

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE FISICA



**DETECCIÓN DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN ENSAYO DE  
FLEXIÓN  
MEDIANTE TÉCNICA DE TIEMPO DE VUELO DE PULSO  
ULTRASÓNICO.**

MAKARENA PAZ OSORIO CORNEJO

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIA  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA



**DETECCIÓN DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN ENSAYO DE  
FLEXIÓN  
MEDIANTE TÉCNICA DE TIEMPO DE VUELO DE PULSO  
ULTRASÓNICO.**

MAKARENA PAZ OSORIO CORNEJO

Profesor Guía: Dr. Nicolás Mujica.

Trabajo de Titulación,  
para optar  
al título de Ingeniero Físico.

SANTIAGO DE CHILE  
OCTUBRE 2018

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIA  
DEPARTAMENTO DE FISICA



**DETECCIÓN DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN ENSAYO DE  
FLEXIÓN  
MEDIANTE TÉCNICA DE TIEMPO DE VUELO DE PULSO  
ULTRASÓNICO.**

MAKARENA PAZ OSORIO CORNEJO

Profesor Guía : Dr. Nicolás Mujica.

Profesores Comisión :  
:  
:

Trabajo de graduación presentado a la Facultad de Ciencia,  
en cumplimiento parcial de los requerimientos exigidos para  
optar al título de Ingeniero Físico.

SANTIAGO DE CHILE  
OCTUBRE 2018

**DETECCIÓN DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN ENSAYO DE FLEXIÓN  
MEDIANTE TÉCNICA DE TIEMPO DE VUELO DE PULSO ULTRASÓNICO.**

Trabajo de graduación presentado a la Facultad de Ciencia, en cumplimiento parcial de los requerimientos exigidos para optar al título de Ingeniero Físico.

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

SANTIAGO DE CHILE

OCTUBRE 2018

"TITULO  
SEGUNDA LINEA"

MAKARENA PAZ OSORIO CORNEJO

Este trabajo de Graduación fue preparado bajo la supervisión del profesor guía Dr. Nicolás Mujica, del Departamento de Física de la Universidad de Chile y ha sido aprobado por los miembros de la comisión calificadora del candidato.

.....  
Dr.

.....  
Dr.

.....  
Dr.

.....

Roberto Bernal  
Director

.....  
Dr.  
Profesor Guía



# Agradecimientos

# Tabla de Contenido

<b>Dedicatoria</b>	<b>I</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>II</b>
<b>Tabla de Contenidos</b>	<b>III</b>
<b>Índice de Ilustraciones</b>	<b>VII</b>
<b>Resumen</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción. . . . .	2
1.1.1 DEFECTOS LINEALES: DISLOCACIONES. . . . .	2
1.1.1.1 Deformación plástica por dislocaciones. . . . .	3
1.1.1.2 Interacción ondas elásticas con dislocaciones. . . . .	5
1.1.2 Técnica de pulsos ultrasónicos. . . . .	6
1.1.3 Estado del Arte. . . . .	6
1.1.4 Motivación. . . . .	9
1.1.5 Objetivo. . . . .	9
1.1.5.1 Objetivo general. . . . .	9
1.1.5.2 Objetivos específicos. . . . .	9
<b>2 Procedimiento Experimental</b>	<b>10</b>
2.1 Ensayo de Flexión. . . . .	11
2.2 Transductores. . . . .	12
2.3 Muestras. . . . .	14
2.4 Monitoreo. . . . .	15



2.4.1	Monitoreo in situ. . . . .	15
2.4.1.1	Procedimiento e inconvenientes experimentales y de procesamiento de datos para montaje in situ. . . . .	18
2.4.2	Monitoreo ex situ. . . . .	19
2.4.2.1	Distribución de los puntos de medición en la zona de estudio. . . . .	20
2.4.2.2	Procedimiento de medición para la obtención de la velocidad de propagación. . . . .	20
2.5	Procedimiento para la adquisición de datos. . . . .	21
2.6	Procedimiento para análisis de datos. . . . .	21
2.7	Procedimiento para análisis de resultados. . . . .	21
<b>3</b>	<b>Resultados Experimentales y Análisis</b>	<b>23</b>
3.1	Monitoreo ex situ. . . . .	24
3.1.1	Resultados para mediciones en dirección del eje Z. . . . .	24
3.1.1.1	Geometría de la muestra después del ensayo de flexión. . . . .	24
3.1.1.2	Velocidad de propagación. . . . .	24
3.1.1.3	Resultados para de velocidad para la dirección Z, antes y después del recocido. . . . .	26
3.1.2	Resultados para mediciones en dirección del eje Y. . . . .	27
3.1.2.1	Distribución línea de estudio en dirección Y. . . . .	27
3.1.2.2	Mediciones de velocidad en dirección del eje Y. . . . .	28
3.1.2.3	Amplitud del pulso en función a la posición respecto a la carga. . . . .	30
<b>4</b>	<b>Conclusiones.</b>	<b>33</b>
4.1	Conclusiones. . . . .	34
4.1.1	Conclusiones para la velocidad de propagación en el eje Z. . . . .	34
4.1.2	Conclusiones para la velocidad de propagación en el eje Y. . . . .	34
<b>5</b>	<b>Aplicación en la Ingeniería.</b>	<b>36</b>
5.1	Aplicación en la Ingeniería. . . . .	37

