

campo de las pruebas no destructivas que terminarían estableciendo su condición actual. En 1911 se estableció un comité para la técnica de partículas magnéticas. En 1928 se perfeccionó dicha técnica para su uso industrial. En 1930 Theodore Zuschlag patentó las Corrientes de Eddy y, tan solo un año mas tarde, apareció el primer sistema industrial de Corrientes de Eddy. En 1937 Sergei Sokolov utiliza por primera vez la técnica ultrasónica de pulso-eco sin fines militares. Fue durante el resto de los años 30 cuando creció el uso de las pruebas por ultrasonido demostrando que las ondas ultrasónicas se reflejan tanto en defectos ocultos como en los límites de los materiales examinados. En 1941 aparece la técnica de líquidos fluorescentes. En ese mismo año se funda la Sociedad Americana para Ensayos No Destructivos (ASNT por sus siglas en inglés), la cual es actualmente la sociedad técnica más grande en el mundo de pruebas no destructivas. Esta sociedad promueve el intercambio de información técnica sobre las PND, así como de materiales educativos y programas. Es también creadora de estándares y servicios para la Calificación y Certificación de personal que realiza ensayos no destructivos, bajo el esquema americano. En 1945 el investigador estadounidense Floy Firestone patentó el reflectoscopio supersónico, considerado como el primer detector de fallas comercial y que utilizaba la técnica pulso-eco. De esta manera, se demostró que estudiando la propagación de las ondas ultrasónicas a través de materiales sólidos, se pueden detectar grietas ocultas, porosidades y otras discontinuidades internas además de utilizarse para medir el espesor del material y analizar sus propiedades. En 1947 el Dr. Elmer Sperry fue el primero en aplicar los ultrasonidos en la industria en los procesos de fabricación y durante la vida en servicio de los materiales, especialmente para analizar soldaduras y metales estructurales. Durante la década de 1950 diversos investigadores japoneses fueron pioneros en el uso de ultrasonidos para diagnóstico médico con el uso de equipos que proporcionaban imágenes bidimensionales. Entre los años 1960 y 1970 empresas punteras dedicadas a la detección de fallas (Panametrics, Staveley y Harisonic) construyeron una serie de equipos detectores y medidores para la detección de fallas con ultrasonidos. Estas empresas forman parte actualmente de Olympus NDT. También durante estos años se desarrollaron las primeras versiones de escáneres médicos para la detección de tumores y cálculos biliares. También se introdujeron los primeros medidores de espesores de precisión que también se utilizaron como medidores de corrosión en tubos metálicos y tanques. Desde 1980 hasta la actualidad los equipos ultrasónicos se han fundamentado en señales digitales y técnicas de procesado de señal, lo cual ha derivado en una nueva generación de instrumentos portátiles de pequeño tamaño y altamente fiables, que usan imágenes acústicas para detección de heterogeneidades y cálculo de espesores.

La globalización en los mercados mundiales ha marcado el desarrollo de los ensayos no destructivos, los cuales tienen ya un alcance en cada rincón del planeta, y actualmente existen sociedades de ensayos no destructivos en la mayoría de los países.

#### 2.1.3. Campos de aplicación de los END.

Cuando se quieren aplicar END, hay que tener en cuenta las siguientes dos limitaciones:

- No se puede obtener directamente la resistencia de materiales con END. Sin embargo se puede obtener de antemano los datos a través de ensayos destructivos, tales como ensayos de tracción, ensayo de plegado, ensayos de fatiga o ensayos de tenacidad a la fractura, para luego comparar los resultados obtenidos por END con los obtenidos por ensayos destructivos y realizar la evaluación.
- 2. Para comparar los datos obtenidos en dos momentos diferentes de la vida útil de un componente deben usarse siempre los mismos métodos y técnicas de END, de otra forma los resultados de la evaluación pueden ser erróneos.

Las principales aplicaciones de los END son:

#### 2.1.3.1. Evaluación de calidad:

La inspección durante la manufactura de los materiales, aparatos y estructuras se ejecuta para evaluar la calidad de estos. En este caso el objeto de la inspección es confirmar si los productos están siendo manufacturados de acuerdo a normas y/o especificaciones, y si satisfacen la calidad requerida. Los END son métodos útiles para alcanzar la calidad basados en un criterio de juzgamiento. El criterio da límites para el control para el control de calidad, y debería estar basado tanto en probadas teorías como en considerar que no habrá roturas accidentales si el producto está en servicio bajo condiciones de diseño.

#### 2.1.3.2. Evaluación de vida:

La inspección periódica, inspección de mantenimiento e inspección en servicio son aquellas que se ejecutan en productos en uso y son las que evalúan si la pieza es capaz de ser usada (seguramente) hasta la próxima inspección. Esto se realiza para determinar la vida del producto.

Es necesario, en estas inspecciones, determinar con anticipación la existencia de defectos y, en caso de existir, el tiempo en que un defecto detectado se propagará hasta la próxima inspección considerando la clase, forma, dimensiones, localización de iniciación, magnitud de tensiones, su dirección. Tras considerar todas estas variables hay que decidir la necesidad de reparación o sustitución de la pieza. Es por esto que la mecánica de fractura se usa ampliamente para evaluar la vida del producto.

#### 2.1.4. Propósito de los END.

Las muchas aplicaciones de los métodos de ensayos no destructivos en materiales se encuentran resumidas en los tres grupos siguientes:

- Defectología: permite la detección de discontinuidades, evaluación de la corrosión y deterioro por agentes ambientales; determinación de tensiones; detección de fugas.
- Caracterización: evaluación de las características químicas, estructurales, mecánicas y tecnológicas de los materiales; propiedades físicas (elásticas, eléctricas y electromagnéticas); transferencias de calor y trazado de isotermas.
- 3. Metrología: control de espesores; medidas de espesores por un solo lado, medidas de espesores de recubrimiento; niveles de llenado.

Por esto antes de nada hay que tener claro el objetivo del ensayo para seleccionar el método más adecuado. La Tabla 2.1 muestra las principales aplicaciones y no aplicaciones de estos métodos.

Para asegurar la correcta realización de este tipo de pruebas han de utilizarse patrones de calibración y estándares de referencia con los que comparar los resultados que se obtienen. Las principales normas o códigos de fabricación quedan recogidas en ASME, ASTM, AWS y API entre otros. Los inspectores encargados de llevar a cabo los distintos ensayos deben estar debidamente cualificados por la ASNT según niveles I, II y III acorde a los requisitos que se recogen las normas SNT-TC-1A, CP-189. De esta forma quedan altamente capacitados para el manejo de equipos y la realización de técnicas, además adquieren un alto conocimiento de los materiales que manejan.

La aplicación de un END busca la consecución de los siguientes propósitos:

1. Mejora en las técnicas de manufactura: a la hora de diseñar un producto, se predefine una calidad que debe obtenerse en el proceso de producción en serie. Para obtener este producto con la calidad deseada se realiza una pieza de prueba, usando las técnicas de manufactura que se emplearán en la producción y, para asegurarse de haber obtenido la calidad deseada, se aplican los END para verificarlo y, en caso necesario hacer los cambios

MÉTODO	OBJETIVO	APLICABLE A	NO APLICABLE EN
ER	Defectos internos	Soldaduras, fundiciones	Fundiciones con espesores mayores a 400 mm
US	Defectos internos	Placas, tuberías, soldaduras, forjados	Materiales con gran atenuación
$_{\rm PM}$	Defectos superficiales y subsuperficiales	Materiales ferromagnéticos	Materiales no magnéticos, defectos internos
ET	Defectos superficiales y subsuperficiales	Materiales metálicos y compuestos	Materiales no conductores térmicos, defectos internos
LP	Defectos superficiales	Materiales metálicos y no metálicos	Materiales porosos, defectos internos
CI	Defectos superficiales y subsuperficiales	Materiales conductores de geometrías simples	Materiales con geometrías complicadas, defectos internos

Tabla 2.1: Usos idóneos de los END.

pertinentes en la técnica de fabricación para obtener el producto con la calidad predefinida.

2. Reducción de los costos de producción: generalmente puede pensarse que aplicar estas técnicas aumentarán los costos del producto. Aunque esto es posible, hay que tener en cuenta que la aplicación de los END en los procesos productivos tiene un carácter preventivo. Es decir, cuando se controla el proceso de producción para que al final la pieza tenga la calidad con que la hemos diseñado, aplicando los END apropiados, también controlamos el proceso de manufactura para confirmar la calidad del producto. Si aplicando un END es posible detectar, en las etapas intermedias del proceso los errores de manufactura que llevarán a productos no aceptables, se podrán descartar de antemano tanto las piezas con errores como las etapas productivas conflictivas. Se piensa que los END adicionarán más etapas y costos, pero éste será mayor si tuviéramos que reparar estructuras, pagar por roturas, paradas de producción y accidentes debido a la no aplicación de END durante la operación. Las etapas y costos por END son muy pequeños cuando son comparados con los ya mencionados. Además de poder

reparar los productos dañados durante el propio proceso de producción.

3. Aumento de confiabilidad: la confiabilidad varía en función del uso de los productos. Generalizando para un producto de usos industriales, la confiabilidad puede considerarse como la relación entre el período verdadero durante el cual un producto ha estado operando y el período que durante diseño se estimo que operaría bajo situaciones satisfactorias y sin ningún problema. La razón por la cual no se puede usar el producto sin ningún inconveniente puede ser debido al diseño, materiales, manufacturación, la forma de uso de las piezas o componentes y a desastres que no se pueden anticipar. La labor de los ensayos cualitativos es la de reducir la probabilidad de que ocurran los hechos antes mencionados, excepto por desastre. Por esto, los END son una manera idónea para reducir la probabilidad de problemas. Como se ha comentado en el apartado 2.1.3, la evaluación de calidad sirve para que se reconozcan a priori los problemas y se puedan reparar, reforzar y/o cambiar los objetos reduciendo así la posibilidad de rotura de los productos. También se pueden aplicar END como evaluación de vida en aparatos y estructuras en servicio o reparadas y por medio del examen de defectos internos y superficiales, evaluar su aptitud para el servicio. Estos procedimientos llevan a un aumento de la confiabilidad siempre y cuando los métodos de END aplicados sean los apropiados.

#### 2.1.5. Calidad de los END.

Como se ha hecho notar en apartados anteriores, tan importante como la aplicación de un END, es la correcta elección del tipo de ensayo que vamos a realizar. Para ello hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

#### 2.1.5.1. Rendimiento de la inspección.

La rentabilidad de de una inspección depende básicamente de cuatro factores: sensibilidad, velocidad, cobertura y fiabilidad.

- Sensibilidad: se define como el tamaño mínimo que puede tener un defecto para que sea detectado de forma correcta. Su cálculo dependerá tanto del tipo de material examinado y del objetivo del ensayo, como de la precisión con que se caracterizan los defectos y la tolerancia aplicada.
- 2. Velocidad: en este factor hay que tener en cuenta no sólo el tiempo empleado en realizar la inspección, si no también el tiempo que se tarda en interpretar los datos. La velocidad es un factor clave en la elección de un END, pues varía mucho de un tipo de ensayo a otro.

- 3. Cobertura: corresponde con el tanto por ciento de material inspeccionado frente a la totalidad del producto, y depende de la geometría de la pieza, su ubicación y del tipo de END, ya que como hemos visto en la Tabla 2.1, hay END que sólo detectan defectos en zonas superficiales o subsuperficiales de la pieza.
- Fiabilidad: La fiabilidad viene definida por la probabilidad de detección y la probabilidad de falsa indicación, conceptos que quedarán definidos en el Apartado 2.1.5.3.

Todos estos factores están interrelacionados entre sí, de forma que se debe encontrar el equilibrio entre todos para obtener una inspección rápida, fiable y lo menos costosa posible.

#### 2.1.5.2. Balance económico.

La realización de un END conlleva ciertos gastos que hay que analizar para clarificar si en efecto, los costos de implementar un END no son superiores a los beneficios que se derivan de ellos.

El coste de una inspección depende tanto de los costes derivados de la mano de obra de operarios e inspectores y del coste de los materiales como de los gastos generales variables (luz, agua, repuestos,...) y los gastos generales fijos (local, seguros, devaluación de los equipos,...). Sin embargo hay que tener en cuenta que este cálculo puede variar si cambian las condiciones de ensayo como el número de piezas a inspeccionar, la sensibilidad del ensayo, la tolerancia admitida o el grado de experiencia de los inspectores.

Pero como se ha comentado en el propósito 2 del apartado 2.1.4, hay aspectos que no pueden ser cuantificados a priori, si no como una estimación del ahorro que se produce por la no producción y/o reparación de piezas defectuosas detectadas, frente a un montaje que no tuviera implementado una inspección cualitativa.

Por tanto, la relación costo/beneficio es uno de los factores más importantes en la toma de decisiones para la aplicación de END, así como del tipo de técnica a utilizar.

#### 2.1.5.3. Fiabilidad y probabilidad de detección.

La fiabilidad se define como la eficacia de un ensayo para localizar defectos de un determinado tipo y tamaño, teniendo en cuenta que no se puede asegurar que la pieza esté libre de defectos, si no que existe cierta posibilidad de que esa pieza no posee un defecto de determinada clase. Cuanto mayor sea esta posibilidad, mayor será la fiabilidad del ensayo. La probabilidad de detección de un ensayo (POD, de las siglas en inglés de Probability Of Detection) o detectabilidad se define como la probabilidad de que un operario experimentado detecte un determinado defecto utilizando un procedimiento concreto, siempre y cuando dicho defecto exista.

Su cálculo depende de muchos factores, tanto físicos (tipo, tamaño, orientación localización,... del defecto; geometría de la pieza; propiedades del materia; etc) como de factores menos cuantificables como la experiencia del inspector para interpretar los datos.

Cuando se realiza una inspección se pueden dar cuatro posibles resultados: que exista defecto y se rechace correctamente o se acepte erróneamente y viceversa, que no exista defecto y se rechace erróneamente o se acepte correctamente; por lo que los resultados se deben cuantificar mediante el uso de probabilidades, de forma que tras inspeccionar una serie de muestras, se pueda calcular la probabilidad de que se esté aceptando o rechazando una pieza de forma correcta.

#### 2.1.6. Normas y certificaciones de los END.

A la hora de realizar END, hay que tener en cuenta, tanto los resultados de los ensayos como su impacto económico dependerán de la correcta elección del método de inspección utilizado y de la calificación del inspector, que debe tener preparación no sólo en la ejecución de los ensayos, si no en la interpretación y evaluación de los resultados. De ahí que existan tres niveles de acreditación para certificar el conocimiento de los inspectores en todos los factores que engloban los ensayos.

- Nivel I: un inspector de este nivel debe estar preparado para realizar calibración de equipos, realización de ensayos y evaluación de resultados que determinen la aceptación o rechazo de la pieza en estudio. Para adquirir este nivel, debe estar formado por un inspector de nivel III y tener experiencia como aprendiz.
- Nivel II: para alcanzar este nivel, un inspector debe tener experiencia trabajando como inspector de nivel I, y tiene que ser capaz de ajustar y calibrar equipos, interpretar y evaluar resultados atendiendo a códigos, normas y especificaciones, preparar instrucciones escritas para aprendices, y realizar informes sobre los resultados obtenidos.
- Nivel III: es el máximo nivel y certifica que el inspector es capaz de constituir técnicas y procedimientos, interpretar códigos, normas y especificaciones y seleccionar el método de ensayo idóneo para una aplicación concreta. Además ha de tener gran experiencia práctica en tecnología de materiales

y procesos de fabricación y conocer los END más comunes. Es responsable de la formación y entrenamiento de los inspectores de nivel I y II. Para conseguir esta acreditación es necesario haber trabajado al menos uno o dos años como nivel II.

#### 2.1.7. Tipos de END.

Los tipos de END más usuales, aplicados ampliamente en nuestros días son: el ensayo radiográfico, el ensayo ultrasónico, el ensayo magnético, el ensayo con líquidos penetrantes, el ensayo termográfico, ensayos de corrientes inducidas y el ensayo de medición de tensiones. Hay por supuesto muchos otros métodos, algunos de los cuales son usados solamente en el laboratorio debido a que están en sus etapas iniciales, y otros sólo para casos particulares.

Cada método se basa en un principio físico y pueden ser clasificados como:

- 1. Métodos que usan principios de ópticas y colores: ensayo visual y ensayo con líquidos penetrantes.
- 2. Métodos que usan principios de radiación: ensayos radiográficos y ensayo de radiografía computada.
- 3. Métodos que usan principios electromagnéticos: ensayos magnéticos y ensayos con corrientes inducidas.
- 4. Métodos que usan principios acústicos: ensayo ultrasónico y ensayo de emisión acústica.
- 5. Métodos que usan principios térmicos: ensayos de termografía.
- 6. Métodos que usan principios de pérdidas: ensayo de pérdida.

Otra clasificación de los END está basada en la localización de defectos:

- Métodos para obtener información de la superficie o cerca de ella: ensayos visual, con líquidos penetrantes, termográfico, magnético y de corrientes inducidas.
- 2. Métodos para obtener información en el interior de los objetos: ensayo radiográfico y ensayo ultrasónico.

### 2.1.8. Características de los métodos de END más usuales.

Como se ha comentado en apartados anteriores, la elección del método de ensayo es fundamental a la hora de determinar la funcionalidad y viabilidad un ensayo no destructivo. A continuación se detallarán las características de los ensayos más comunes.