# Índice de Ilustraciones

1.1	Representación de una estructura cristalina a partir de la configuración de la base en la red. . . . .	2
1.2	En (a) el cristal es perfecto. En (b) el cristal es cortado y un plano adicional de átomos es insertado. El borde interior del plano adicional es la dislocación de borde. En (c) la geometría inicial queda deformada, dando origen al vector de Burgers $b$ . Imagen obtenida de [1]. . . . .	3
1.3	Desplazamiento de una dislocación por efecto de fuerzas externas, comenzando en un estado inicial en a), desplazándose a través de la red como se muestra en b) hasta llegar a c). Figura obtenida de referencia [2]. . . . .	4
1.4	Diagrama de modelo experimental para la medición de la velocidad de un pulso ultrasónico. . . . .	6
1.5	el gráfico a) muestra el esfuerzo $\sigma$ versus deformación para tres ensayos consecutivos. La figura b) presenta la velocidad transversal versus $\sigma$ en escala semi-log para los mismos ensayos de la figura a). Figura obtenida a partir de figura 4 de la referencia [3]. . . . .	8
2.1	En a) la viga bajo flexión; la zona B está sometida a compresión y la zona A sometida a dilatación. En b) se muestra la distribución de tensión a lo largo del espesor de la viga. . . . .	11
2.2	Diagrama ensayo de flexión desde una barra en esta inicial a una barra flexionada. .	12
2.3	Imagen de la referencia [? ], página 44, figura 7. Diagrama de la localización y extensión del campo cercano y lejano para un transductor. . . . .	13
2.4	Diagrama de la probeta de aluminio y sus dimensiones, utilizada para los ensayos de flexión. Donde la superficie 1 tiene dimensiones de $32 \times 200 \text{mm}^2$ , la superficie 2 de $16 \times 200 \text{mm}^2$ y la superficie 3 de $16 \times 32 \text{mm}^2$ . . . . .	15

2.5	Montaje experimental visualizado en el plano XY, donde se visualiza la imagen que toma la cámara desde el espejo, correspondiente a la sección transversal de la cara superior de la barra de aluminio. . . . .	17
2.6	Diagrama de montaje experimental in situ;(1) corresponde a los transductores de onda transversal, (2) espejo posicionado a $45^\circ$ respecto al eje Z y (3) corresponde a la cámara y el lente utilizados para la adquisición de imágenes. . . . .	17
2.7	Distribución de puntos donde se realizan las mediciones de $\tau$ . Las caras del plano XY se distribuye a lo largo de la probeta tres líneas de mediciones correspondientes a una línea media, una línea media inferior y otra superior. Para las superficies en el plano XZ se distribuye sólo una línea de medición, correspondiente a lo largo de X.	19
2.8	Distribución de los puntos de medición para las caras en el plano XY, distinguiendo una línea media inferior (L1), que se encuentra en contacto con los puntos de apoyo, una línea media (L2), y una línea media superior (L3), la que se encuentra en contacto a la aplicación de la carga. . . . .	20
3.1	Velocidad longitudinal promedio para L1, L2 y L3 para un nivel de flexión de 4 kN para la barra 1; a) corresponde a la barra de aluminio sin flectar mientras que en b) ya se encuentra deformada. . . . .	25
3.2	Comportamiento de la velocidad transversal para un nivel de flexión de 4 Kn para la barra 1; a) corresponde a la barra de aluminio sin flectar mientras que en b) ya se encuentra deformada. . . . .	25
3.3	Velocidad longitudinal para barra $n^\circ 2$ sin deformar, antes (a) y después del recocido (b). . . . .	26
3.4	Distribución de los puntos de medición para las caras de dimensión $32x200mm^2$ . . .	27
3.5	Gráfico de error relativo porcentual vs la posición a lo largo del eje X en la barra. . .	28
3.6	Gráfico de velocidad transversal vs posición en dirección Y para ensayo de flexión. La curva en azul representa los valores de velocidad para la barra sin flectar y la curva en rojo representa los valores de velocidad una vez que la barra ha sido flectada a 5 kN. . . . .	29
3.7	Gráfico de velocidad transversal vs posición en dirección Y para ensayo de flexión. La curva en azul representa los valores de velocidad para la barra sin flectar y la curva en rojo representa los valores de velocidad una vez que la barra ha sido flectada a 5 kN. . . . .	30