#### 2.1.8.1. Ensayo radiográfico.

La radiografía industrial es un método no destructivo para inspeccionar piezas u objetos en búsqueda de discontinuidades. En el ensayo radiográfico se usan principalmente los rayos X o los rayos Gamma, que son ondas electromagnéticas que casi tienen las mismas propiedades físicas, pero difieren en su origen. Estos rayos tienen la capacidad de penetrar los objetos, y su penetrabilidad depende del tipo de material, espesor, densidad del objeto, y de la existencia de defectos en la pieza.

El método se basa en la mayor o menor transparencia a los rayos X o Gamma de los materiales según se naturaleza y espesor. Esto es, una vez que el objeto es irradiado, la radiación atraviesa el material siendo absorbida parcialmente por él y emerge con diferentes intensidades, que son interceptadas por un film fotográfico o digitalmente con distintos tonos dentro de una escala de grises, en función inversa a la densidad del objeto. En caso de existir heterogeneidades, los cambios internos retendrán la radiación y se obtendrán cambios de tonalidad respecto al resto de la pieza. Luego del procesado de la película se podrá interpretar la imagen para detectar los defectos como puede verse en la Figura 2.1.



Figura 2.1: Ensayo radiográfico[2].

A la hora de realizar un ensayo con Rayos X, el coeficiente de absorción de un objeto es un factor muy importante a tener en cuenta. El coeficiente de absorción disminuye con la energía de los Rayos X y se incrementa con el número atómico del material del objeto, por lo que se deberá aumentar la energía del tubo a medida que los espesores de las piezas aumenten o los materiales sean más absorbentes, como puede verse en la Figura 2.2.

La característica principal es tiene este tipo de ensayo es la detección de defectos tridimensionales que tengan un volumen superior al 3 % relativo al espesor del objeto en la dirección de los rayos incidentes. Sin embargo, al ser un método que transforma los defectos volumétricos en una imagen bidimensional, será



Figura 2.2: Radiación dependiente del espesor[4].

más posible detectar defectos si se ubican aproximadamente paralelas a la dirección de los rayos incidentes, pero se vuelve más difícil si el defecto presenta una inclinación mayor de  $15^{0}$  en la dirección de los rayos incidentes.

Este tipo de ensayo tiene como principales ventajas que puede detectar defectos internos de forma muy sensible además de contar con la película como evidencia objetiva de la presencia o no de defectos. Por otro lado, hay que tener presente que es método peligroso por la exposición a la radiación, por lo que se necesitan permisos especiales y detectores de radiación para asegurar la salud e integridad de los inspectores, lo que puede encarecer este tipo de ensayo frente a otros. También hay que tener en cuenta que los operarios deben tener conocimientos en el tratamiento de imágenes y que, a pesar de ser un método muy aconsejable para la detección de defectos internos, algunas discontinuidades superficiales son muy difíciles de detectar.

#### 2.1.8.2. Ensayo ultrasónico.

Las ondas ultrasónicas tienen la propiedad de propagarse en la pieza y ser reflejadas parcial o totalmente por un reflector, sea bien un defecto o el fondo de la pieza. Se esta manera se pueden detectar no destructivamente discontinuidades leyendo los ecos que producen los ultrasonidos.

Como este proyecto trata precisamente sobre END con ultrasonidos, más adelante en los apartados 2.2, 2.3 y 2.4 se tratará de forma más pormenorizada este tipo de ensayo.

#### 2.1.8.3. Ensayo de Partículas Magnetizables.

En los materiales ferromagnéticos tales como los aceros, cuando se magnetizan aparece un flujo magnético mucho mayor que en los materiales no magnéticos. Cuando se induce un campo magnético en un material, si existiera un defecto cerca de la superficie se produciría un escape de dicho flujo, llamado campo de fuga, de forma que el campo magnético se distorsionaría produciéndose polos. Al aplicar partículas magnetizables en forma de polvo en la superficie del material, éstas se acumularán en los polos del campo de fuga pudiéndose visualizar estas acumulaciones de forma directa o utilizando luz ultravioleta, como se observa en la Figura 2.3. Actualmente pueden usarse sensores magnéticos tales como un generador de efecto Hall o cintas magnéticas en vez de partículas.



Figura 2.3: Ensayo de partículas magnéticas[2].

Como el campo de fuga que producen los defectos depende de la orientación de magnetización en la pieza y dimensiones del defecto, es un ensayo muy útil para determinar si hay defectos superficiales y/o subsuperficiales en el objeto. Es posible detectar con bastante seguridad discontinuidades de un milímetro de longitud. Además es un método simple, fácil, portable y rápido.

Por otro lado, no se puede calcular la profundidad de los defectos detectados, que es una información muy importante cuando se quiere evaluar la vida de un producto. Usando ensayos de escape del campo de fuga se puede obtener información cuantitativa usando, pero esta aplicación está confinada a piezas con geometría simple.

Otra gran desventaja es que este ensayo no podrá detectar defectos que no sean perpendiculares a la dirección del flujo magnético inducido, puesto que cuanto mayor sea su inclinación, el campo de fuga distorsionará menos las líneas de campo magnético.

Este método conlleva una limpieza inicial de las piezas, así como una desmagnetización al final.

#### 2.1.8.4. Ensayo termográfico.

El ensayo termográfico es una técnica no destructiva sin contacto que obtiene la temperatura de la superficie de un cuerpo a través de la radiación infrarrojaque ésta emite. El mapa térmico obtenido se llama termograma.

Cuando existen anomalías en los materiales, el flujo de calor se altera provocando contrastes de temperatura en la superficie. El ensayo termográfico recoge el termograma y lo analiza mediante patrones térmicos.

Existen dos tipos principales de ensayos termográficos: el pasivo y el activo.

• El ET pasivo se refiere a los casos en que no se usa ninguna fuente externa de calor para provocar un flujo calorífico en el cuerpo a inspección. El objeto estudiado produce un patrón de temperaturas por el mero hecho de estar involucrado en un proceso industrial que produce calor. Como el ET es capaz de mostrar el termograma en tiempo real y a una distancia segura, se detectarán discontinuidades cuando se aprecie una diferencia respecto a la temperatura normal de trabajo. Es común para la monitorización de procesos de soldadura o en la comprobación de discos de freno.



Figura 2.4: ET lock-in por lámpara modulada[5].



Figura 2.5: ET lock-in ultrasónico[6].

En el ET activo se utiliza una estimulación externa para provocar un flujo de calor dentro de la pieza. Un defecto interno afectaría al flujo calorífico produciendo un contraste térmico en la superficie. Existen tres técnicas principales: el ET pulsado (Pulsed Thermography), que consiste en aplicar un pulso corto de calor y grabar el enfriamiento del material, que en caso de tener heterogeneidades, se enfriará de manera distinta; el ET de pulso largo o Step Haeting, que se basa en calentar el objeto de forma continua y monitorizar el incremento de temperatura de la superficie; y el ET lock-in consistente en la generación de ondas de calor dentro del objeto por medio de una lámpara modulada (Figura 2.4) o mediante vibración mecánica (como un transductor piezoeléctrico en el ET lock-in ultrasónico, Figura 2.5), y la sincronización del termograma oscilante mediante un amplificador o un computador para, mediante cálculos matemáticos, obtener las imágenes de fase y amplitud que se verán distorsionadas por los defectos internos.

La principal ventaja es que se trata de un método rápido y sin contacto cuya interpretación es muy sencilla. Es realmente efectivo para detectar agua en materiales compuestos. Además la radiación infrarroja no es nociva que puede ser aplicado tanto en materiales metálicos como compuestos y en áreas relativamente grandes. Sin embargo, es efectivo únicamente en la detección de defectos poco profundos. También resulta complicado producir un calentamiento uniforme al aplicar las técnicas activas y pueden existir variaciones de emisividad en diferentes partes de la pieza, puesto que la pintura o el tratamiento superficial pueden influir en el resultado.

#### 2.1.8.5. Ensayo de líquidos penetrantes.

Para detectar defectos superficiales muy finos tales como roturas, pliegues, inclusiones o porosidades se los suele magnificar con un método apropiado para su visualización. En el ensayo por líquidos penetrantes se aplica un líquido penetrante coloreado o fluorescente, sobre la pieza a examinar que quedará retenido en las discontinuidades que existan, para luego extraerlas a la superficie mediante un revelador.

El protocolo para ejecutar un ensayo por líquidos penetrantes, como se aprecia en la Figura 2.6, consta de las etapas siguientes:



Figura 2.6: Ensayo por líquidos penetrantes[2].

1. Limpieza inicial: antes de nada se ha de realizar una limpieza exhaustiva para eliminar toda la suciedad presente tanto en la superficie como en las posibles discontinuidades.

- 2. Penetración: se aplica un líquido de alta capilaridad, normalmente de color rojo o fluorescente, como penetrante sobre la pieza a ser examinada que quedará atrapado dentro de los defectos si existieran. A continuación se deja secar la pieza durante 15 o 20 minutos.
- Limpieza intermedia: con ayuda de un papel impregnado con líquido eliminador se remueve el exceso de penetrante frotando la superficie de la pieza.
- 4. Revelado: se aplica un líquido revelador blanco con gran capacidad de absorción a la superficie de la pieza. Este revelador extraerá el penetrante de los defectos quedando manchado de rojo en esas zonas.
- 5. Observación: se observan las indicaciones de los defectos bajo luz natural en el caso de los penetrantes coloreados o usando luz negra en el caso de los penetrantes fluorescentes.
- 6. Limpieza final: al terminar, se debe limpiar completamente la pieza.

Como principal inconveniente, el ensayo por LP sólo detecta discontinuidades abiertas a la superficie. Además no puede ser utilizado en materiales porosos o con alta rugosidad. Pero hay que destacar que se trata de un método realmente preciso así como muy sencillo de aplicar e interpretar.

#### 2.1.8.6. Ensayo por corrientes inducidas o de Eddy.

Según la ley de Faraday-Lenz en el interior de una bobina por la que circula una corriente alterna se producirá un campo magnético alterno. Si se coloca la bobina cerca de un material plano se inducirá una corriente dentro de la placa metálica que tenderá a contrarrestar al campo magnético de la bobina como en la Figura 2.7.

La distribución y magnitud de la corriente inducida depende de la frecuencia de la corriente alterna, características de la pieza, como conductividad, permeabilidad o geometría, y existencia de defectos. Leyendo los cambios de impedancia de la bobina, se obtendrá información de la naturaleza del metal y se podrá caracterizar las heterogeneidades en caso de existir.

Este tipo de ensayo es especialmente apto para la detección de defectoss en la superficie o cerca de ella en piezas de geometría simple de forma rápida. Además es portable y muy sensible. En contraste, no es tan útil para piezas de geometrías complejas y su aplicación necesita de probetas especiales para cada examen.



Figura 2.7: Ensayo por corrientes inducidas[2].

#### 2.1.8.7. Ensayo visual.

Se trata del método más sencillo puesto que se basa en la exploración superficial de los materiales a simple vista. En este ensayo se detectan defectos macroscópicos como abultamientos, grietas o delaminaciones de forma rápida y barata. Para mejorar el examen, es útil el uso de lupas o anteojos, aunque también se pueden emplear robots motorizados y vídeos portátiles con zoom en zonas de difícil acceso. Por otro lado, es un método que depende exclusivamente de la habilidad y la experiencia del inspector, por lo que es el método más falible.

#### 2.2. Ultrasonidos

Antes de comenzar con los END por ultrasonidos, se desarrollarán de forma breve los principios teóricos que fundamentan este método. Este apartado, y el próximo, están basados en las referencias [2, 7, 10].

#### 2.2.1. Definición.

El sonido se transmite a través del espacio en forma de onda con distintas frecuencias. Los ultrasonidos son ondas acústicas cuya frecuencia está por encima del espectro audible por el oído humano, aproximadamente los 20 kHz. Su propagación provoca distintos fenómenos según el medio sea gaseoso, líquido o sólido (que debido a que es lo que directamente compete a este proyecto se ampliará en el Apartado 2.3). El estudio de esta fenomenología se ha desarrollado en ámbitos tan dispares como la biología (estudio de ecolocalización ultrasónica de ciertos animales, como delfines y murciélagos), la medicina (terapia ultrasónica, ecografías, cirugía y un largo etcétera) o las aplicaciones industriales (limpieza, soldadura de plásticos, medidores de nivel,...). Dentro de las propósitos industriales, los ultrasonidos son ampliamente utilizados en el control de calidad para la detección de heterogeneidades (defectología), determinación de propiedades (caracterización) y medida de espesores (metrología).

#### 2.2.2. Historia de los ultrasonidos.

Fue el biólogo italiano Lazzaro Spallanzani quien, en el siglo XVIII, descubrió la existencia del sistema de guiado ultrasónico de los murciélagos. Su experimento consistió en tapar los oídos a los murciélagos y comprobar que de esta manera no podían orientarse, demostrando así que las ondas ultrasónicas son un fenómeno natural.

Ya en el siglo XIX, Cagniard de la Tour inventó en 1819 la sirena acústica. Mediante un disco con orificios que vibraba al ser atravesado por una corriente de aire y que emitía un sonido cada vez más agudo cuanta mayor fuera la velocidad del aire que lo atravesaba, se pudo medir la frecuencia de un sonido contando las vibraciones del disco.

Durante la primera mitad de este siglo, el físico austriaco Christian Andreas Doppler descubrió que la luz en movimiento poseía la propiedad, que se conocería posteriormente como Efecto Doppler, por la que se producía un cambio de frecuencia de una onda cuando la fuente emisora y el observador están en movimiento relativo con respecto al medio de propagación[9]. En 1845, el científico holandés Buys Ballot confirmó que el Efecto Doppler es aplicable a las ondas sonoras, de forma que el tono emitido por una fuente que se acerca al observador es más agudo que si la fuente se aleja.

Ya en 1883, Francis Galton crea el denominado "silbato de Galton" con el que pretendía controlar perros mediante sonidos inaudibles para los humanos, determinando las barreras de límites auditivos. Mientras los hermanos Pierre y Jacques Curie descubrieron la llamada propiedad piezoeléctrica, por la que en determinados materiales aparecen cargas eléctricas, y por tanto diferencia de potencial, cuando se les aplican tensiones mecánicas.

Fue en el siglo XX cuando se empezaron a desarrollar las aplicaciones industriales y comerciales de los ultrasonidos, comenzando tras el hundimiento de Titanic en 1912, cuando el francés Paul Langevin desarrolló el SONAR (de las siglas en ingles de Sound Navigation and Racing) para la detección de icebergs con ondas ultrasónicas. El mismo Langevin y Constantin Chilowski crearon en 1917 el primer generador piezoeléctrico de ultrasonidos cuyo cristal funcionaba como emisor y como receptor, utilizándolo para la medición de los fondos marinos y la detección de submarinos durante la I Guerra Mundial. En 1929 el ruso Serguei Sokolov se convirtió en el impulsor de los END con ultrasonidos al emplearlos en la detección de grietas en materiales sólidos. Ya en 1940 el estadounidense Fred A. Firestone se basó en los estudios de Sokolov para desarrollar el el reflectoscopio supersónico que empleaba ondas ultrasónicas para obtener reflexiones de pequeñas discontinuidades en sólidos. Además investigó el modo de operación de los transductores, el uso de ondas transversales y superficiales, inventó el dispositivo Raybender para realizar una inspección angular variando el ángulo, estudió el retardo de los transductores para la inspección en zonas próximas a la superficie, desarrolló un método de resonancia para la medición de espesores y trabajó en otras técnicas basadas en el empleo de ondas Lamb.

Mientras el SONAR se extendía durante la II Guerra Mundial tanto en aplicaciones militares como médicas, en 1941 Donald Sproule creó un sistema de transductores que detectaban los ecos que retornaban tras una aplicación de pulsos, impulsando el progreso de los equipos de inspección ultrasónica modernos.

A partir de entonces, se han ido desarrollando las diferentes aplicaciones de los ultrasonidos, tanto en el campo de la medicina como en el control de materiales hasta convertirse en algo común hoy en día.

#### 2.2.3. Propiedades de las ondas ultrasónicas.

Como se definió anteriormente, los ultrasonidos son ondas sonoras bajo un determinado rango de frecuencias, por lo que se definirán los parámetros más importantes tanto de las ondas en general como de los parámetros dependientes del medio de propagación, puesto que las ondas ultrasónicas no pueden propagarse en el vacío. Una onda sonora se propagará solamente a través de aquellos medios materiales que contengan átomos o moléculas que puedan vibrar.

#### 2.2.3.1. Parámetros comunes de las ondas.

- Periodo (T): tiempo que se tarda en realizar una oscilación completa. Se mide en segundos.
- Frecuencia (f): es la inversa del periodo (ver Ecuación 2.1), es decir, el número de oscilaciones por unidad de tiempo. Se mide en Herzios (Hz). Es el factor que determina la distinción entre distintos tipos de ondas sónicas.

$$f = \frac{1}{T} \tag{2.1}$$

 Amplitud máxima de oscilación (A): es el máximo desplazamiento que realiza una partícula desde la posición de equilibrio.



Figura 2.8: Parámetros comunes de las ondas[10].

#### 2.2.3.2. Parámetros dependientes del medio de propagación.

- Velocidad acústica (c): es la velocidad de propagación del sonido en un material, o sea, la distancia recorrida por las ondas en el material por unidad de tiempo. Es característica y constante para cada material y puede ser longitudinal, transversal o una combinación de ambas.
- Longitud de onda (λ): corresponde a la distancia entre dos planos en los que las partículas tienen el mismo estado de movimiento. Se relaciona con la velocidad acústica y la frecuencia según 2.2.

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{2.2}$$

- Impedancia acústica (Z): es la resistencia que opone un medio a las deformaciones elásticas causadas por la vibración de la onda, es decir, se opone a la vibración de las partículas pero no a la propagación de la onda.
- Presión Acústica (P): es la presión periódica debida al cambio que se produce en la densidad de las partículas de un medio al ser atravesado por una onda.

Existen otros parámetros que definen una onda como la velocidad instantánea de vibración (v), la energía acústica específica  $(E_e)$  o la intensidad acústica (I).

#### 2.2.4. Rango de frecuencias.

Los ultrasonidos son ondas de la misma naturaleza que las ondas acústicas, pero que se diferencian de ellas en su frecuencia, que no es audible para el ser



humano. En el espectro acústico (ver Figura 2.9) se encuentran tres zonas:

Figura 2.9: Espectro acústico[2].

- 1. *Zona infrasónica*: se encuentra por debajo de los 20 Hz y no tiene aplicación en el control de materiales.
- 2. Zona sónica: rango de frecuencias audibles para el ser humano que se encuentra entre los 20 Hz y los 20 kHz.
- 3. Zona ultrasónica: se encuentra por encima de los 20 kHz y se divide a su vez en otras tres:
  - Entre 20 y 100 kHz: es la zona de ultrasonido próximo que manejan técnicas con elevados niveles de energía: sistemas de limpieza, agitación y cavitación.
  - Entre 0.2 y 25 MHz: es la banda que se utiliza para el control de calidad de materiales, aunque normalmente se utilizan frecuencias entre 2 y 5 MHz.
  - Mayores de 100 MHz: esta banda frecuencial se emplea para microscopia acústica.

#### 2.2.5. Tipos de ondas ultrasónicas.

Como se ha explicado anteriormente, las ondas ultrasónicas se desplazan haciendo vibrar las partículas del medio por el que se propagan. Cuando dichas partículas salen de su posición de equilibrio pueden desplazarse describiendo oscilaciones con distintas trayectorias. Según como sean estas oscilaciones, se obtendrán los distintos tipos de ondas:

- 1. *Ondas longitudinales*: se dan cuando la oscilación de las partículas tiene lugar en la misma dirección de propagación de la onda al ejercer la presión perpendicularmente a la superficie del cuerpo.
- 2. *Ondas transversales*: se producen en los materiales sólidos cuando el ultrasonido incide angularmente con respecto a la superficie.
- 3. Ondas superficiales o de Rayleigh: son un tipo especial de onda transversal que, en vez de atravesar el material, se propagan a lo largo de la superficie del cuerpo siguiendo sus contornos y sus irregularidades.
- 4. Ondas de Lamb: se dan en materiales delgados, cuyo espesor no sea mayor que la longitud de onda. En este caso la onda se propaga paralelamente a la superficie del cuerpo, pues el material vibra en su conjunto. Existen dos tipos: ondas simétricas de compresión y ondas simétricas de flexión.

### 2.3. Propagación Ultrasónica en Sólidos

Ya se ha mencionado que las ondas ultrasónicas no pueden propagarse en el vacío, necesitan un medio que transmita la vibración. Sin embargo, los medios líquidos y gaseosos, al no ofrecer ninguna resistencia a los esfuerzos cortantes, solamente propagarán ondas longitudinales. Por esto, sólo en un medio sólido se propagarán ondas longitudinales, transversales y/o su combinación. Además, hay que tener en cuenta, como se ha explicado en el apartado anterior, que si la longitud de onda es mayor que el espesor de la pieza, se formarán ondas de Lamb.

#### 2.3.1. Comportamiento en superficies límite.

Cuando una onda llega a la superficie límite o contorno su propagación se altera y, dependiendo de qué esté rodeado el material, tendrá un comportamiento distinto. Cuando el material está rodeado de un espacio vacío, al no haber propagación en este medio, al llegar al borde la onda regresa produciéndose reflexión si el contorno es liso o dispersión si es rugosa. En caso de que haya otro material adherido a la superficie límite, que en este caso se llamará interfase, la onda se transmitirá del primer medio al segundo. Esta situación se estudiará a continuación dependiendo de si la incidencia es normal o angular.

#### 2.3.1.1. Incidencia normal.

Una onda que incide perpendicularmente sobre una superficie plana y lisa que separa dos medios de diferentes propiedades elásticas, sufre una división de energía en dos partes: una que se refleja y retorna en la misma dirección pero sentido contrario y otra que se transmite al nuevo material y que sigue la misma dirección y sentido, como se observa en la Figura 2.10.



Figura 2.10: Incidencia normal[2].

Según el principio de conservación de la energía, la energía de la onda incidente será igual a la suma de la reflejada más la transmitida. La porción que se refleja y se transmite depende de la impedancia acústica de los medios. Si se considera el balance de presión acústica, se obtendrá que la presión reflejada será de la misma amplitud que la incidente sin importar la secuencia de materiales, mientras que la presión transmitida tendrá diferente amplitud y sí dependerá de la secuencia de materiales. El balance de presiones obtenido será que la suma de las presiones incidente y reflejada será igual a la presión transmitida.

#### 2.3.1.2. Incidencia angular.

Cuando una onda incide sobre una interfase plana que separa dos medios de distintas propiedades también se produce un fenómeno de transmisión y reflexión como puede verse en la Figura 2.11, pero formando unos ángulos con la vertical que dependen de la velocidad acústica de cada medio y cumplen la Ley de Snell (2.3).

$$\frac{sen(\alpha 1)}{sen(\alpha 2)} = \frac{c_1}{c_2} \tag{2.3}$$



Figura 2.11: Incidencia angular[2].

Sin embargo los fenómenos que se producen son considerablemente más complicados, puesto que se crea un desdoblamiento de las ondas de forma que se obtienen dos ondas reflejadas y dos ondas transmitidas, una longitudinal y otra transversal. Realizar un balance de presiones en este caso se antoja mucho más complejo, aplicando una serie de variaciones de la Ley de Snell. Como este estudio se basa en una aplicación visual de estos fenómenos, no se entrará a fondo en el desarrollo de estos cálculos matemáticos más complejos.

#### 2.3.2. Mecanismos de atenuación.

A la hora de estudiar la propagación de la presión acústica en sólidos de la forma más real posible, debe tenerse en cuenta que en medios sólidos la atenuación no depende solamente de la divergencia de la onda, sino que aparecen dos fenómenos llamados dispersión y absorción.

#### 2.3.2.1. Dispersión.

La causa principal de la aparición de dispersión es la presencia de heterogeneidades en el material que provocan cambios en la impedancia del material. Dichas heterogeneidades pueden ser provocadas por inclusiones, que son impurezas del material, como por ejemplo el caso del acero, que puede contener pequeñas partículas no metálicas retenidas durante el proceso de fundición; pueden existir heterogeneidades propias del material, como las porosidades de materiales sintetizados; podría deberse a la existencia de fases de diferente composición en la estructura cristalina de los metales o que esta estructura, aún estando constituida por una sola fase, los granos estén orientados al azar. Si el tamaño de la heterogeneidad es menor que la longitud de onda, ésta se propaga sin interferencias como si la heterogeneidad no estuviese presente. Sin embargo un obstáculo mayor que la longitud de onda se producen incidencias como se ha explicado en el Apartado 2.3.1. Así, en el borde de la heterogeneidad se darán los fenómenos de transmisión y reflexión ya mencionados. En este caso, no sólo se produciría una atenuación de la onda que provocaría la disminución de la amplitud del eco de fondo, también se darían ecos parásitos, llamados ruido de la señal, que podrían enmascarar ecos más importantes. Por ello la dispersión debe tenerse muy en cuenta a la hora de realizar END con ultrasonidos.

#### 2.3.2.2. Absorción.

La absorción se produce por la pérdida de energía en forma de calor. La propagación de la onda a través del material se produce mediante la vibración de las partículas que lo componen. Sin embargo esta misma vibración hace que unas partículas friccionen contra otras y aumente la temperatura, transformando la energía mecánica en calor y atenuando la señal ultrasónica.

Existe un coeficiente de atenuación acústica para cada material y tipo de onda que proporciona la cantidad de atenuación sónica por unidad de longitud recorrida. Además es directamente proporcional a la frecuencia de onda, por lo que la atenuación se puede disminuir empleando frecuencias más bajas.

#### 2.3.2.3. Interferencia.

Puede darse el fenómeno de que cuando una onda sónica choca contra un interfase, la onda reflejada se superponga con la original produciéndose una interferencia, de forma que si la original tiene un pico o máximo al mismo tiempo que la reflejada, los picos se sumarán, mientras que si el máximo de una coincide en el tiempo con el mínimo de la otra, podrían anularse.

#### 2.3.2.4. Otros factores.

Añadidos a los fenómenos ya mencionados, existen también otros factores que producen pérdida de energía en la onda ultrasónica, como las pérdidas en el medio acoplante al utilizar la técnica de contacto, la dispersión debida a la rugosidad superficial del material y pérdidas por divergencia del haz.

## 2.4. Evaluación No Destructiva con Ultrasonidos

En este apartado se realizará una descripción de las técnicas utilizadas para la realización de ensayos ultrasónicos, incidiendo más en aquellas partes que se utilizan directamente en este estudio. Se utilizarán las referencias bibliográficas [2, 7, 11, 12, 13].

#### 2.4.1. Principios.

Como se ha explicado en apartados anteriores, los ultrasonidos tienen la propiedad de propagarse por los sólidos mediante la vibración de las partículas que los componen. De esta manera, una onda atravesará un material siempre y cuando exista una continuidad en dicho material. Por ello, un cambio en el material producirá una reflexión en la onda, pudiéndose diagnosticar cuantas discontinuidades internas tenga el sólido a estudio.

#### 2.4.2. Generación de ondas.

Los ultrasonidos se generarán mediante el uso de palpadores. Los palpadores son dispositivos que convierten la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa. Los palpadores contienen un oscilador que, excitado mediante descargas eléctricas, transmite un pulso ultrasónico. De igual manera, si este oscilador recibe una vibración sónica, puede generar una señal eléctrica acorde a ella.

Esta conversión de energía se puede producir principalmente por los dos fenómenos físicos siguientes:

#### 2.4.2.1. Efecto piezoeléctrico.

El fenómeno más utilizado. Se trata de una propiedad inherente a ciertos cristales, naturales o sintéticos, por la cual presentan una carga superficial cuando se les somete a una fuerza de tracción y, más importante, la carga cambia de polaridad si se invierte la dirección de la fuerza, como puede verse en la Figura 2.12. Y al contrario, al aplicarle una diferencia de potencial, se reordenan sus moléculas produciéndose una deformidad. Si se le somete a una onda alterna, se producirá una vibración que, a la frecuencia adecuada, será ultrasónica. Es esta propiedad de reversibilidad lo que convierte estos materiales en los idóneos para la generación y recepción ultrasónica ya que pueden funcionar como emisores y como receptores.


Figura 2.12: Efecto piezoeléctrico[12].

Materiales con esta propiedad son el cuarzo y diversos componentes policristalinos como el sulfato de litio, el titanato de bario, el mateniobato de plomo, etc.

#### 2.4.2.2. Efecto magnetoestrictivo.

Este fenómeno es propio de los llamados materiales ferromagnéticos, como el níquel, aceros y ferritas, cuya principal característica es que pierden su forma ante la presencia de un campo magnético.

Cuando uno de estos materiales no está sometido a ningún campo eléctrico, las moléculas se orientan al azar, mientras que cuando se le somete a la acción de un campo eléctrico, sus moléculas se alinean siguiendo su dirección y provocando un aumento de las dimensiones del material, como puede verse en la Figura 2.13.



Figura 2.13: Efecto magnetoestrictivo[13].

Este fenómeno, como el anterior, también es recíproco pero no debe utilizarse para ensayos que se salgan del rango entre 25 y 100 kHz.

# 2.4.3. Haz ultrasónico.

Aunque en los ensayos con ultrasonidos el ancho del haz se suele considerar constante a lo largo de toda la longitud del material, realmente existen tres zonas, como se ve en la Figura 2.14, en las que el haz se comporta de manera distinta:



Figura 2.14: Haz ultrasónico[2].

#### 2.4.3.1. Zona muerta.

Es la zona que está en contacto con el palpador. Se produce por las interferencias que se dan durante el tiempo en que el cristal esta vibrando sin alcanzar la frecuencia para generar un pulso. Durante este tiempo, la presión a lo largo de esta distancia es nula, por lo que cualquier heterogeneidad presente en las proximidades de la superficie de la pieza será indetectable.

#### 2.4.3.2. Zona de campo cercano.

También llamada de campo próximo o zona de Fresnel. Es la zona que va inmediatamente después de la zona muerta. Idealmente, la energía se irradiaría desde el origen en todas las direcciones de manera esferoidal. Sin embargo, en las zonas próximas al palpador se generan lóbulos secundarios que distorsionan la onda y falsean las lecturas, haciendo muy difícil la detección de heterogeneidades en esta zona.

#### 2.4.3.3. Zona de campo lejano.

También zona de Fraunhofer. Tras la zona de campo cercano se encuentra la zona en que se estabiliza la presión acústica y en la que la anchura del haz va aumentando en forma de cono según aumenta la distancia desde el origen.

# 2.4.4. Tipos de ensayos.

Existen diferentes maneras de realizar un ensayo no destructivo, y dependiendo de que factor se utilice obtendremos las siguientes clasificaciones:

1. Dependiendo del tipo de acoplamiento entre palpador y pieza a estudio se distinguirá entre método por contacto directo y método por inmersión. El método por contacto consiste en realizar el ensayo situando el palpador directamente sobre la superficie de la pieza, aplicando un acoplante para favorecer la transmisión de los ultrasonidos. Es importante realizar una presión constante sobre el palpador a la hora de desplazarlo a lo largo de la superficie. Las ventajas que tiene este método son la posibilidad de inspeccionar piezas de gran tamaño in situ gracias a la portabilidad del equipo y que además de su gran poder de penetración, es posible usar ondas superficiales. Las principales desventajas de este método son que requiere de una gran uniformidad para que el acoplamiento entre pieza y palpador sea perfecto y no se falsee el resultado, es imperativo el uso de acoplantes y puede tener dificultades para detectar defectos próximos a la superficie por la presencia del campo cercano, como se explicó en el Apartado 2.4.3.

Por otro lado se tiene el método por inmersión, que consiste en utilizar el agua o cualquier otro líquido como medio de acoplamiento, bien sumergiendo la pieza en un tanque, bien introduciendo el palpador en una carcasa llena del líquido acoplante, por lo que se produce un acoplamiento perfecto. Este método está especialmente indicado para sistemas automatizados. Además permite el uso de frecuencias altas que posibilitan la detección de defectos muy pequeños; suprime el efecto por campo cercano, lo que permite detectar heterogeneidades subsuperficiales; y permite la inspección de piezas con superficie irregular. Como desventajas se dan que este método dificulta la portabilidad y, en el caso de la inmersión en tanque, se limita el tamaño de las piezas a inspeccionar. Además se produce una disminución de la amplitud de la onda por la reflexión de las señales en el agua.

2. Teniendo en cuenta el número de palpadores, se dan la técnica del pulso-eco y la técnica de transmisión. La técnica pulso-eco utiliza un único palpador que actúa a la vez como emisor y receptor, enviando un pulso ultrasónico de muy corta duración y esperando a que la onda se propague por el material para recoger los ecos que se producirán cuando dicha onda se refleja bien en el fondo de la pieza (eco de fondo) o bien en una discontinuidad. Como se puede ver en la Figura 2.15, la lectura de estos ecos nos dará información sobre la localización y características de la discontinuidad.

Sin embargo, el método de transmisión emplea dos palpadores, uno que emitirá la señal y otro que la recogerá y que, en caso de haber una discontinuidad, recibirá menos intensidad ya que parte de la onda emitida se reflejaría en la discontinuidad. Cuando se tiene acceso a ambos lados del material a estudio se utilizará la incidencia perpendicular, pero en caso contrario, es necesario ubicar ambos palpadores en el ángulo adecuado para que uno reciba la incidencia angular del otro.



Figura 2.15: Método Pulso-eco[2].

3. Dependiendo del modo en que se desplaza el palpador a lo largo de la pieza el ensayo puede ser manual o automático. El ensayo manual consiste en que un operario desplace el palpador a lo largo de la pieza mientras monitoriza en tiempo real los resultados. Sus principales ventajas son la rapidez, facilidad y, sobre todo, la portabilidad y la capacidad de adaptarse a la medida y morfología de la pieza a estudio. Tiene como desventaja que depende en todo momento de las capacidades del operario, que puede falsear los resultados por factores como el cansancio o la falta de presión continua del palpador sobre la superficie.

También existe la posibilidad de automatizar el proceso mediante un dispositivo que desplace el palpador a lo largo de la pieza. Este procedimiento es muy recomendado para piezas de geometría sencilla que se produzcan en gran cantidad, pues elimina el factor humano y se puede crear una base de datos automática de posibles defectos. Además nos aseguramos de que se produzca un acoplamiento palpador-material perfecto. Por otro lado, tiene como desventajas que se encarece el procedimiento, que puede no ser aplicable en piezas con geometrías complejas y que está limitado a la inspección in situ.

4. Existe otro método de ensayo llamado método de resonancia. Se utiliza principalmente para la medida de espesores en materiales con superficies paralelas y se basa en la formación de ondas estacionarias debidas a la superposición de las ondas emitidas y reflejadas en una interfase. Esta superposición da lugar a la aparición de nodos y vientres en los que la presión es nula y máxima respectivamente. Conociendo la distancia entre nodo y vientre y midiendo la frecuencia de resonancia, se podrá obtener el espesor de la pieza.