3.8	Gráfico de Voltaje vs tiempo en onda longitudinal para las señales recibidas a 8, 7, 4 y 4 [cm]. . . . .	31
5.1	Proposición de estructura de medición para la velocidad de propagación con el fin de predecir la falla en el material. . . . .	38
5.2	Zoom a la estructura en el sensor inductivo y el transductor. Donde se aprecia que el sensor de desplazamiento se ve afectado ante el movimiento que pueda sufrir los transductores producto de la deformación en la estructura de estudio. . . . .	38
5.3	Visión del modelo propuesto, donde se diferencia en la parte izquierda el cilindro hidráulico y en el interior de la relación de medición entre el sensor de movimiento y el transductor. . . . .	39

# Resumen

El objetivo propuesto en esta tesis fue determinar en una barra rectangular sometida a un ensayo de flexión estandarizado, cuál es la zona apropiada de medición para un monitoreo *insitu* que permita detectar los cambios de velocidad, siendo posible reproducir las condiciones experimentales en la ingeniería, permitiendo predecir la fatiga en el material además de sustituir técnicas tan utilizadas como TEM y Rayos X..

Para tal objetivo se realizaron mediciones *exsitu* para una barra flectada a 5kN, de velocidad de propagación de onda transversal ( $v_T$ ) y longitudinal ( $v_L$ ) para las direcciones Z e Y, basando el sistema experimental en la adquisición del tiempo de vuelo ( $\tau$ ) que le toma al pulso emitido recorrer la dimensión utilizada de la barra, emitiendo la señal a través de transductores de onda longitudinal y transversal.

Para las mediciones realizadas en la dirección Z se establecen tres líneas de estudio a lo largo de la muestra, que representan tres situaciones en un ensayo de flexión, una zona traccionada, otra comprimida y una última de transición entre estas dos. Estas mediciones no fueron concluyentes ya que las condiciones experimentales no fueron las adecuadas entre las sondas utilizadas y la muestra, más precisamente la propagación del campo cercano del transductor emisor. Por lo que fue necesario el cambio de dirección a Y. Para esta nueva situación se realizaron mediciones sólo en una línea media de estudio a lo largo de la barra, ya que en esta dirección contiene tracción, compresión y la transición. Los resultados para onda longitudinal y transversal fueron concluyentes; se obtuvo que para  $v_T$  y  $v_L$  los valores disminuyeron a medida que la deformación aumenta hacia el centro de la barra, coherente con la teoría expuesta donde a medida que la densidad de dislocaciones aumenta producto de la deformación del material, la velocidad de propagación se ve afectada de manera que disminuye su magnitud.

Así el sistema de medición implementado fue coherente con la teoría expuesta, por lo que se obtuvo finalmente que el punto apropiado para un monitoreo *in situ* corresponde a una distancia de 4 cm al centro de carga de flexión, zona donde experimentalmente es posible reproducir el sistema experimental de una forma correcta y además es evidente la disminución de velocidad producto de la deformación en la zona.

# **Capítulo 1**

## **Introducción**

## 1.1 Introducción.

Para llegar a lo que conocemos hoy como sociedad moderna, el hombre antiguo debió resolver muchas interrogantes acerca de las propiedades y características de un material; por ejemplo, ¿qué hace al acero mucho más duro y resistente que el hierro puro? ¿Por qué algunos materiales son más dúctiles que otros? La respuesta, gracias a diversas investigaciones, sugiere como principal responsable a la configuración de los átomos que conforman una red de un sólido cristalino. Dicha red puede presentar defectos en su extensión, conocidos como dislocaciones, responsables de las propiedades más interesantes de la materia; tal como la deformación plástica, la resistencia a la rotura, conductividad eléctrica, entre otros. Así, las dislocaciones se convierten en un tema de gran interés para la ciencia dando origen a diversos trabajos de investigación tal como el presentado en esta memoria.

### 1.1.1 DEFECTOS LINEALES: DISLOCACIONES.

Un cristal se encuentra formado por un conjunto de átomos dispuestos periódicamente en el espacio, donde cada agrupación son bloques idénticos entre sí que se reconocen como bases de la red. Por otro lado, en el espacio infinito se distribuyen puntos matemáticos ordenados de manera periódica y en cada uno de ellos se posiciona una base; construyendo así un cristal ideal. Pero en la naturaleza no existe dicha situación, sino más bien estructuras cristalinas que a lo largo de ellas se presentan diversos defectos de distribución; defectos lineales, unidimensionales: las dislocaciones.