# 2.4.5. Palpadores.

En la inspección de metales lo más común es el uso de osciladores piezoeléctricos. Como se ha explicado en el Apartado 2.4.2.1, los materiales piezoeléctricos transforman la energía eléctrica en mecánica al funcionar como emisor y al contrario al funcionar como receptor. Sin embargo, es necesario añadir un amortiguador de alta impedancia que se comporte como soporte mecánico y evite que la onda ultrasónica vibre libremente y se transmita en dirección al material. Si todo esto, junto con las conexiones eléctricas, se protege en una carcasa se obtiene el palpador, como puede verse en la Figura 2.16.



Figura 2.16: Palpador piezoeléctrico[2].

La elección del palpador depende en gran medida de la pieza que se va a analizar, tanto del material como de su geometría, puesto que las características de diseño de un palpador varían según su frecuencia, resolución, sensibilidad, ángulo de emisión, campo emitido y dimensiones.

Existen multitud de tipos de palpadores, por lo que a continuación se realizará una pequeña descripción de los distintos tipos. La principal clasificación viene dada por la adaptación de los palpadores para cada tipo de ensayo. De esta manera se dan los palpadores de contacto directo, donde se debe apoyar el palpador directamente sobre el material ejerciendo presión; y por otro lado los palpadores de inmersión, que poseen una carcasa herméticamente sellada para que pueda ser sumergido. Dentro de los palpadores de contacto directo, se diferencia entre palpadores de incidencia angular, que emiten una señal acústica en un ángulo predeterminado, y palpadores de incidencia normal, que emiten la señal para que atraviese el material perpendicularmente a su superficie. Éstos últimos están especialmente indicados para la técnica pulso-eco, y se pueden encontrar en formato de cristal único, con un solo cristal que ejerce de emisor y receptor, y palpadores de doble cristal, con dos cristales aislados acústicamente para cada uno de las funciones. Se pueden obtener también palpadores para aplicaciones especiales como los palpadores de cristal múltiple o los palpadores para ensayos a altas temperaturas.

#### 2.4.6. Equipos de exploración.

Al igual que la elección de la mejor técnica de exploración y del palpador idóneo, para realizar un correcto ensayo no destructivo con ultrasonidos es imperativo la elección de un equipo de exploración que ofrezca los mejores resultados en función a nuestras necesidades. Esto es, no solamente se utilizan los ultrasonidos para defectología (detección e identificación de heterogeneidades), si no también para caracterización de materiales (naturaleza y estado del material) y metrología (control de espesores), por lo que cada aplicación requerirá unas características del equipo distintas. Estas características comprenden los sistemas de excitación, emisión y recepción de ultrasonidos; la frecuencia de trabajo; el sistema de sincronismo; el generador de alta frecuencia; el sistema de amplificación; y el sistema de representación.

# 2.5. Software de Simulación

En este estudio se utiliza, para simular la propagación ultrasónica en sólidos, el programa informático COMSOL junto con el software matemático MATLAB. A continuación, se definirán los principales características del software de simulación. En este apartado se utilizarán las referencias [14, 15, 16].

COMSOL Multiphisics 3.5a (de ahora en adelante COMSOL) es un programa de simulación que emplea el método de elementos finitos para resolver problemas físicos complejos. El método de elementos finitos parte de un cuerpo sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales que caracterizan el comportamiento físico del fenómeno bajo el que está sujeto y lo divide en un número elevado de partes para obtener una solución numérica aproximada. Cada una de estas partes, que no puede tener intersección con ninguna otra, se denomina elemento finito. El conjunto de elementos finitos, que se llamará malla, estará interconectado por una serie de puntos llamados nodos. A la creación de este mallado se le llama discretización. Partiendo de la base de que las ecuaciones que rigen el cuerpo continuo también regirán el elemento, se pasará de un sistema continuo con infinitos grados de libertad, regido por un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema finito, con un número finito de grados de libertad, cuyo comportamiento se modela con un sistema de ecuaciones.

El programa está diseñado para adaptarse a las necesidades deseadas por un usuario avanzado, mientras que es relativamente fácil de usar para un usuario inexperto. COMSOL presenta interfaces físicas que se usan para gobernar mediante un modelo las ecuaciones propias de la gran mayoría de problemas físicos, aunque un usuario avanzado tiene la libertad de adaptar el interfaz físico para que un modelo incluya todos los interfaces físicos necesarios para adaptarlos a las interacciones del mundo real.

De todas maneras, COMSOL también incluye como predefinidas varias fenómenos "acoplados", como por ejemplo en nuestro caso el efecto piezoeléctrico. El programa tiene un interfaz para el efecto piezoeléctrico que combina la mecánica de sólidos y la electrostática.

Una descripción completa del programa COMSOL, incluso si se limita el uso al módulo de acústica, sería prácticamente imposible y totalmente innecesario en este proyecto, por lo que solamente se describirá someramente los procedimientos de modelado, puesto que más adelante en el Apartado 3.3.1 se describirán detalladamente las simulaciones consideradas en este trabajo.

La forma más usual de construcción de un modelo consta de los siguientes pasos:

- 1. Seleccionar el número de dimensiones del modelo, elegir uno o más interfaces físicos y decidir el tipo de estudio.
- Crear la geometría del modelo mediante las herramientas CAD que COM-SOL proporciona o bien importarlo desde cualquier programa de diseño asistido por computador.
- 3. Describir las variables escalares que rigen los dominios.
- 4. Relacionar cada dominio de la geometría con el fenómeno físico por el que es gobernado. Un único dominio puede ser gobernado por varios interfaces en el modo *Multiphisics*.
- 5. Asignar los materiales que componen los dominios del modelo. COMSOL pone a disposición del usuario una gran biblioteca de materiales. Sin embargo, las condiciones de cada material pueden incluirse manualmente y luego ser añadidas a la biblioteca para su uso posterior.
- 6. Aplicar las correctas condiciones a los dominios y a sus límites en el modelo. Cada interfaz física posee una serie de condiciones estándar que se aplican

automáticamente a cada dominio según la interfaz que lo gobierne. Sin embargo pueden ser reemplazadas manualmente si es necesario.

- 7. Realizar el mallado, bien utilizando el mallado predeterminado, bien poniendo nosotros mismos los parámetros. Por norma general, el mallado triangular estándar es una forma óptima, siempre que se defina el rango de tamaño de cada elemento de forma apropiada.
- 8. El programa resuelve el problema para que el usuario pueda estudiar la solución a través de los métodos de post-proceso y visualización de los que COMSOL dispone.

En el interfaz físico de presión acústica la única variable dependiente es la presión p. Sin embargo para nuestras simulaciones deberemos definir la densidad  $\rho_0$  y la velocidad del sonido  $C_S$ . A la hora de definir los contornos del modelo, llamados en el programa *boundaries*, se podrá elegir entre varios tipos, pero solamente se utilizarán tres: Axial Symmetry o simetría axial para aquellos límites que coincidan con el eje de simetría y que induce una simula una resistencia de valor cero a lo largo de la línea; Normal Acceleration o aceleración normal para el segmento que coincide con el transductor, y que es el tipo que se usa (a través de un ajuste preestablecido por COMSOL) para acoplar dominios acústicos con dominios mecánicos y que se deberá definir como una aceleración hacia adentro, o sea, normal al cuerpo como la derivada segunda del desplazamiento, que es la variable mecánica del transductor piezoeléctrico; y Radiation Condition o condición de radiación para el resto de límites, que consiste permitir que la presión acústica tenga el mismo comportamiento en estos segmentos que en el resto del cuerpo. Para las interfases se utilizará el Sound Soft Boundary, que nos indicará que la onda que incide en esta superficie no se verá supeditada a ninguna otra condición más que a la transmisión y reflexión propia del cambio de medio.

El interfaz de modelado de un transductor piezoeléctrico es, como se ha mencionado previamente, una combinación de mecánica de sólidos y la electrostática. Consecuentemente las variables dependientes serán el potencial eléctrico V y las tres componentes del desplazamiento x, y, z. Puesto que en este proyecto se trabajará con simetría 2D, la variable desplazamiento quedará reducida a la componente x. COMSOL proprociona todas las ecuaciones que gobiernan y relacionan ambas variables, por lo que una vez se determina el material piezoeléctrico del dominio, quedan establecidos todos los valores estándar de igual modo que en la interfaz acústica. Así, una vez queden definidos los parámetros de los contornos, las ecuaciones se adaptarán para que la variable de entrada sea la frecuencia de forma automática por el programa.

Para definir los contornos se deberán caracterizar tanto la parte mecánica como la parte eléctrica. En la parte mecánica se utilizarán: Axial Symmetry o simetría axial que indica que el modelo es parte de una estructura más grande que es espejo simétrico sobre el segmento así definido y anula la condición Free que definiremos más adelante; Roller que suprime la condición mecánica por defecto para obligar a que no exista desplazamiento perpendicular al límite, pero si permite el desplazamiento tangencial; y por último Free o libre, que es la condición por defecto en los materiales piezoeléctricos, y permite el libre movimiento en cualquier dirección sin que exista ninguna carga adicional sobre ella. En el caso de la parte eléctrica, se definirán los contornos como: Axial Symmetry o simetría axial, para aquellos límites que coincidan con el eje de simetría y, al igual que antes, simula una resistencia de valor cero a lo largo del segmento; Ground o tierra, que asigna un potencial de valor cero al segmento; Electric Potencial o potencial eléctrico, donde el usuario asignará un valor de potencial al segmento así definido; y Zero Charge o carga cero, que es el valor electrostático por defecto y que como su nombre indica, designa que no hay carga eléctrica en ese segmento.

Una vez realizado el mallado y resuelto el problema, obtendremos una imagen del resultado. Sin embargo, esta imagen es estática, por lo que para trabajar con ella lo más acertado es exportar la simulación a MATLAB.

MATLAB es un sofware matemático muy utilizado que integra computación, visualización y programación en un medio fácil de usar donde tanto los problemas como las soluciones se presentan en una notación matemática familiar. MATLAB incluye matemática y computación; desarrollo de algoritmos; adquisición de datos; modelado, simulación y creación de prototipos; análisis, exploración y visualización de datos; gráficos científicos y para ingeniería; y desarrollo de aplicaciones, incluyendo creación de interfaces gráficas para usuario.

MATLAB posee una gran cantidad de herramientas, que son colecciones de funciones MATLAB (*M-files*) que extienden el medio de trabajo para resolver clases particulares de problemas. Cuando se trabaja con MATLAB y COMSOL de forma simultánea, éste último añade una serie de bibliotecas con subfunciones que resuelven matemáticamente distintas partes de la simulación. De esta manera, cuando se exporta una simulación determinada se crea un M-file, que es el cuerpo de un programa donde se plasman todas las variables que se introducen con llamadas a los subprogramas de las librerías COMSOL. De esta manera, no sólo se pueden obtener imágenes dinámicas de los resultados de una simulación, si no que se puede modificar el programa principal para realizar distintas simulaciones sin repetir de nuevo todos los pasos de COMSOL.

# Capítulo 3

# Metodología de Trabajo

# **3.1.** Material Examinado

#### 3.1.1. Propiedades del material.

El material a examen será una aleación de acero, que es uno de los materiales más utilizados en la industria debido a su versatilidad, resistencia, además de ser relativamente barato. El acero es principalmente una aleación de hierro y carbono donde el porcentaje de éste último no supere el 1,7% del total resultante, aunque puede estar aleado con otros materiales. Existen diversos tipos de aceros, dependiendo de su porcentaje de carbono y su resistencia, como el acero aleado, el acero de baja aleación y el acero inoxidable. Sin embargo para este estudio se ha optado por el acero al carbono, ya que el 90% de los aceros empleados (por ejemplo, en maquinaria, carrocerías y estructuras) son de este tipo. Se caracteriza por tener una cantidad variable de carbono, lo que da lugar a las distintas clases de acero al carbono, junto a otros materiales que no pueden superar en 1,65% en el caso del manganeso, el 0,6% de silicio y el 0,6% de cobre.

La pieza empleada en este estudio está elaborada con un acero al carbono poco aleado denominado S275JR, cuya composición química puede verse en la Tabla 3.1.

DESIGNACIÓN ACTUAL		ELEMENTOS QUE LO COMPONEN (%)								
Simbólica	Numérica	С	Si	Mn	Р	S	N			
S275JR	1.0044	0.16	0.22	1.08	0.018	0.009	0.008			

Tabla 3.1: Composición química de la probeta[2].

Dentro de las características propias del acero, las dos necesarias para realizar este estudio son la densidad  $\rho_0 = 7850 \ Kg/m^3$ y la velocidad del sonido  $C_S = 5280 \ m/s$ .

## 3.1.2. Probeta experimental.

Para obtener los datos experimentales que posteriormente se utilizarán para comparar con las simulaciones se ha empleado una probeta en forma de prisma rectangular de dimensiones 255 mm de largo, 130 mm de ancho y 60 mm de altura. Esta probeta se caracteriza con una serie de defectos distribuidos uniformemente a lo largo de toda la pieza y de 30 mm de profundidad , cuya sección puede ser cuadrada o circular y sus dimensiones varían de 1 a 5 mm de lado y diámetro respectivamente, como se observa en la Figura 3.1. Puede consultarse un plano detallado de la pieza en al Apartado III.



Figura 3.1: Pieza probeta[2].

El proceso elegido para su fabricación es la mecanización por electroerosión. Este método se basa en generar una descarga eléctrica entre una pieza del material a mecanizar (que obviamente debe ser conductor) y un electrodo que va arrancando partículas de material hasta que la pieza se adapta a la forma del electrodo. Existen varios tipos de electroerosión, pero en nuestro caso se ha optado por la electroerosión por penetración, que consiste en que un electrodo con la forma del defecto en negativo vaya penetrando paulatinamente en el material hasta obtener la profundidad deseada.

Con esta pieza se quiere estudiar la influencia del tamaño y la forma del defecto en la propagación ultrasónica, por tanto, la posición de los defectos se ha elegido de forma que el ultrasonido recorra la misma distancia en el material al interferir con el defecto, lo cual permite una correcta comparación de los ecopulsos, como se observa en la Figura 3.2.

Por otra parte, el hecho de elegir este tipo de defectología se debe a que existen muchas dificultades cuando se trabaja con defectos reales por lo que, para este tipo de estudio se utilizan defectos aislados e idealmente orientados, cosa que favorece la inspección. En este caso se asume la idealidad de los defectos naturales y se busca la semejanza de éstos con los artificiales, siendo los más



Figura 3.2: Captura de ecos[2].

habituales reflectores cilíndricos y cuadrados. [17, 18, 19, 20]

# 3.2. Captura experimental de ecopulsos

#### 3.2.1. Equipo de captura ultrasónica.

Para realizar la captura y visualización de los ecos ultrasónicos de forma experimental se utiliza el equipo USLT2000 de Krautkramer, que puede verse en la Figura 3.3, con el que se obtiene la envolvente de los ecopulsos procedentes de la pieza objeto a estudio.

Este equipo de exploración está instalado en un PC portátil, que permite monitorizar las exploraciones en tiempo real con una gran velocidad de actuación. La pantalla a color permite detectar piezas que necesiten de gran resolución, como pueden ser los puntos de soldadura.

Se maneja fácilmente a través de una interfaz gráfica en un entorno Windows, y como el equipo de medida está instalado en un PC estándar, se pueden instalar cualesquiera aplicaciones necesarias para mejorar el procesado de las señales en el mismo aparato, aunque hay que respetar las limitaciones de hardware del computador para no ralentizar las capturas.

Mención aparte debe darse al palpador. Se trata del sensor ultrasónico que se observa en la Figura 3.4, el modelo MSEB-4E de Krautkramer, un palpador



Figura 3.3: Equipo de captación USLT2000.

de incidencia normal, de doble cristal para el trabajar como emisor y receptor y cuya frecuencia de trabajo es de 4 MHz.



Figura 3.4: Palpador MSEB-4E.

Se ha optado por este palpador por ser del tipo utilizado para la inspección de piezas con superficies paralelas, además de que al ser de doble cristal, si se ajusta el equipo correctamente se eliminará la zona muerta del haz ultrasónico aumentando la resolución a corta distancia.

## 3.2.2. Proceso de captación de datos.

El método seleccionado para los ensayos es la técnica de pulso-eco mediante el contacto directo. Es la técnica más común por su facilidad de uso y simplicidad de

interpretación. El contacto directo es la técnica por la cual el sensor se coloca sobre la superficie de la pieza, sobre la que previamente se ha aplicado un gel acoplante que ayude a la penetración de la señal emitida en el material. El método del pulso-eco consiste en, con un mismo palpador, emitir la señal y recibir el sonido que se refleja, a partir de la cual se detectan las discontinuidades.

Antes de comenzar a realizar las capturas, se procederá a calibrar el equipo. Este calibrado consiste en ajustar el equipo a la pieza que se quiere estudiar, primero seleccionando el material de trabajo, es decir, en nuestro caso el acero al carbono S275JR, para comprobar que la velocidad de propagación del sonido se corresponde con la que debe obtenerse para este material, 5280 m/s. El segundo paso trata de ajustar el sensor haciendo coincidir la profundidad de la pieza (130 mm) con el eco de fondo (hay que recordar que se trata del eco que retorna después que la onda ultrasónica atraviese la pieza entera sin encontrarse ninguna discontinuidad).

Una vez realizado el calibrado, se procede a la captura de los ecopulsos. Aplicando el gel acoplante ZG-F de la casa Krautkramer, se procederá a desplazar manualmente el sensor a lo largo de la pieza, obteniendo los datos en las zonas sensibles para nuestro estudio, es decir, aquellas donde se ha inducido una discontinuidad.