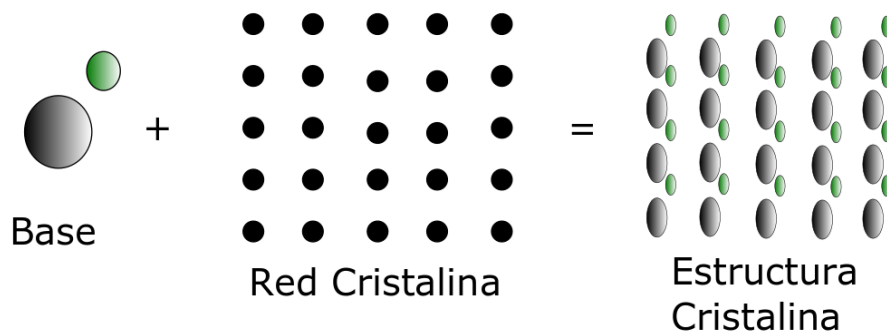


Figura 1.1: Representación de una estructura cristalina a partir de la configuración de la base en la red.

Para entender la idea de dislocación consideremos la figura 1.2. En a) se presenta una estructura cristalina perfecta, con planos atómicos perfectamente espaciados lo que da forma a un cubo. Ahora, si la estructura está sujeta a un estado tensional uno de sus efectos es originar dislocaciones, donde se encuentra inserto un plano adicional de átomos representado en b, lo que finalmente deforma al cubo inicial en la figura c, siendo necesario adicionar en esta geometría deformada un vector de Burgers para cerrar un círculo que en un inicio un perímetro determinado alcanzaba a encerrar un circuito, ahora que el cubo está deformado se debe adicionar este vector  $b$  para terminar el circuito alrededor de la dislocación.

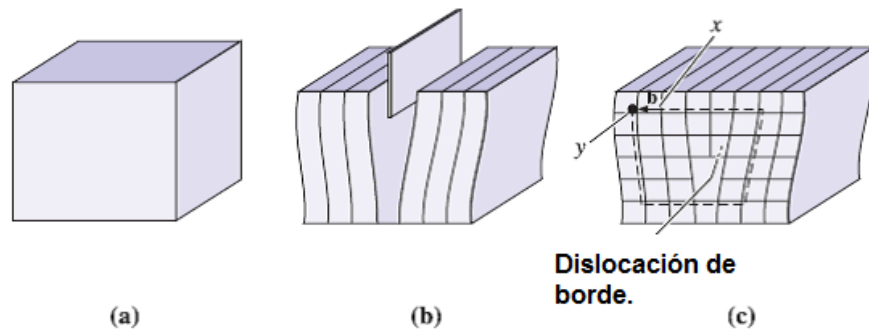


Figura 1.2: En (a) el cristal es perfecto. En (b) el cristal es cortado y un plano adicional de átomos es insertado. El borde interior del plano adicional es la dislocación de borde. En (c) la geometría inicial queda deformada, dando origen al vector de Burgers  $b$ . Imagen obtenida de [1].

Sin embargo la dislocación no sólo encierra un concepto dentro de la estructura cristalina; ha sido posible evidenciarla experimentalmente a través del microscopio electrónico de transmisión (TEM), proporcionando así una base experimental para estudios posteriores que han manifestado la importancia de las dislocaciones en la plasticidad del cristal y en numerosos aspectos de su comportamiento, definiendo la capacidad de deformarse bajo presión además de controlar otros aspectos como la fatiga, la ductilidad y la fragilidad.

Así, en la actualidad las dislocaciones se han convertido en la descripción de una realidad física, proporcionando un marco conceptual para explicar muchos fenómenos de la plasticidad cristalina. [4]

#### 1.1.1.1 Deformación plástica por dislocaciones.

La plasticidad de los materiales, particularmente en metales y aleaciones, es de suma importancia en muchas áreas de la ciencia, ingeniería y aplicaciones industriales. Así, en



diversas edificaciones que conforman las ciudades modernas se puede encontrar una gran variedad de estructuras en servicio que bajo ciertas condiciones pueden superar el límite elástico, comenzando a formar y desplazar dislocaciones en el material, desencadenando que éste se deforme plásticamente.

La generación y desplazamiento de las dislocaciones, responsable de la deformación plástica del material, es producido por un esfuerzo cortante que al ser mayor a la resistencia característica del cristal provoca que el plano de la red se deslice con respecto a otros, donde el movimiento es favorable para aquel plano que sea más compacto y con dirección preferente [4]. La dislocación en movimiento va rompiendo enlaces atómicos contiguos; así el plano con enlaces rotos se desplaza ligeramente en dirección contraria al deslizamiento para reestablecer sus enlaces con otros planos. Este proceso finalmente provoca el cambio permanente de la geometría del material, en otras palabras la deformación plástica del cuerpo.

Así, la acomodación de defectos en la red cristalina hace que la dislocación se desplace por el material interactuando y generando huecos que van creciendo y generando grietas hasta finalmente dar paso a que el material se rompa. De esta manera, para que un cristal sea más o menos capaz de superar el límite elástico depende, principalmente, de la capacidad que tengan las dislocaciones para moverse; el impedimento del desplazamiento de ellas convierte al material en uno más duro y resistente.

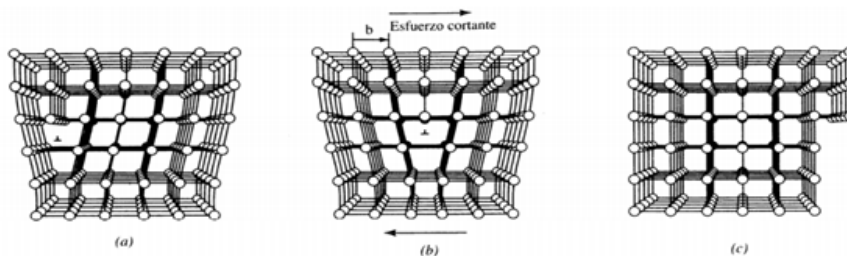


Figura 1.3: Desplazamiento de una dislocación por efecto de fuerzas externas, comenzando en un estado inicial en a), desplazándose a través de la red como se muestra en b) hasta llegar a c).

Figura obtenida de referencia [2].

En la actualidad, parte del estudio de dislocaciones ha sido realizado a través del TEM, permitiendo una medición local en especímenes muy pequeños, los que son especialmente preparados; incluyendo una medición de espesor no directo para estimar el volumen local de la zona bajo observación. Esta técnica es de uso limitado cuando las dislocaciones individuales no pueden ser resueltas debido a altas densidades de éstas. Otro procedimiento ampliamente

utilizado es considerar el ensanchamiento de picos de difracción de rayos X (XRD) por dislocaciones y defectos. Para su análisis es requerido un alto conocimiento teórico acerca del tema.

Ambas técnicas son destructivas con las muestras, ya que se requieren tamaños adecuados para realizar ambos estudios lo que impide monitorear el estado del material en servicio. Así, surge la necesidad de tener un nuevo método experimental que no sea invasivo con las muestras en estudio, abriendo la posibilidad al ultrasonido que presenta una energía muy baja en comparación a la necesaria para deformar significativamente el material en ensayo [5]. Ante esta nueva posibilidad experimental se hace indispensable comprender el comportamiento de las ondas acústicas con las dislocaciones.

### 1.1.1.2 Interacción ondas elásticas con dislocaciones.

Las ondas elásticas, más precisamente ondas acústicas, son amortiguadas en un medio sólido por varios mecanismos donde las dislocaciones juegan un papel importante. Esto se debe a que una onda elástica interactúa con una dislocación haciendo que esta última oscile en respuesta, y la transferencia de energía resultante de la onda a la dislocación amortigüe las vibraciones acústicas. Así, una onda elástica incidente sobre dicho segmento de dislocación se dispersa, y la onda dispersada resultante se caracteriza por sus amplitudes de dispersión, que dan cuenta de la pérdida de energía en comparación al inicio, entregando información de la estructura interna del material de manera no intrusiva.[6] En el trabajo de Felipe Barra et al. [7], se establece que las dislocaciones en un material, cuando éstas están presente en un alto número, la velocidad de propagación de las ondas elásticas, como se establece en las siguientes ecuaciones 1.1 y 1.2,

$$v_L = c_L \left(1 - \frac{16}{15\pi^4} \frac{1}{\gamma^2} \frac{\mu b^2}{\Gamma} nL^3\right), \quad (1.1)$$

$$v_T = c_T \left(1 - \frac{4}{5\pi^4} \frac{\mu b^2}{\Gamma} nL^3\right), \quad (1.2)$$

en las ecuaciones recién expuestas,  $c_L$  y  $c_T$  corresponden es la velocidad longitudinal y transversal, respectivamente, para una estructura cristalina perfecta, mientras que  $v_L$  y  $v_T$  son las velocidades de propagación de la onda en función a la densidad de dislocaciones  $nL^3$ . De las ecuaciones 1.1 y 1.2, se infiere que a medida que aumenta la densidad de dislocaciones  $nL^3$ , las velocidades en medición,  $v_L$  y  $v_T$  comienzan a decaer en función a la proliferación de defectos.