Como puede verse en la Figura 3.2, la posición ideal para la obtención de los ecos es el punto medio de la heterogeneidad, puesto que, para la simulación, se considerará la opción de simetría axial.

Una vez concluidas las capturas se analizan los datos y se determinan cuales piezas están defectuosas y en qué zonas.

# 3.3. Simulación de la Propagación Ultrasónica en Sólidos

En este caso la propagación ultrasónica en sólidos que se va a simular es la correspondiente a la de la pieza de acero descrita en el apartado anterior. Puesto que los defectos inducidos en la probeta penetran en ella de forma paralela a la superficie, se puede analizar la dispersión de la presión acústica a lo largo de la pieza en dos dimensiones, ancho y largo, sin que la profundidad sea un factor a tener en cuenta. Además, ya que se ha elegido aplicar la opción de simetría axial, se simularán porciones rectangulares de la pieza probeta de 20 mm de ancho por 130 mm de largo donde una de las aristas longitudinales se toma como el eje de simetría. Sobre este eje, a 42,5 mm de altura, estarán centrados los defectos, ya sean medios cuadrados o medios círculos, cuyos lados y diametros,

respectivamente, irán variando de 1 a 5 mm. Por otro lado, el sensor piezoeléctrico se simulará como un rectángulo de longitudes 8,25 por 5 mm. En la Figura 3.5 puede observarse un sencillo esquema acotado con un ejemplo de una unidad de simulación, en este caso con un defecto circular.



Figura 3.5: Esquema ejemplo de una unidad de simulación.

El problema se resuelve en dos etapas que se describen a continuación.

### 3.3.1. Simulación mediante COMSOL.

Para el primer tramo de simulaciones se utilizará el programa de simulaciones físicas COMSOL. Este paso consiste en simular la pieza en sus tres estados posibles: muestra libre de defectos, muestra con un defecto cuadrado y muestra con un defecto circular. Cada una de estas tres simulaciones constará de los siguientes pasos:

1. Elección de los módulos de simulación. Antes de comenzar, al abrir el programa COMSOL, se elegirá la opción *Multiphisics* puesto que se simularán dos fenómenos físicos distintos. Después de esto, se añadirán tantos fenómenos físicos como se necesiten. Puesto que la aplicación de los ultrasonidos experimentalmente ha sido de forma normal, esto es, el haz ultrasónico es perpendicular a la superficie de la pieza a estudio, se utilizará una geometría con simetría axial en 2D, para ahorrar tiempo de computación. Una vez elegida esta opción, del menú desplegable se abrirá el módulo de acústica, y a partir de éste, se añadirán los dos tipos que buscamos: en nuestro

caso simetría piezo-axial (*Piezo Axial Symmetry*) para el palpador y presión acústica (*Pressure Accoustics*) en el caso de la pieza. Es en este punto donde el programa COMSOL define las variables de cada fenómeno físico: *acpr* para la presión y *smpaxi* para el efecto piezoeléctrico. Ver Figura 3.6.

New Model Library User	Models Open Settings				
Space dimension:	Axial symmetry (2D) ysics try, Stress-Strain ucture Interaction pustics s s s sthere interaction pustics s s Potential Flow protectial Flow ymmetry pring Module odule		Multiphysics Add Remove Geom1 (2D) Pressure Acoustics (acpr) Plezo Axial Symmetry (smpaxi) Dependent variables: uor w V Application Mode Properties Add Geometry		
🕀 🍒 RF Module		-	Add Frame		
Dependent variables:	uor2 w2 V2		Ruling application mode:		
Application mode name: smpaxi2			Pressure Acoustics (acpr)		
Element:	Lagrange - Quadratic	•]	Multiphysics		

Figura 3.6: Módulos de simulación.

- 2. Dibujo de las geometrías. Una vez definidos todos los parámetros iniciales de la simulación, se abre la pantalla donde se dibujarán la pieza de ensayo y el sensor con sus medidas reales. No se debe olvidar que al estar trabajando con simetría axial, se dibujará solamente la mitad longitudinal de ambos. Es aquí donde se ve el beneficio de la simetría, puesto que los defectos estarán justo en eje de simetría, permitiendo ser dibujadas como contorno de la pieza, y no como una sección aparte de ella para luego ser sustraídas, lo que significa mucho más trabajo. También se dibujará una geometría que ocupe el espacio que ocupa el defecto, puesto que dejarlo sin nada indicaría que dentro del defecto solamente hay vacío. Una vez dibujadas todas las partes, hay que cerciorarse de que están perfectamente unidas y de que no hay desplazamientos relativos entre ellas. El resultado quedará como se aprecia en la Figura 3.7.
- 3. **Definición de las variables escalares.** En este punto se añadirán aquellas variables necesarias para la simulación. Se definirá la frecuencia de excitación como la frecuencia de trabajo de los ensayos, 4 MHz. También es



Figura 3.7: Construcción de geometrías.

necesario sincronizar las variables equivalentes. Esto sirve para asegurarse de que la frecuencia del transductor piezoeléctrico y la de excitación sean la misma. El resto de parámetros quedarán definidos con sus valores por defecto, como queda ilustrado en la Figura 3.8.

γ	Hz	Excitation frequency	
/			
	1	Circumferential wave number	
-i*k_acpr*z)[Pa]	Pa	Incident pressure wave	
pr	1/m	Wave number in far-field	
6	Pa	Pressure reference	
	Hz	Excitation frequency	
_tot_smpaxi	J	Total stored energy	
tot_smpaxi	W	Total power dissipation	
silon0_smpaxi 8.854187817e-12 F/m Permittivity of vacuum			
	-i*k_acpr*z)[Pa] pr 6 _tot_smpaxi _tot_smpaxi 4187817e-12	-i*k_acpr*z][Pa] Pa pr 1/m 6 Pa htz _tot_smpaxi J _tot_smpaxi W 4187817e-12 F/m	#*K_acpr*2)[Pa]         Pa         [Incident pressure wave           pr         1/m         Wave number in far-field           6         Pa         Pressure reference           Hz         Exclabiton frequency           Lot_smpaxi         J         Total stored energy           tot_smpaxi         W         Total power disspation           4187817e-12         F/m         Permittivity of vacuum

Figura 3.8: Definición de variables escalares.

4. Relación de dominios con geometrías. El objetivo es definir el fenómeno físico que gobierna cada geometría considerada. Para ello se seleccionará del árbol de módulos el piezoeléctrico y en la opción Subdomain Settings se activará la geometría correspondiente al piezoeléctrico, en nuestro caso la geometría número 1, y se desactivarán la número 2 y 3 como puede verse en las Figuras 3.9b y 3.9c. En este mismo menú, se definirán las características del palpador, manteniendo activado este dominio y cargando de la librería de materiales el tipo de piezoeléctrico utilizado en los ensayos, en este caso el *Lead Zirconate Titanite (PZT-5H)*. Una vez finali-



Figura 3.9: Definición del piezoeléctrico.

zado, se sigue un proceso análogo para las geometrías bajo presión acústica. Para ello se selecciona del árbol de módulos la presión acústica y en Subdomain Settings se desactiva la geometría 1 (Figura 3.10a) y se añaden las características de los materiales. En este caso se definirán manualmente los parámetros del acero al carbono para la geometría 2 (la densidad  $\rho_0 = 7850$  $Kg/m^3$ y la velocidad del sonido  $C_S = 5280 m/s$ , Figura 3.10b) y se dejarán en la geometría 3 los parámetros por defecto, que son los parámetros del aire (Figura 3.10c).

5. Caracterización de los contornos. El modelado no estará completo si no se definen correctamente cada uno de los límites de las geometrías. Para ello el programa numerará los contornos como se puede ver en la Figura 3.11. Cada uno de los tipos de límites utilizados se han explicado en el Apartado 2.5 y, como se anotó allí, se deberá tener en cuenta que los contornos del palpador, al tratarse de un elemento piezoeléctrico, deberán ser



Figura 3.10: Definición de la presión.

definidos tanto su vertiente eléctrica como su configuración física. Para definir los límites del piezoeléctrico, se seleccionará dicho elemento del árbol de módulos y se abrirá el menú *Boundary Settings*. Este menú tendrá tres pestañas: *Constraint*, donde se definirá la parte mecánica; *Electric BC*, para caracterizar la parte eléctrica; y *Load*, que sólo se utilizará para el segmento de contacto. Los segmentos quedarán definidos de la siguiente manera:

- Contorno n<sup>o</sup> 1: segmento sobre la línea de simetría. Se definirán como Axial Symmetry tanto la parte mecánica como la parte eléctrica.
- Contorno n<sup>o</sup> 2: se define como *Roller* la parte mecánica y *Ground* la parte eléctrica.
- Contorno n<sup>0</sup> 4: posiblemente el límite más importante. Es el segmento de acoplamiento de los dos fenómenos a estudio. La parte mecánica se caracteriza como *Free*, mientras que la parte eléctrica se define como *Electric Potential*, añadiendo el valor de alimentación del palpador, en nuestro caso 10 voltios. De esta manera, junto con el segmento anterior queda definida la diferencia de potencial entre este segmento y la tierra, que será el contorno paralelo. Se debe tener en cuenta además que al tratarse del segmento de contacto donde se unen los dos ma-



Figura 3.11: Numeración de contornos.

teriales, se ha de poner en relación este material con la variable que rige el otro, por lo que en la pestaña *Load* se añadirá la variable p, la presión. Esto es, va a definir la dirección y el sentido de la propagación de la presión acústica en relación al piezoeléctrico. Como la presión se propagará verticalmente y hacia arriba, la coordenada horizontal (a la que COMSOL asigna la letra r) se dejará a cero mientras que la coordenada vertical (asignada con la letra z) se definirá como -p. El signo negativo indica que la presión se propaga en sentido contrario a la caída de potencial (ver Figura 3.12).



Figura 3.12: Definición del segmento de contacto.

 Contorno nº 11: se caracterizará la parte mecánica como Free y la parte eléctrica como Zero Charge.

Las geometrías bajo presión acústica seguirán un proceso análogo. Se selecciona del árbol el módulo correspondiente a presión y se abre *Boundary*  *Settings.* En esta ocasión únicamente hay un fenómeno físico, la presión, por lo que se define cada tipo en la pestaña *Conditions.* Se tendrá en cuenta que hay dos geometrías, cada una de un distinto material, por lo que existirán límites internos, o interfases, y externos. Los segmentos se definirán:

- Contornos nº 3, nº5 y nº 7: son los segmentos coincidentes con el eje de simetría. Se definirán como Axial Symmetry.
- Contorno  $n^{0}$  4: de nuevo se ha de caracterizar el contorno de contacto en relación a la variable que rige el material opuesto. Como ya se explicó, se definirá como la aceleración normal (*Normal Acceleration*), es decir, la derivada segunda de la variable que gobierna el piezoeléctrico. Se introducirá la secuencia  $w_{tt\_smpaxi}$  que indica derivada (w) segunda (doble t) de la variable del palpador (smpaxi), como se observa en la Figura 3.13a.
- Contornos nº 6, nº 8 y nº10: contornos sobre las interfases que separan los dos materiales bajo presión acústica. Se caracterizarán como Sound Soft Boundary.
- Contornos nº 9, nº 12 y nº 13: se trata de los contornos exteriores. Quedarán definidos como *Radiation Condition* con los valores asignados por defecto (ver Figura 3.13b).



Figura 3.13: Definición de contornos.

Una vez realizado todo este proceso, las geometrías quedan totalmente definidas y se puede comenzar el proceso de ejecución de la simulación.

6. Realización del mallado. El primer paso que se seguirá será el de parametrizar el mallado. En vez de optar por el mallado por defecto, se elegirá la opción de la configuración del mallado por el usuario en el menú Free Mesh Parameters. Para que el método de elementos finitos sea viable, se estimará un periodo de muestreo que esté relacionado con la frecuencia de trabajo. Según demostró el profesor Pérez Oria, un criterio muy equilibrado será la quinta parte de la longitud de onda. Por ello, utilizando los datos conocidos de los valores de velocidad acústica del material y la frecuencia, se introduce la Ecuación 3.1 como se ve en la Figura 3.14.

Subdomain   Boundary   Point	Advanced	OK
Predefined mesh sizes:     Nor	rmal 👻	Cano
Oustom mesh size		App
Maximum element size:	5280/4e6/5	Hal
Maximum element size scaling factor:	1	
Element growth rate:	1.3	
Mesh curvature factor:	0.3	
Mesh curvature cutoff:	0.001	
Resolution of narrow regions:	1	
vo opumize quaixy Refinement method: Regular →		

Figura 3.14: Configuración del mallado.

$$\frac{\frac{5280}{4x10^6}}{5} \tag{3.1}$$

Una vez definido, se genera el mallado representado en la Figura 3.15.



Figura 3.15: Mallado.

7. Resolución del problema. Una vez realizada la malla, se procede a resolver el problema. Para ello, después de que el programa realice los cálculos y presente la solución, se deberán definir los parámetros de salida. Puesto que en la realidad no tiene sentido hablar de presiones acústicas negativas, en las simulaciones se trabajará con valores absolutos. En el menú *Plot Parameters*, en la pestaña *Surface*, se cambiará la variable p por su valor

ninupai jureani	ne Parti Turfoco	cle Tracing	Max/Min	Deform	Animate
General	Surrace	Contour	Bou	ndary	Arrow
Surface plot					
Surface Data Height	Data				
	,				
Predefined quantities	:		-	Range	
Expression:	abs(p)			Smooth	h
Unit:	Pa		•	Recove	er
Coloring and fill					
Coloring: Inter	polated ·	➡ Fill s	tyle: Fi	led	-
Surface color					
Olor table:	Rainbow	-	Reverse [	Color leger	nd
O Uniform color:	Color	1 📕			
0					

absoluto introduciendo el código abs(p), como puede verse en la Figura 3.16. Una vez se ha parametrizado la variable de salida, se obtiene la dispersión

Figura 3.16: Parámetros de salida.

de la presión acústica por toda la superficie de la pieza como se ve en la Figura 3.17a. Como lo interesante para este estudio es la variación de la presión en sentido longitudinal, se obtiene la captura a lo largo del eje de simetría, obteniéndose la Figura 3.17b.



Figura 3.17: Resolución.

Como ya se comentó anteriormente, la imagen obtenida es una imagen estática. Para obtener una imagen dinámica con la que se pueda trabajar se exportarán las simulaciones a MATLAB y se trabajará con este programa.