### 1.1.2 Técnica de pulsos ultrasónicos.

La técnica de pulso ultrasónico es utilizada para evaluar la calidad de un material de manera in situ ya que los vacíos y defectos en el material impiden el paso directo del pulso, revelando defectos internos del material [8]. Esta técnica se fundamenta en la medición del tiempo que demora una señal en recorrer una determinada distancia. Así, conocida la longitud y el tiempo de vuelo del pulso es posible determinar con precisión la velocidad de propagación de la señal.

La velocidad del pulso emitido a través del material está dado por

$$v = \frac{L}{\tau}, \quad (1.3)$$

donde  $v$  es la velocidad longitudinal del pulso,  $L$  la longitud de la trayectoria y  $\tau$  el tiempo que toma el pulso en recorrer esa longitud.

De manera experimental, la señal ultrasónica es enviada a través del material por medio de un transductor emisor para luego ser receptada por un segundo transductor. El tiempo de viaje de la onda entre los transductores es medido y desplegado a través de un sistema de instrumentación.

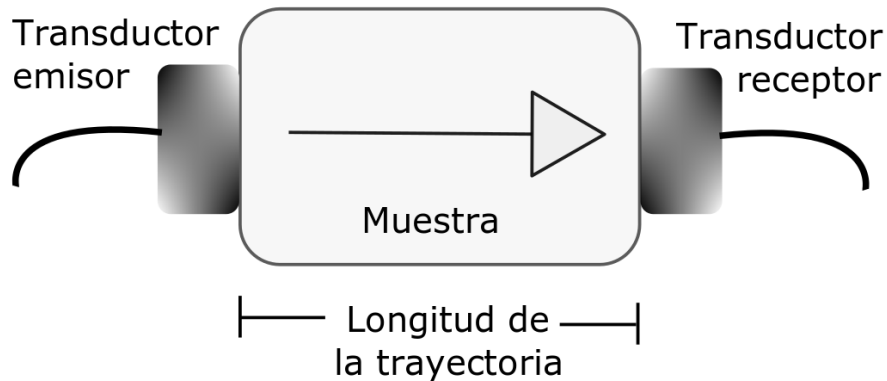


Figura 1.4: Diagrama de modelo experimental para la medición de la velocidad de un pulso ultrasónico.

### 1.1.3 Estado del Arte.

En los materiales se puede encontrar dos tipos de fallas; una es a través de la propagación de grietas la que podría provocar una fractura frágil. El otro tipo de falla, la que se encuentra principalmente en materiales en servicio, es la falla dúctil o de rendimiento plástico, que se rige por la proliferación de dislocaciones en los sólidos cristalinos [3]. Es por esto que la densidad

de dislocaciones ha sido durante mucho tiempo objeto de estudio. Si bien las mediciones in situ acerca de este fenómeno en los materiales utilizando microscopía han tenido importantes resultados respecto al conocimiento que se ha adquirido del comportamiento en las dislocaciones en el régimen plástico, el hecho es que se necesitan muestras demasiado pequeñas, a menudo con una preparación especial. En la macroescala, la mayoría de las mediciones todavía se basan en estudios post-mortem para utilizarlos con rayos X y TEM. Ambas son herramientas de estudio intrusivas las que no pueden ser utilizadas en materiales que están en servicio [6]. Ante estos antecedentes y la situación actual para la detección de la falla del material por fatiga dúctil, se ha trabajado para crear un sistema de medición in situ, no intrusivo, ante la fatiga del material. Apareciendo como opción el ultrasonido.

El ultrasonido se ha utilizado por décadas, como una herramienta de prueba no destructiva. Debido a su baja energía, pudiendo penetrar profundamente en un material sin afectarlo, detectando grietas y defectos en materiales sólidos que se encuentren en servicio, es su campo de aplicación principal. Pasando por aplicaciones de uso más básico, como conocer las constantes elásticas de un material; además de ofrecer la posibilidad de estudiar los parámetros de segundo orden de dispersión de ondas en un medio isotrópico con puntos de dispersión modelados como cuerdas, permite relacionar las dislocaciones en el cambio de velocidad del sonido, por lo tanto también implica identificar la deformación plástica. La pregunta es; si esta técnica permite la detección de micro-fracturas y la evaluación de fallas frágiles, ¿es posible utilizarla para el monitoreo plástico del material antes de llegar a la falla dúctil? Esta pregunta fue contestada el año 2012, por Mujica et. Al.[5], a través de la espectroscopía de resonancia ultrasónica, donde fue posible medir los cambios de velocidad de propagación de onda transversal debido al número de dislocaciones presentes en el sistema de estudio.