### 3.3.2. Simulación mediante MATLAB.

Una vez que la simulación con COMSOL se ha exportado a MATLAB, éste genera un M-File con un programa que realiza exactamente la misma simulación. Dicho programa es básicamente una sucesión de llamadas a subrutinas propias de la biblioteca generada por COMSOL, pero existen una serie de líneas en las que se pueden introducir o modificar los parámetros que se han ido definiendo a lo largo de la simulación. El programa completo se puede ver a continuación y, más adelante se explicarán aquellas líneas de código más importantes.

```
1
    % COMSOL Multiphysics Model M-file
2
    % Generated by COMSOL 3.5a (COMSOL 3.5.0.603)
3
    flclear fem
4
5
\mathbf{6}
    % COMSOL version
7
    clear vrsn
    vrsn.name = 'COMSOL 3.5';
8
9
   vrsn.ext = 'a';
10
   vrsn.major = 0;
11
    vrsn.build = 603;
12
    vrsn.rcs = '$Name:
                           $';
    vrsn.date = '$Date: 2008/12/03 17:02:19 $';
13
14
    fem. version = vrsn;
15
    % Geometry
16
    carr = \{curve2([0, 0.0080], [0, 0], [1, 1]), \ldots\}
17
18
             \operatorname{curve2}([0.0080, 0.0080], [0, -0.0050], [1, 1]), \ldots
             \operatorname{curve2}([0.0080, 0], [-0.0050, -0.0050], [1, 1]), \ldots
19
             \operatorname{curve2}([0,0], [-0.0050,0], [1,1])\};
20
    g1=geomcoerce('solid', carr);
21
    carr = \{curve2([0, 0.02], [0, 0], [1, 1]), \ldots\}
22
             curve2([0.02, 0.02], [0, 0.13], [1, 1]), \ldots
23
             curve2([0.02,0],[0.13,0.13],[1,1]), ...
24
             curve2([0,0],[0.13,0.0445],[1,1]),...
25
26
             curve2([0,0.0020],[0.0445,0.0445],[1,1]), ...
             curve2([0.0020,0.0020],[0.0445,0.0405],[1,1]),...
27
             curve2([0.0020,0],[0.0405,0.0405],[1,1]),...
28
29
             curve2([0,0],[0.0405,0],[1,1])};
30
    g2=geomcoerce('solid', carr);
    carr = \{curve2([0, 0.0020], [0.0445, 0.0445], [1, 1]), \dots \}
31
32
             curve2([0.0020,0.0020],[0.0445,0.0405],[1,1]),...
33
             curve2([0.0020,0],[0.0405,0.0405],[1,1]), ...
34
             \operatorname{curve2}([0,0],[0.0405,0.0445],[1,1]);
35
    g3=geomcoerce('solid', carr);
36
```

```
% Analyzed geometry
37
   clear s s.objs=\{g1, g2, g3\};
38
   s.name = \{ 'CO1', 'CO2', 'CO3' \};
39
40
   s.tags = \{ g1', g2', g3' \};
41
42
   fem.draw=struct('s',s);
43
   fem.geom=geomcsg(fem);
44
45
    % Initialize mesh fem.mesh=meshinit(fem, ...
                       'hmax', [5280/4e6/5];
46
47
48
    % (Default values are not included)
49
50
   % Application mode 1
   clear appl
51
  appl.mode.class = 'AcoPressure';
52
53
   appl.mode.type = 'axi';
54
  appl.module = 'ACO';
55 appl.sshape = 2;
56 appl.border = 'on';
57 appl.assignsuffix = '_acpr';
58 clear bnd bnd.type = { 'cont', 'RAD', 'ax', 'NA', 'SS' };
  bnd.nacc = \{0, 0, 0, 'w_{tt_smpaxi'}, 0\};
59
60 bnd.ind = [1, 1, 3, 4, 3, 5, 3, 5, 2, 5, 1, 2, 2];
61 appl.bnd = bnd;
62 clear equ equ.rho = \{1.25, 7850, 1.25\};
63 equ. cs = \{343, 5280, 343\};
64 equ.usage = \{0, 1, 1\};
65 equ.ind = [1, 2, 3];
66 appl.equ = equ;
67
   appl.var = \{ 'freq ', '4e6 ' \};
68
  fem.appl\{1\} = appl;
69
70
   % Application mode 2
71
   clear appl
72
   appl.mode.class = 'PiezoAxialSym';
73
   appl.mode.type = 'axi';
  appl.module = 'ACO';
74
75 appl.gporder = 4;
76 appl.cporder = 2;
77 appl.sshape = 2;
78 appl.assignsuffix = '_smpaxi';
  clear prop
79
80 prop.analysis='freq';
81
   clear weakconstr
82 weakconstr.value = 'off';
83 weakconstr.dim = { 'lm2' , 'lm3' , 'lm4' };
```

```
prop.weakconstr = weakconstr;
  84
        appl.prop = prop;
  85
  86
       clear bnd
  87
       bnd.electrictype = { 'nD0', 'cont', 'ax', 'V0', 'V' };
  88
       bnd.V0 = \{0, 0, 0, 0, 10\};
        bnd.Fz = \{0, 0, 0, 0, ..., -p'\};
  89
  90
        bnd.constrcond = { 'free ', 'free ', 'axisym', 'roller ', 'free '};
  91
        bnd.ind = [3, 4, 1, 5, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 1, 1];
  92
        appl.bnd = bnd;
         clear equ
  93
        equ.epsilonrT = {{ 'mat1_epsilonrT_1_1_', 'mat1_epsilonrT_1_2_', ...
  94
  95
                                          'mat1_epsilonrT_1_3_'; 'mat1_epsilonrT_2_1_',...
                                          'mat1_epsilonrT_2_2_', 'mat1_epsilonrT_2_3_';...
  96
  97
                                          'mat1_epsilonrT_3_1_', 'mat1_epsilonrT_3_2_',...
  98
                                          'mat1_epsilonrT_3_3_' } , { 3130 ,0 ,0;0 ,3130 ,...
 99
                                          0;0,0,3400\};
         equ.epsilonrS = {{ 'mat1_epsilonrS_1_1_', 'mat1_epsilonrS_1_2_', ...
100
                                          mat1_epsilonrS_{1_3_'};
101
102
                                          'mat1_epsilonrS_2_1_', 'mat1_epsilonrS_2_2_',...
103
                                          'mat1_epsilonrS_2_3_'; 'mat1_epsilonrS_3_1_', ...
104
                                          'mat1_epsilonrS_3_2_', 'mat1_epsilonrS_3_3_'},...
105
                                          \{1704.40, 0, 0; 0, 1704.40, 0; 0, 0, 1433.61\}\};
         equ.rho = \{ 'mat1_rho', 7500 \};
106
         equ.cE = \{\{ 'mat1_cE_1_1_', 'mat1_cE_1_2_', 'mat1_cE_1_3_', ... \}
107
108
                                          'mat1_cE_1_4_', 'mat1_cE_1_5_', 'mat1_cE_1_6_';...
                                          'mat1_cE_2_1_', 'mat1_cE_2_2_', 'mat1_cE_2_3_', ...
109
                                          'mat1_cE_2_4_', 'mat1_cE_2_5_', 'mat1_cE_2_6_';...
110
                                          'mat1_cE_3_1_', 'mat1_cE_3_2_', 'mat1_cE_3_3_', ...
111
                                          'mat1_cE_3_4_', 'mat1_cE_3_5_', 'mat1_cE_3_6_';...
112
                                          'mat1_cE_4_1_', 'mat1_cE_4_2_', 'mat1_cE_4_3_', ...
113
114
                                          'mat1_cE_4_4_', 'mat1_cE_4_5_', 'mat1_cE_4_6_';...
115
                                          'mat1_cE_5_1_', 'mat1_cE_5_2_', 'mat1_cE_5_3_', ...
                                          'mat1_cE_5_4_', 'mat1_cE_5_5_', 'mat1_cE_5_6_';...
116
117
                                          'mat1_cE_6_1_', 'mat1_cE_6_2_', 'mat1_cE_6_3_',...
                                          mat1_cE_6_4_', mat1_cE_6_5_', mat1_cE_6_6_'\}, \dots
118
                                          {1.27205e11,8.02122e10,8.46702e10,0,0,0;8.02122e10,...
119
120
                                          1.27205 \,\mathrm{e11}, 8.46702 \,\mathrm{e10}, 0, 0, 0; 8.46702 \,\mathrm{e10}, ...
121
                                          8.46702e10, 1.17436e11, 0, 0, 0; 0, 0, 0, 2.29886e10, 0, 0; ...
122
                                          0, 0, 0, 0, 2.29886 e10, 0; 0, 0, 0, 0, 0, 2.34742 e10 \};
123
         equ.sE = \{ \{ mat1_sE_1_1, "mat1_sE_1_2, "mat1_sE_1_3, "mat11_sE_1_3, "mat1_sE_1_3, "mat11_sE_1_3, "mat11_sE_1, "mat11_sE_1_3, "mat11
124
                                          'mat1_sE_1_4_', 'mat1_sE_1_5_', 'mat1_sE_1_6_';...
125
                                          mat1_sE_2_1_', mat1_sE_2_2_', mat1_sE_2_3_', \dots
                                          'mat1_sE_2_4_', 'mat1_sE_2_5_', 'mat1_sE_2_6_';...
126
                                          'mat1_sE_3_1_', 'mat1_sE_3_2_', 'mat1_sE_3_3_', ...
127
128
                                          'mat1_sE_3_4_', 'mat1_sE_3_5_', 'mat1_sE_3_6_';...
129
                                          mat1_sE_4_1_', mat1_sE_4_2_', mat1_sE_4_3_',...
                                          'mat1_sE_4_4_', 'mat1_sE_4_5_', 'mat1_sE_4_6_';...
130
```

```
131
                                                               mat1\_sE\_5\_1\_', mat1\_sE\_5\_2\_', mat1\_sE\_5\_3\_',...
132
                                                               'mat1_sE_5_4_', 'mat1_sE_5_5_', 'mat1_sE_5_6_';...
133
                                                               mat1\_sE\_6\_1\_', mat1\_sE\_6\_2\_', mat1\_sE\_6\_3\_', ...
134
                                                               mat1_sE_6_4, mat1_sE_6_5, mat1_sE_6_6, mat1_sE_6, mat1_sE_6,
135
                                                               \{16.5e - 12, -4.78e - 12, -8.45e - 12, 0, 0, 0; -4.78e - 12, \dots\}
                                                               16.5e - 12, -8.45e - 12, 0, 0, 0; -8.45e - 12, -8.45e - 12, \dots
136
137
                                                               20.7e - 12, 0, 0, 0; 0, 0, 0, 43.5e - 12, 0, 0; 0, 0, 0, 0, 43.5e - 12, \dots
138
                                                               0; 0, 0, 0, 0, 0, 0, 42.6 e - 12\};
139
             equ.d = {{ 'mat1_d_1_1_', 'mat1_d_1_2_', 'mat1_d_1_3_', ...
                                                               'mat1_d_1_4_', 'mat1_d_1_5_', 'mat1_d_1_6_';...
140
141
                                                               'mat1_d_2_1_', 'mat1_d_2_2_', 'mat1_d_2_3_',...
                                                               'mat1_d_2_4_', 'mat1_d_2_5_', 'mat1_d_2_6_';...
142
                                                               'mat1_d_3_1_', 'mat1_d_3_2_', 'mat1_d_3_3_',...
143
144
                                                               'mat1_d_3_4_', 'mat1_d_3_5_', 'mat1_d_3_6_' },...
145
                                                               \{0, 0, 0, 0, 741e - 12, 0; 0, 0, 0, 741e - 12, 0, \ldots\}
146
                                                              0; -274e - 12, -274e - 12, 593e - 12, 0, 0, 0 \};
147
             equ.e = \{\{ 'mat1_e_1_1, 'mat1_e_1_2, 'mat1_e_1_3, 'mat1_e_1_3, ... \}
148
                                                               'mat1_e_1_4', 'mat1_e_1_5', 'mat1_e_1_6';...
                                                               'mat1_e_2_1_', 'mat1_e_2_2_', 'mat1_e_2_3_',...
149
                                                               'mat1_e_2_4_', 'mat1_e_2_5_', 'mat1_e_2_6_';...
150
151
                                                               'mat1_e_3_1_', 'mat1_e_3_2_', 'mat1_e_3_3_', ...
                                                               'mat1_e_3_4_', 'mat1_e_3_5_', 'mat1_e_3_6_'},...
152
                                                               \{0, 0, 0, 0, 17.0345, 0; 0, 0, 0, 17.0345, 0, \ldots\}
153
                                                               0; -6.62281, -6.62281, 23.2403, 0, 0, 0 \};
154
155
             equ.usage = \{1, 0\};
156
             equ.ind = [1, 2, 2];
             appl.equ = equ;
157
158
             appl.var = \{ 'freq', '4e6' \};
            fem.appl\{2\} = appl;
159
160
            fem.sdim = { 'r ', 'z '};
161
            fem.frame = \{ 'ref' \};
162
           fem.border = 1;
163
            clear units;
164
             units.basesystem = 'SI';
165
             fem.units = units;
166
167
             % Library materials
168
             clear lib
             lib.mat{1}.name='Lead Zirconate Titanate (PZT-5H)';
169
170
             lib.mat{1}.varname='mat1';
             lib.mat\{1\}.variables.epsilonrT=\{\{3130, 0, 0, 0, 0\}, \dots
171
                                      \{ 3130', 0' \}, \{ 3400' \} \};
172
            lib.mat{1}.variables.d={\{ '0[C/N] ', '0[C/N] ', '0[C/N] ', '0[C/N] ', '0[C/N] ', ...
173
                                       '7.41e-010[C/N]', '0[C/N]'}, { '0[C/N]', '0[C/N]', '0[C/N]', ...
174
                                       7.41e - 010[C/N], 0[C/N], 0[C/N], 0[C/N], 7.41e - 010[C/N], 0.5274e - 010[C/
175
176
                                       '-2.74e - 010[C/N] ', '5.93e - 010[C/N] ', ...
                                       0[C/N], 0[C/N], 0[C/N]; 0[C/N];
177
```

```
lib.mat{1}.variables.e={{'0[C/m^2]', '0[C/m^2]', '0[C/m^2]', ...
178
179
                                          0[C/m^{2}], 17.0345[C/m^{2}], 0[C/m^{2}], 17.0345[C/m^{2}], 0[C/m^{2}], 17.0345[C/m^{2}], 17.035[C/m^{2}], 17.0345[C/m^{2}], 17.035[C/m^{2}], 17.035[C/m^{2}],
180
                                          0[C/m^2], 0[C/m^2], 17.0345[C/m^2], 0[C/m^2], ...
181
                                          0[C/m^2], -6.62281[C/m^2], -6.62281[C/m^2], -6.62281[C/m^2], ...
                                          '23.2403[C/m<sup>2</sup>]', '0[C/m<sup>2</sup>]', '0[C/m<sup>2</sup>]', '0[C/m<sup>2</sup>]'};
182
183
              lib.mat{1}.variables.epsilonrS={{'1704.4', '0', '0'}},...
                                         { '1704.4 ', '0 '}, { '1433.6 '};
184
              lib.mat{1}.variables.sE={{'1.65e-011[1/Pa]', '-4.78e-012[1/Pa]', ...
185
                                          -8.45e - 012[1/Pa], 0[1/Pa], 0[1/Pa],
186
                                         \{ 1.65 e - 011 [1/Pa] , -8.45 e - 012 [1/Pa] , 0 [1/Pa] , \dots \}
187
188
                                          0[1/Pa]', 0[1/Pa]'\}, {2.07e-011[1/Pa]', 0[1/Pa]', 0[1/Pa]', ...}
189
                                         0[1/Pa]', { 4.35e - 011[1/Pa]', 0[1/Pa]', 0[1/Pa]', 0[1/Pa]', ...
                                         \{ 4.35e - 011[1/Pa]', 0[1/Pa]' \}, \{ 4.26e - 011[1/Pa]' \} \};
190
              lib.mat\{1\}.variables.rho='7500[kg/m<sup>3</sup>]';
191
              lib.mat{1}.variables.cE={{'1.27205e+011[Pa]', '8.02122e+010[Pa]', \dots
192
                                          '8.46702e+010[Pa]', '0[Pa]', '0[Pa]', '0[Pa]', '0[Pa]'}, ...
193
                                         \{ 1.27205 e + 011 [Pa] , 8.46702 e + 010 [Pa] , 0 [Pa] , ... \}
194
195
                                          '0[Pa]', '0[Pa]'}, { '1.17436e+011[Pa]', '0[Pa]', '0[Pa]', ...
                                         '0[Pa]'},{'2.29885e+010[Pa]','0[Pa]','0[Pa]'},...
196
                                         \{2.29885e+010[Pa]', 0[Pa]'\}, \{2.34742e+010[Pa]'\}\};
197
198
199
              fem.lib = lib;
200
201
              % ODE Settings
              clear ode
202
203
              clear units;
204
              units.basesystem = 'SI';
205
              ode.units = units;
206
              fem.ode=ode;
207
208
              % Multiphysics
209
              fem=multiphysics(fem);
210
211
               % Extend mesh
212
              fem.xmesh=meshextend(fem);
213
               % Solve problem
214
              fem.sol=femstatic(fem, ...
215
                                                                       'solcomp', { 'w', 'V', 'p', 'uor'}, ...
216
                                                                       'outcomp', { 'w', 'V', 'p', 'uor'}, ...
217
                                                                       'blocksize', 'auto');
218
219
220
               % Save current fem structure for restart purposes
221
              fem0=fem;
222
223
               % Plot solution
224
              postplot(fem, ...
```

225	'tridata', {'abs(p)', 'cont', 'internal', 'unit', 'Pa'},
226	'trimap', 'Rainbow',
227	'title', 'Surface: Pressure [Pa]',
228	'axisequal', 'off',
229	'axis', [-9.999999776482583E-4, 0.020999999530613423,
230	-0.011749999411404134, 0.1367499900981784]);

Líneas de la nº 16 a la nº 35: generación de las geometrías. Para dibujar cada segmento se hace una llamada a la rutina *curve2* que genera el segmento to tomando las coordenadas de la forma [(x<sub>inicio</sub>,x<sub>final</sub>),(y<sub>inicio</sub>,y<sub>final</sub>),(1,1)] cuando se trata de segmentos horizontales. Para crear límites curvos se utiliza la técnica de los tres puntos (ver Figura 3.18). Para ello se definirán las



Figura 3.18: Técnica de los tres puntos.

coordenadas como:

 $[(x_{inicio}, x_{centro}, x_{final}), (y_{inicio}, y_{centro}, y_{final}), (1, 0.7071067811865475, 1)]$ 

Una vez definidos todos los segmentos, la función *geomcoerce* crea un sólido a partir de ellos. De esta manera, solamente variando los puntos de contorno de los segmentos, se irán creando los distintos tamaños de defecto para mostrar las variaciones de respuesta sin necesidad de repetir las simulaciones con COMSOL.

- Líneas nº 45 y nº 46: parametrización del mallado. En caso de querer modificar el tamaño de los elementos del mallado, aquí variaríamos los parámetros.
- Líneas de la nº 50 a la nº 68: caracterización de la geometría bajo presión acústica. Los parámetros que hemos definido en COMSOL vendrán dados por la línea 57 para definir la variable de presión *acpr*; la línea 58 para los tipos de contorno; la línea 59 para introducir el valor de la aceleración normal *w\_tt\_smpaxi*; las líneas 62 y 63 donde se caracteriza el material con la densidad y la velocidad acústica respectivamente; y la línea 67 para definir la frecuencia de trabajo.

- Líneas de la nº 70 a la nº 165: caracterización del piezoeléctrico. En este grupo, las líneas de código más reseñables serán: la línea 78, donde se define la variable *smpaxi* que rige este fenómeno; la línea 87 donde se caracterizan los contornos para la descripción eléctrica; la línea 88 para introducir el valor del potencial eléctrico (10 V); la línea 89 en la que se ponen en relación las variables de los dos materiales, en este caso introduciendo -*p*; línea 90 donde se describen los contornos según el fenómeno mecánico; y la línea 158 para la frecuencia de trabajo.
- Líneas de la nº 167 a la nº 199: obtención de los datos desde la librería de materiales y aplicación a las geometrías correspondientes.
- Línea n<sup>o</sup> 209: creación de la variable *fem*. Esta variable es imprescindible, puesto que es aquella que almacenará todos los datos de la resolución del problema.
- Línea  $n^0$  212: generación del mallado.
- Líneas de la n<sup>0</sup> 215 a la n<sup>0</sup> 218: resolución del problema.
- Línea n<sup>o</sup> 221: en esta línea de código se salva la respuesta en la variable fem.
- Líneas de la n<sup>0</sup> 223 a la n<sup>0</sup> 230: se plasma la solución en una imagen. De éstas, puede verse en la línea 222 que se trabaja con los valores de valor absoluto de presión.

Una vez que se ha realizado la simulación, tenemos todos los valores de presión acústica guardados en la matriz *fem*. En nuestro caso, lo interesante es representar en una gráfica las variaciones de presión respecto al desplazamiento a lo largo de eje de simetría, es decir, el segmento que atraviesa totalmente la discontinuidad. Para obtener esta representación se programa el siguiente código:

```
1 [x y] = meshgrid (0:0.0001:25e-3, 0:0.0001:140e-3);
```

```
2 xx = x(:);
```

```
3 \quad vv = v(:);
```

4 pts = [xx yy]';

```
5 p=postinterp(fem, 'abs(p)', pts);
```

- 6 p=reshape(p, size(y,1), size(y,2));
- 7 **save** pieza4cuadrado p x y
  - Línea nº 1: este código creará dos matrices x e y de igual tamaño y cuyo número de columnas y filas vendrá dado por cada uno de los factores del

comando *meshgrid*. Esto es, si es primer factor va desde 0 hasta 0.025 y el segundo va desde 0 hasta 0.140, ambos en pasos de 0.0001, dichas matrices tendrán un tamaño de 251 columnas y 1401 filas. La diferencia entre ambas matrices vendrá dada por la manera en que se da valor a los elementos de cada matriz. En nuestro caso, para la matriz x, los elementos serán iguales por columna pero se irán incrementando en una unidad (unidad dependiente del paso) por fila tantas veces como diga el primer factor del comando, mientras que para la matriz y los elementos se irán completando al contrario según el segundo factor del comando. La manera en que quedan dispuestas estas matrices es la siguiente:

	0	0,00	001	0,00	002	0,00	)03		0,20	)
x =	0	0,00	001	0,00	002	0,00	)03		0,20	)
	0	0,00	001	0,00	002	0,00	)03		0,20	)
	0	0,00	001	0,00	002	0,00	)03		0,20	)
			•							
	0	0,00	001	0,00	002	0,00	)03		0,20	)
	(	)	(	)	(	)	(	)		0
	$0,\!0$	001	0,0	001	0,0	001	0,0	001		0,0001
y =	$0,\!0$	002	0,0	002	$0,\!0$	002	0,0	002		0,0002
	$0,\!0$	003	$0,\!0$	003	$0,\!0$	003	$0,\!0$	003		0,0003
	0,1	40	0,1	40	0,1	40	0,1	40		0,140

- Líneas nº 2 y nº 3: se crean dos arrays xx e yy de tamaño de 351651 filas (osea 251 por 1401) y 1 columna, tomando respectivamente los valores de la primera columna de x (que serán todo ceros) y de la primera columna de y (que será la secuencia desde 0 hasta 0.140 en pasos de 0.0001, repetida una y otra vez).
- Línea  $n^0$  4: se genera una matriz *pts* de dos filas, donde los elementos de la primera fila serán los valores de *xx* y los de la segunda fila serán los valores de *yy*, obteniéndose:

• Línea  $n^{0}$  5: lo que hace este comando es recorrer la variable *fem*, donde como se ha dicho anteriormente están guardados los valores de abs(p), tomando todos los valores de presión que se encuentran en las posiciones que va marcando *pts* y los guarda en la matriz *p*.

- Línea nº 6: en esta posición se usan dos comandos. Por un lado se encuentra la función size que devuelve el tamaño de la dimensión de la matriz que indica el primer factor, tamaño que viene especificado por el número del segundo factor. En nuestro caso, como se trabaja con la matriz y, que tiene solamente dos dimensiones, 1 equivale a número de columnas y 2 a número de filas, por lo que al usar size (y,1) se obtendrá el número de columnas de y, o sea, 251, y al utilizar size (y,2) se obtendrá el número de filas, 1401. Una vez conocidos estos dos parámetros, el comando reshape remodela la matriz p de forma que una vez aplicado, la "nueva" matriz p tenga los mismos elementos pero esté redimensionada según los parámetros que nos ha devuelto size, esto es, las mismas dimensiones que la matriz y.
- Línea nº 7: por último, se creará un fichero de nombre *pieza4cuadrado*, donde el número natural nos indica el tamaño de la discontinuidad y la segunda palabra el tipo (por ejemplo, para una discontinuidad circular de 2 mm el fichero se llamará *pieza2circulo*). En este fichero se guardarán los valores de los arrays p, x e y.

Ya con todas las simulaciones realizadas y con sus respuestas convenientemente guardadas en sus respectivos ficheros, se realiza el procesado generando las gráficas de variación de presión a lo largo del desplazamiento longitudinal de la pieza y comparándolas entre sí según tamaño y tipo de la discontinuidad. Para ello se crea el siguiente programa:

```
1
   clear all; close all, clc;
\mathbf{2}
   load piezabase
   p_pb=p;
3
   load pieza4circulo
4
5
   p_circaba=p;
6
   load pieza4cuadrado
7
   p_cuadaba=p;
   figure; surface(x,y,p_pb)
8
   shading interp; grid on;
9
   figure; plot(y(:,1), p_{-}pb(:,1))
10
11
   hold on;
   plot(y(:,1),p_circaba(:,1),'r');
12
   plot(y(:,1), p_cuadaba(:,1), 'g')
13
   legend ('Pieza Base', 'Pieza 4 Circulo Abajo',...
14
                     'Pieza 4 Cuadrado Abajo')
15
16
   grid on;
```

Este caso se trata de la comparación de los dos distintos tipos de defectos de 4 milímetros de tamaño frente a la pieza base, aquella que no tiene ningún tipo de discontinuidad. A continuación se explica cada paso para plasmar en una figura la comparación de las gráficas:

- Línea n<sup>0</sup> 1: estos comandos limpian y/o cierran todas aquellos parámetros y variables que pudieron quedar abiertas y que podrían interferir en nuestro resultado.
- Líneas  $n^0$  2 y  $n^0$  3: se carga el fichero *piezabase* y se copian todos los valores de presión guardados en la matriz p correspondientes a ese fichero en el array  $p_pb$ .
- Líneas de la nº 4 a la nº 7: se realiza un proceso análogo al paso anterior para las simulaciones de la pieza con discontinuidad. Se obtendrán así otros dos arrays de valores de presión *p\_circaba* y *p\_cuadaba*.
- Líneas nº 8 y nº 9: este paso sirve como comprobación. Aquí se obtendrá la dispersión de la presión a lo largo de toda la extensión de la pieza base, que podremos comparar con lo obtenido en COMSOL. Para ello se abre una figura con el comando *figure*; la función *surface* plasma en esta figura los valores de x, y y p\_pb; shading interp plasma el resultado mediante un código de colores o arcoiris; y por último se activa el comando grid para aplicarle la cuadrícula a la gráfica.
- Línea nº 10: se crea una figura y se plasman los valores de valor absoluto de presión frente a desplazamiento longitudinal mediante el comando *plot* para el caso de la pieza base, es decir, sin defecto ninguno. Esta gráfica tendrá el color por defecto, el azul.
- Línea  $n^0$  11: se configura la figura para poder sobrescribir más gráficas.
- Línea nº 12: se añade a la figura creada una nueva gráfica de presión frente desplazamiento, esta vez para el caso de una pieza con un defecto circular. Se obligará a que esta gráfica tenga color rojo.
- Línea nº 13: por último, se crea la gráfica presión/desplazamiento referente a la pieza con un defecto cuadrado. Esta gráfica será de color verde.
- Líneas  $n^0$  14 y  $n^0$  15: se crea la leyenda explicativa de la figura.
- Línea  $n^0$  16: se aplica la cuadrícula a la gráfica.

Una vez realizados estos pasos, ejecutando el programa se obtiene la comparación entre los distintos tipos de discontinuidad. Procediendo de manera análoga, se pueden obtener todas las comparaciones necesarias entre tipos y tamaños de discontinuidades para conseguir una relación de las variaciones que se producen en la dispersión de la presión a lo largo de la pieza de ensayo dependiendo de la existencia o no, así como del tipo y localización de los defectos.

# Capítulo 4

# Resultados

A continuación, se mostrarán cada una de capturas con los resultados obtenidos de cada uno de los procesos ejecutados sobre la pieza probeta.

# 4.1. Ensayos experimentales.

#### 4.1.1. Material libre de defectos.

Primero se muestra el ensayo de una pieza en la que no hay defectos. En este caso en la pantalla del equipo de inspección se visualizará únicamente el eco de fondo de la pieza puesto que el ultrasonido, al no encontrar obstáculos, no producirá ninguna reflexión hasta alcanzar la profundidad de la pieza.



Figura 4.1: Eco de fondo.

# 4.1.2. Material con defectos.

En este caso se muestra el resultado obtenido de realizar el ensayo sobre una zona con defecto. Se puede observar como aparece el eco de fondo junto con los



ecopulsos reflejados por las discontinuidades.

Figura 4.2: Ecopulsos de las discontinuidades.

#### 4.1.2.1. Comparativa de defectos.

Si se centra la inspección en la zona con heterogeneidades (defectos circulares y cuadrados) se obtiene la Figura 4.3. En dicha figura se han representado los ecopulsos procedentes de los distintos defectos considerados, en las que variaba tanto la forma como su tamaño. A partir de la misma se deben apreciar diferencias entre ellas que nos faciliten la detección de defectos en el material así como su clasificación.



Figura 4.3: Comparativa de ecopulsos.

Una vez visualizadas las figuras anteriores, se observa que existen claras diferencias entre los diferentes ecos dependiendo del tamaño y forma de la discontinuidad, y que, además, pueden obtenerse datos concretos de cada eco, como amplitud máxima o ancho de pulso, que los caracterizan.
### 4.2. Resultados de la simulación.

## 4.2.1. Resultados frente a defectos con la misma forma pero distintas dimensiones.

Primero se realizará una comparativa entre los resultados de las simulaciones atendiendo a un <u>criterio dimensional</u>. Esto es, se representarán las variaciones en la dispersión de la presión acústica cuando se va variando el tamaño del defecto pero se mantiene su morfología. De esta manera, se muestra cómo los resultados varían según el tamaño de la discontinuidad aumenta.

#### 4.2.1.1. Defectos de tipo cuadrangular.

En primer lugar se representa el resultado de las simulaciones para las heterogeneidades de forma cuadrada variando las dimensiones del lado. La nomenclatura utilizada es:

- Pieza base: material libre de defectos.
- Pieza Cuadrado 1: material con defecto cuadrado de lado 1 mm.
- Pieza Cuadrado 2: material con defecto cuadrado de lado 2 mm.
- Pieza Cuadrado 3: material con defecto cuadrado de lado 3 mm.
- Pieza Cuadrado 4: material con defecto cuadrado de lado 4 mm.
- Pieza Cuadrado 5: material con defecto cuadrado de lado 5 mm.



Figura 4.4: Comparación de cuadrados.

Las siguientes figuras muestran detalles de los resultados plasmados en la Figura 4.4 ampliando zonas de interés como la distorsión que se produce previamente a la localización del defecto en el caso de la Figura 4.5 y la pendiente de subida de las gráficas en la Figura 4.6.



Figura 4.5: Detalle oscilación cuadrados.



Figura 4.6: Detalle pendiente cuadrados.

#### 4.2.1.2. Defectos de tipo circular.

En este caso se representa el resultado de las simulaciones para las heterogeneidades de forma circular variando el diámetro. La nomenclatura utilizada es:

- Pieza base: material libre de defectos.
- Pieza Circulo 1: material con defecto circular de diámetro 1 mm.
- Pieza Circulo 2: material con defecto circular de diámetro 2 mm.
- Pieza Circulo 3: material con defecto circular de diámetro 3 mm.
- Pieza Circulo 4: material con defecto circular de diámetro 4 mm.
- Pieza Circulo 5: material con defecto circular de diámetro 5 mm.



Figura 4.7: Comparación de círculos.

Al igual que en el caso anterior, a continuación se muestran detalles de la Figura 4.7 donde se observan de forma más concreta las oscilaciones previas a la localización del defecto en la Figura 4.8 y las distintas pendientes de subida en la Figura 4.9.



Figura 4.8: Detalle oscilación círculos.



Figura 4.9: Detalle pendiente círculos.

### 4.2.2. Resultados frente a defectos del mismo tamaño pero diferente forma.

A continuación se realizará la comparativa de los resultados atendiendo a un <u>criterio morfológico</u>. Se trata de mostrar las diferencias que se producen manteniendo el tamaño pero confrontando los dos distintos tipos de heterogeneidad. Se utilizará una nomenclatura análoga a la usada en el apartado anterior, así:

- **Pieza base:** material libre de defectos.
- Pieza 1 Circulo Abajo: material con defecto circular de diámetro 1 mm.
- Pieza 1 Cuadrado Abajo: material con defecto cuadrado de lado 1 mm.

Así el número muestra el tamaño del defecto, de forma que *Pieza 1* tiene un defecto de 1 mm, *Pieza 2* tiene un defecto de 2 mm, y así sucesivamente. El tamaño en milímetros corresponderá a la longitud del lado en el caso de los cuadrados y al diámetro en el caso de los círculos.

De igual manera, cada comparación se presentará con dos figuras, una con las gráficas en su totalidad y otra con el detalle de las partes más interesantes, donde se aprecian tanto la oscilación producida por la reflexión de la onda en el defecto, como la pendiente de subida de las gráficas tras la zona de valor de presión cero.



4.2.2.1. Defectos de tamaño 1 mm.





Figura 4.11: Detalle tamaño 1 mm.



4.2.2.2. Defectos de tamaño 2 mm.

Figura 4.12: Comparación tamaño 2 mm.



Figura 4.13: Detalle tamaño 2 mm.



4.2.2.3. Defectos de tamaño 3 mm.

Figura 4.14: Comparación tamaño 3 mm.



Figura 4.15: Detalle tamaño 3 mm.



4.2.2.4. Defectos de tamaño 4 mm.

Figura 4.16: Comparación tamaño 4 mm.



Figura 4.17: Detalle tamaño 4 mm.



4.2.2.5. Defectos de tamaño 5 mm.

Figura 4.18: Comparación tamaño 5 mm.



Figura 4.19: Detalle tamaño 5 mm.

## Capítulo 5

## Análisis y Discusión de Resultados

#### 5.1. Resultados experimentales.

De los ecos experimentales se observa que el eco de fondo sufre una importante variación de amplitud ante la presencia de defectos, esto es, el eco de fondo sufrirá una visible distorsión cuando existen discontinuidades que reflejen parte de la onda.

También hay que indicar que a medida que aumenta el tamaño del defecto, aumenta la amplitud del ecopulso, debido a que la señal rebota con mayor energía. Además se da que en los defectos circulares dicha señal tendrá una menor amplitud que en los defectos cuadrados ya que en el primer caso hay una mayor dispersión de la señal.

Por otro lado, se puede comprobar como los ecopulsos provenientes de los defectos circulares tienen una morfología más redondeada que los defectos cuadrados, que son más puntiagudos y tienen además un menor ancho de pulso.

Debido a lo anterior, se pueden extraer multitud de datos con los que caracterizar cada onda y discriminar de esta manera los defectos. Teniendo en cuenta que la posición de las heterogeneidades viene dada por la posición del ecopulso, los otros dos factores de caracterización de defectos, el tamaño y el tipo, pueden ser obtenidos mediante el tratamiento de datos distintivos como amplitud, morfología, ancho de pulso, pendiente, etc. De esta manera, y aplicando técnicas de reconocimiento de objetos, se puede proceder a la clasificación automática de los defectos [2, 19, 21].

#### 5.2. Resultados de las simulaciones.

Al observar con detenimiento cada una de las gráficas resultado de las simulaciones, tenemos un factor común en todas ellas. Se trata de una zona de oscilaciones en la zona cercana al segmento de contacto con el palpador. Esto es debido a la zona de campo cercano, que afecta a una longitud de 3 mm antes de que la onda comience su desarrollo estable.

Una vez superada la zona distorsionada por el campo cercano, se observa en la gráfica de base o de fondo una progresiva disminución de la presión acústica. Sin embargo cuando se añade una heterogeneidad, la onda se distorsiona. Se produce una oscilación en la zona inmediatamente anterior a la localización del defecto debido a distorsión producida por la onda reflejada. En las distintas comparativas se comprueba como esta distorsión será tanto mayor, tanto en amplitud como en tiempo de estabilización, cuanto mayor sea el defecto. Además existe una gran diferencia entre los distintos tipos de discontinuidad. La oscilación será mayor si el defecto es cuadrado y la onda incide perpendicularmente, produciendo mayor reflexión, que si el defecto es circular y la onda reflejada tiene un factor atenuante de orden senoidal. De esta manera se puede concluir que la oscilación será mayor cuanto mayor sea el defecto y cuanto más perpendicularmente incida la onda sobre él.

El tamaño de la heterogeneidad también viene dado por la distancia en que la gráfica baja a valores de cero presión. Midiendo esta distancia, se obtiene el valor real del defecto. Esta parte no sólo plasma el tamaño, si no también su posición, que estará situada en el punto exacto en que el valor de la presión tome valores iguales a cero.

Por otro lado, si bien la pendiente de bajada de la presión en la parte en que comienza la discontinuidad es igual sin importar tamaño o tipo, la pendiente de subida es distinta en ambos casos, siendo más pronunciada cuanto menor sea el tamaño del defecto. Esto se verifica para ambos casos, es decir, tanto para los defectos cuadrados como para los circulares. En las simulaciones que comparan la propagación en defectos del mismo tamaño pero distinta morfología se observa que la pendiente es mayor para los defectos circulares.