Durante el año 2014 se puso en marcha un sistema experimental para medir velocidad de propagación de onda transversal en una probeta de aluminio estandarizada durante ensayos de tracción uniaxial. El sistema es capaz de medir la velocidad de propagación de un pulso de 5 MHz viajando a través del material de espesor de 10 mm, con un error de 1

El primer conjunto de datos obtenido con este sistema experimental muestra que es posible medir cambios de velocidad de propagación transversal en el material durante un ensayo de tracción uniaxial bajo ciclos consecutivos de carga [3]. La figura 1.5 a) muestra medidas de esfuerzo  $\sigma$  versus deformación para tres ensayos consecutivos, cada uno con un mayor esfuerzo máximo. La figura 1.5 b) presenta la velocidad transversal versus  $\sigma$  en escala semi-log para los mismos ensayos de la figura a). Al comenzar cada nuevo ensayo se mide una velocidad que es muy cercana a la final del ensayo anterior. La velocidad disminuye abruptamente para  $\sigma \sim \sigma_y$

(esfuerzo de fluencia-Yield stress) y todas las curvas colapsan en el régimen plástico. Las líneas horizontales y verticales en (a) y (b), corresponden al esfuerzo de fluencia  $\sigma$  y medido siguiendo el método de Christensen. [9]

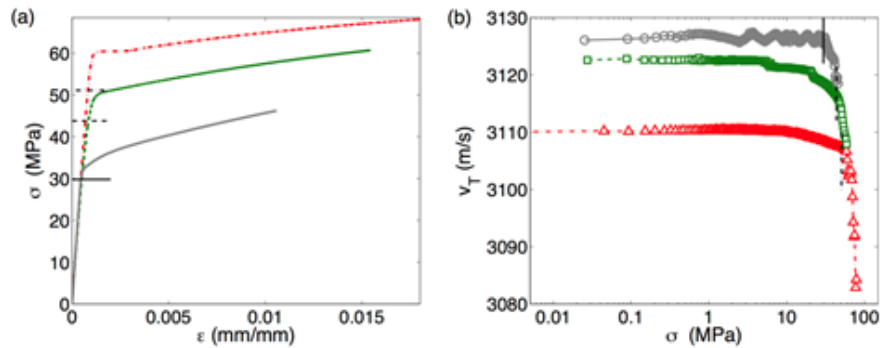


Figura 1.5: el gráfico a) muestra el esfuerzo  $\sigma$  versus deformación para tres ensayos consecutivos. La figura b) presenta la velocidad transversal versus  $\sigma$  en escala semi-log para los mismos ensayos de la figura a). Figura obtenida a partir de figura 4 de la referencia [3].

En resumen, se observa que la deformación plástica produce cambios no reversibles en el material, los que se atribuyen a la proliferación de dislocaciones durante la tracción.

En el trabajo de investigación de Vicente Salinas, en el año 2017, se obtuvo que la velocidad de ondas transversales como función del esfuerzo aplicado obtenido en tiempo real para una barra de aluminio sometida a una prueba de tensión estándar, varía en el inicio de la plasticidad en el aluminio, disminuyendo marcadamente la velocidad de onda transversal, lo que indica una consistencia con la proliferación de dislocaciones, proporcionando una relación continua y cuantitativa entre la densidad de dislocación y el estrés aplicado externamente. Así, esta técnica ultrasónica proporciona una ventaja en comparación al TEM, donde la primera permite determinar un monitoreo continuo ante la naturaleza no intrusiva del US, mientras que la segunda sólo permite mediciones antes y después del ensayo [3].

#### **1.1.4 Motivación.**

La motivación nace a partir de los trabajos previos mencionados en el inciso anterior, donde se comprueba experimentalmente que hay una estrecha relación entre la deformación del material y la velocidad de propagación de onda elástica; por lo que se podrían dejar atrás técnicas tan intrusivas como los rayos X y el TEM, pero, ¿qué pasaría si implementamos esta técnica en un ensayo de flexión?. ¿Será posible detectar, de igual forma que en tracción, los cambios de velocidad? Es lo que se espera comprobar con este trabajo experimental.

#### **1.1.5 Objetivo.**

##### **1.1.5.1 Objetivo general.**

Verificar la capacidad de la técnica de tiempo de vuelo para onda longitudinal y transversal, de detectar cambios en la velocidad de propagación de onda para un ensayo de flexión.

##### **1.1.5.2 Objetivos específicos.**

- Implementar un sistema automatizado para la adquisición de datos a través del software LabView de National Instrument.
- Estudio acabado de la influencia de la deformación sobre la velocidad de propagación de la onda.
- Verificar si la técnica ultrasónica empleada es eficiente para ensayos de flexión para el monitoreo de falla dúctil en el material.
- Determinar la utilidad de la técnica utilizada ante los problemas ingenieriles de la actualidad.