Cuando se estabilizan los valores de presión se observa que, a medida que aumenta el tamaño, el valor de la presión difiere en mayor medida del valor de referencia que corresponde a la pieza libre de defectos.

Por lo tanto, las gráficas pueden dividirse en cinco zonas, como puede verse en la Figura 5.1:

• Zona I: zona de campo cercano. Desechable.



Figura 5.1: Zonas de estudio de la simulación.

- Zona II: zona oscilatoria. Se medirán tiempo y amplitud de oscilación.
- Zona III: zona de valor cero. Se medirá distancia de comienzo y tamaño de esta zona. Estos valores sirven para determinar la posición de la heterogeneidad y su tamaño.
- Zona IV: zona de subida desde valor cero. Se medirá la pendiente de subida.
- Zona V: zona "estacionaria". Se medirán tiempo de estabilización y error estacionario. Estos valores, junto con los obtenidos en las Zonas II y IV, nos puede aportar información acerca de la morfología de la discontinuidad.

El estudio de todos estas medidas obtenidas de cada zona puede dar los datos necesarios para poder discriminar cada discontinuidad según los tres factores necesarios para su clasificación: posición, tamaño y tipo. Por tanto, las simulaciones si se pueden utilizar como ayuda al estudio de la propagación ultrasónica en sólidos y de las heterogeneidades presentes en el material.

En ambos casos los resultados indican que es viable la detección de los defectos y tener información acerca de su ubicación, tamaño y morfología.

## Capítulo 6 Conclusiones

Cuando se realiza un ensayo no destructivo, el objetivo no es solamente detectar la presencia de discontinuidades, sino su ubicación, tamaño y tipo. Realizando un estudio cualitativo y comparativo de los ensayos realizados en este trabajo (capturas experimentales y simulaciones) se puede determinar que en ambos estudios, los ensayos físicos y las simulaciones, se aprecian diferencias notables en los resultados dependiendo del tamaño y tipo de las heterogeneidades. Además, se puede observar una analogía entre ambas formas de análisis. Las dos nos muestran la ubicación del defecto, las dos distorsionan el eco de fondo ante la presencia de heterogeneidades, haciéndolo de distinta manera según el tipo de defecto, y las dos nos dan el tamaño de la heterogeneidad. Dado que los datos experimentales se pueden correlacionar con los simulados, se puede concluir que la simulación de ultrasonidos con COMSOL es un buen método para crear modelos ultrasónicos que ayuden al inspector a realizar los ensayos cuantitativos con ultrasonidos y sin la necesidad de elaborar piezas probeta, abaratando sobre manera los costes debidos éstas.

# Capítulo 7 Líneas de trabajo futuro

A partir de aquí, existen interesantes líneas de trabajo, no sólo ampliando las muestras de estudio a otras morfologías, materiales y/o técnicas de ensayo, sino que existen técnicas de reconocimiento que se pueden aplicar para clasificar los ecos ultrasónicos resultantes de un ensayo, y de igual manera se podría realizar un estudio análogo para obtener clasificadores a partir de las respuestas simuladas, analizando distorsiones, oscilaciones y pendientes. Todo ello sería muy beneficioso para los inspectores de calidad puesto que dispondrían de unas herramientas clasificadoras también para las simulaciones, de forma que los resultados de un ensayo serían analizados, comparados e identificados de forma mucho más rápida y precisa.

# Parte III PLANOS



# Parte IV PLIEGO DE CONDICIONES

## Capítulo 8

## Pliego de condiciones

El siguiente pliego regirá en unión de las disposiciones que con carácter general y particular se indican y tienen por objeto la ordenación de las condiciones técnicas y facultativas que han de regir en la ejecución del presente proyecto en toda su extensión.

#### 8.1. Descripción del estudio.

Este proyecto estudia la viabilidad de obtener mediante simulaciones con el programa COMSOL un patrón de ecos válidos de una pieza de fundición a la que se quieren aplicar ensayos no destructivos con ultrasonidos. De esta manera se obtiene un patrón de comparación que se aplicará al realizar ensayos cualitativos, tanto durante el proceso de fabricación como para el análisis de vida, sin necesidad de la fabricación de una pieza probeta y abaratando considerablemente el resultado final.

#### 8.2. Prescripciones técnicas.

Además del todo el material inventariado en la sección *Puesto de trabajo* del presupuesto (Apartado 9.1.3), deben tenerse en cuenta los requisitos mínimos necesarios para llevar a cabo el diseño del software, siendo importante la calidad de componentes.

- Requisitos hardware: se tomarán como mínimo las características del equipo de trabajo usado en el proyecto: Puertos USB, Unidad CD, Intel (R) Pentium (R) 1400 MHz, 585 Mhz, 256 MB de RAM.
- Requisitos software: sistema operativo Windows XP, paquete informático Office 2003, procesador de texto LYX, y los programas COMSOL versión 3.5a, MATLAB versión 2008 y USLT 2000 para la captura de ecos.

### 8.3. Revisión de precios.

El precio del estudio dependerá del coste que sus componentes (equipo de captación, sensor, pieza probeta,...) tengan en el mercado en el momento de su compra, a lo que se añade el coste adicional de la mano de obra y de la tecnología (hardware y software) empleada en su realización y verificación. El presupuesto general total que supone la redacción y ejecución del estudio sufrirá un incremento mensual que se evaluará aplicando a dicho presupuesto la tasa internacional de inflación y el índice de precios al consumo que se establezca en el mes transcurrido.

### 8.4. Verificación y funcionamiento.

Se ha realizado la verificación del funcionamiento de cada uno de los elementos que integran el dispositivo de captación ultrasónico, así como las pruebas pertinentes del sofware de simulación, siendo todo ello previo a la entrega de resultados de la ejecución del estudio.

#### 8.5. Seguridad e higiene.

Se tendrán en cuenta las leyes de seguridad e higiene pertinentes con respecto al trabajo de ejecución de los ensayos, así como las referentes a la simulación por computador.

### 8.6. Disposiciones aplicables.

Serán de aplicación las disposiciones que de cualquier modo tenga carácter imperativo y obligatorio, así como aquellas que siendo de carácter general no se citen a continuación:

- "Metodología europea para la cualificación de ensayos no destructivos", EUR-17299-EN de 1999. Aquí se establecen los requisitos técnicos y las garantías de seguridad que deben incluir los equipos de captación ultrasónica, para asegurar su correcto funcionamiento y la seguridad de las personas y los bienes., así como las certificaciones necesarias del personal que realiza ensayos no destructivos.
- "Ordenanza de seguridad e higiene en el trabajo", Real Decreto 614/2001.
- "Ley de prevención de riesgos laborales", 31/1995, de 8 de noviembre.
- Normas UNE.

- Normas DIN.
- Normas ISO9000.

Y en general, cuantas prescripciones figuren en las normas, instituciones o reglamentos oficiales. En caso de discrepancia entre las anteriores normativas, se tendrá como válida la más restrictiva.

En la realización de este estudio también se han tenido en cuenta las normas relacionadas con la normativa informática, por las que se intenta que tanto el código como la ejecución del programa sean lo más asimilables posible.

# Parte V PRESUPUESTO

## Capítulo 9

## Presupuesto

El presupuesto de este proyecto constará de dos partes. Por un lado el coste de realización del estudio propiamente dicho y por otra el coste de comercialización de dicho estudio.

### 9.1. Presupuesto de realización del proyecto.

Primero se obtendrá el coste de ejecución del estudio calculando los costes de mano de obra, materias primas y puesto de trabajo:

#### 9.1.1. Mano de obra.

Se ha estimado que la realización de todas las pruebas, ensayos de laboratorio y simulaciones conllevan unas 10 horas de tiempo.

CATEGORIA	№ DE OPERA- RIOS	№ DE HORAS	COSTE/HORA	COSTE TOTAL
Ingeniero Técnico	1	10	14.03 €/hora	140.30 €

Según convenio siderometalúrgico de CCOO a 2012.

#### 9.1.2. Materia prima.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Pieza Probeta	1	875.50 €	875.50 €

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
PC	1	599 €	599 €
USLT2000	1	11900 €	11900 €
Accesorios	1	8416.42 €	8416.42 €
MATLAB	1	392.30 €	392.30 €
COMSOL	1	8594.14 €	8594.14 €
		Total	29901.86 €

#### 9.1.3. Puesto de trabajo.

Donde:

- *PC* es un ordenador personal con las características básicas que actualmente se encuentran en el mercado.
- USLT2000 es el equipo de captación de datos de Krautkramer.
- Bajo el epígrafe Accesorios se encuentra la parte del equipo necesaria para realizar la simulación. Se adquiere en pack y consta de un palpador de bicristal MSEB 4E, cable DA 231 y láminas de protección de pantalla LCD 124.
- MATLAB versión 2008. Licencia básica para estudiante.
- COMSOL versión 3.5a. Precio consultado de 7250 libras, al cambio actual.

Si se toma el tiempo de amortización de 6 años, tiempo razonable para aparatos electrónicos y software de alto nivel, se obtendrá el coste de amortización anual:

 $CosteAmortizaciónAnual = \frac{29901,86}{6} = 4983,64$  C/año

Teniendo en cuenta que las horas laborales son 1952, tomando 8 horas diarias, 5 días a la semana, 52 semanas y 16 días festivos según el BOE 267, se obtendrá el coste de amortización por hora:

 $CosteAmortizaciónHora = \frac{29901,86}{(1952x6)} = 2,5531$  C/hora

Se debe calcular además el coste del puesto de trabajo teniendo en cuenta la energía consumida (aproximadamente 20 kW/h) con un coste de  $0.06 \ C/kW$  según la tarifa actual de EON España, durante las 10 horas de trabajo. Así:

 $CostePuestoTrabajo = (HorasTrabajo \times (CosteAmortHora + EnergíaCons))$ 

 $CostePuestoTrabajo = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ kW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ kW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ kW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ kW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ kW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ kW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ kW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ kW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ kW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ kW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ kW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ kW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ kW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ kW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ kW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ kW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ kW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ kW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ kW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ kW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ kW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ KW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ KW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ KW/hora} \times 0,06 \text{ C/kW})) = 37,531 \text{ CostePuestoTrabajo} = 10 \times (2,5531 + (20 \text{ KW/hora}$ 

El coste de realización del estudio será la suma de los costes de mano de obra directa, del puesto de trabajo y de la materia prima. Por tanto:

 $CosteRealización = ManoObraDirecta + CostePuestoTrabajo + MateriasPrimas\\CosteRealización = 140,30 + 37,531 + 875,50 = 1053,331 \\ \textcircled{}$ 

Este estudio tendrá un coste de realización de *mil cincuenta y tres euros con* treinta y tres céntimos.

En Santander, a 14 de Mayo de 2013.

Firmado:

### 9.2. Presupuesto de comercialización del proyecto.

Se supondrá ahora que se desea comercializar este estudio, de forma que una empresa decida encargar un estudio como el aquí realizado sobre una pieza de su fabricación. Por tanto, sería la empresa la que proveería la pieza a estudio, así que se sutilizarán los costes de realización calculados en el apartado anterior, excepto los relativos a la materia prima. Por tanto, ahora los costes de realización serán la suma de la mano de obra directa más el coste del puesto de trabajo:

CosteRealización = ManoObraDirecta + CostePuestoTrabajoCosteRealización = 140,30 + 37,531 = 177,831 €

Una vez evaluado el coste de realización se obtienen los gastos comerciales. Se supondrá un coste en concepto de envío y recepción de la pieza a estudio o desplazamiento a la fábrica del cliente del 4 % del coste de realización. Así:

 $GastosComerciales = 0.04 \times 177.831 \, \textcircled{\bullet} = 7.113 \, \textcircled{\bullet}$ 

Se obtiene el coste total como la suma del coste de realización más los gastos comerciales:

CosteTotal = CosteRealizaci'on + GastosComerciales

 $CosteTotal = 177,831 + 7,113 = 184,944 \, {\rm \textcircled{C}}$ 

Si se planean unos beneficios del 9 % del total, se obtiene:

 $Benef = 0.09 \times 184.944 \, \ensuremath{\mathfrak{S}} = 16.645 \, \ensuremath{\mathfrak{S}}$ 

Para calcular el precio de realización del ensayo, se obtiene la suma de coste total y beneficios:

 $PrecioRealización = CosteTotal + Benef = 184,944 + 16,645 = 201,589 \oplus 100,000$ 

Puesto que todos los cálculos se realizan sobre el estudio de una sola pieza, el precio de realización del ensayo será igual al coste por unidad. Añadiendo el coste por el IVA (21%):

 $IVA = 0.21 \times 201.589 \oplus 42.334 \oplus$ 

Por tanto, el coste facturado con IVA será:

 $CosteFacturado = PrecioRealización + IVA = 201,589 + 42,334 = 243,923 \oplus 1000$ 

Este estudio tendrá un coste facturado de doscientos cuarenta y tres euros con noventa y dos céntimos.

En Santander, a 14 de Mayo de 2013.

Firmado:

# Parte VI BIBLIOGRAFÍA

## Bibliografía

- Ing. Ricardo Echevarria, 2001. E.N.D. GENERALIDADES. Laboratorio de ensayos no destructivos. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Comahue.
- [2] Cristina Rodriguez González, 2012. SISTEMA AUTOMATIZADO DE DE-TECCIÓN DE DEFECTOS EN PIEZAS METÁLICAS MEDIANTE EN-SAYOS NO DESTRUCTIVOS CON ULTRASONIDOS. Tesis Doctoral. Departamento de Tecnología Electrónica, Ingeniería de Sistemas y Automática. ETSIIT. Universidad de Cantabria.
- [3] www.ndt.net
- [4] ENSAYOS DE SOLDADURAS MEDIANTE RAYOS X. www.tecnoficio.com
- [5] TERMOGRAFÍA ACTIVA. www.camarastermograficas.es
- [6] ENSAYO NO DESTRUCTIVO DE TERMOGRAFÍA CON EXCITACIÓN DE ULTRASONIDO. www.termografía.com
- [7] Ing. Ricardo Echevarria, 2002. ULTRASONIDOS. Laboratorio de ensayos no destructivos. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Comahue
- [8] Idurre Sáez de Ocáriz, Fernando Alonso y Borja Gambín, 2005. TERMO-GRAFÍA INFRARROJA COMO ENSAYO NO DESTRUCTIVO. Centro de tecnologías Aeronáuticas. www.interempresas.net
- [9] EL EFECTO DOPPLER ACÚSTICO. www.sc.ehu.es
- [10] Antonio Carlos Pérez de Siles Marín y Antonio José Cubero Atienza, 2001. RIESGOS DERIVADOS DE LA EXPOSICIÓN A RUIDO EN AMBIEN-TES INDUSTRIALES. Universidad de Córdoba. http://rabfis15.uco.es/
- [11] EFECTO PIEZOELÉCTRICO. Articulo publicado en la revista especializada ELEKTOR. www.elektor-magazine.es

- [12] ACTUADORES PIEZOELÉCTRICOS. http://almadeherrero.blogspot.com.es/
- [13] TECNOLOGÍA DE SENSORES INTELIGENTES. Articulo publicado en la revista especializada ELECTROINDUSTRIA. www.emb.cl
- [14] COMSOL AB, 2008. COMSOL MULTIPHISICS, MATLAB INTERFACE GUIDE.
- [15] Morten Wollert Nigren, 2011. FINITE ELEMENT MODELING OF PIE-ZO ELECTRIC ULTRASONIC TRANSDUCERS. Norwegian University of Science and Technology.
- [16] A. Carnicero, 2001. INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMEN-TOS FINITOS. Universidad Tecnológica Nacional de Córdoba, Argentina.
- [17] Nardoni G., Certo M., Nardoni P., Feroldi M., Nardoni D., Possenti L., Filos A., Quetti S., 2010. SIZING THE HEIGHT OF DISCONTINUITIES, THEIR CHARACTERISATION IN PLANAR / VOLUMETRIC BY PHA-SED ARRAY TECHNIQUE BASED ON DIFFRACTED ECHOES. 10th European Conference on Non-Destructive Testing. ECNDT '10. Moscú.
- [18] Rodríguez E.C., Martín A., 2007. EVALUACIÓN DE DEFECTOS INDUCI-DOS EN PROBETAS DE ALUMINIO A TRAVÉS DE MÉTODOS CON-VENCIONALES Y NO CONVENCIONALES DE INSPECCIÓN ULTRA-SÓNICA. IV Conferencia Panamericana de Ensayos No Destructivos. CO-PAEND'07. Buenos Aires, Argentina.
- [19] Romero A., Pearson N., Mason J.S.D., 2007. AUTOMATIC CLASSIFICA-TION OF DEFECTS IN A CORROSION ENVIRONTMENT. European Corrosion Congress. EUROCORR'07. Freiburg, Alemania.
- [20] Tennakoon T.M.R., 2010. ANALYSIS SOFTWARE TO INTERPRET DE-FECTS IN ULTRASONIC TESTING. Internacional Journal of Structural Integrity, 1 (1), 85-93.
- [21] C. Rodríguez, M. Fernández, L. Alonso, J.M. Pérez Oria (2006) SISTE-MA DE DETECCIÓN AUTOMATIZADO DE GRIETAS EN PIEZAS DE FUNDICIÓN MEDIANTE ULTRASONIDOS Y TÉCNICAS CLÁSICAS DE RECONOCIMIENTO. XXVII Jornadas de Automática, Almería.