## **Capítulo 2**

# **Procedimiento Experimental**

## 2.1 Ensayo de Flexión.

En obras de ingeniería es fácil distinguir distintas estructuras sometidas en su mayoría a esfuerzos de tracción o flexión, evidenciando en cada caso zonas características donde la estructura podría colapsar. Es así que se hace indispensable poder reproducir las condiciones de servicio, hasta donde sea posible, para el posterior estudio de las propiedades mecánicas del material enfocando los métodos de detección en las zonas catastróficas características según el ensayo de deformación aplicado.

En este trabajo de investigación, el mecanismo de deformación utilizado es el de flexión.

El ensayo de flexión en laboratorio consiste en una barra dispuesta horizontalmente sobre dos soportes donde se aplica una carga en el punto medio sobre la cara contraria a la que ha sido apoyada en los pivotes, deformando la muestra en forma de  $U$  (figura 2.1 a). Al final del proceso presenta una zona convexa dilatada y una zona cóncava comprimida. Todo este comportamiento se evidencia a lo largo de la muestra, siendo más evidente en la zona cercana a la aplicación de carga, notando una zona superior que termina cóncava y la inferior quedando convexa; pero también existe una zona 'neutra' en dirección horizontal sobre la cual no hay dilatación ni compresión, así, esta superficie separa la región comprimida de la dilatada (régimen estandarizado por norma ASTM E290).

Así el ensayo de flexión permite determinar la ductilidad de los materiales, la resistencia a la flexión y a la fractura [10]. Dichas propiedades pueden ser usadas para determinar si un material fallará bajo servicio, siendo especialmente importante en cualquier proceso de construcción que involucre materiales dúctiles cargados bajo flexión. Por lo tanto, si un material comienza a fracturarse durante la prueba, es válido suponer que también fallará bajo condiciones similares en mega-estructuras de la ingeniería moderna.

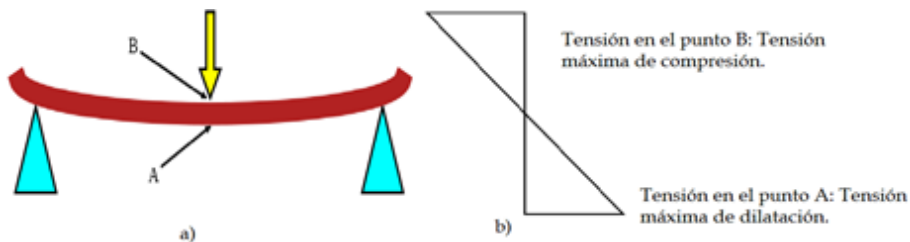


Figura 2.1: En a) la viga bajo flexión; la zona B está sometida a compresión y la zona A sometida a dilatación. En b) se muestra la distribución de tensión a lo largo del espesor de la viga.



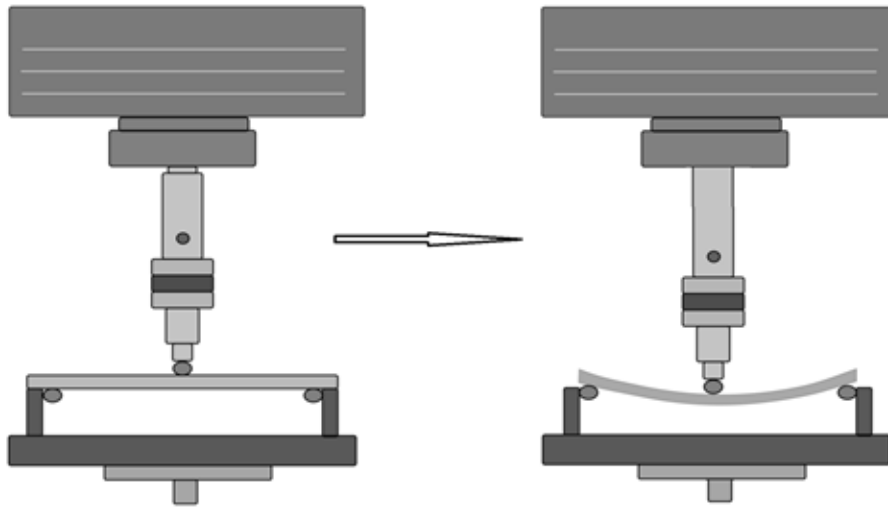


Figura 2.2: Diagrama ensayo de flexión desde una barra en esta inicial a una barra flexionada.

## 2.2 Transductores.

La inspección de las muestras de aluminio se realiza a través de transductores piezoeléctricos de onda longitudinal (L) y transversal (T), ambos con frecuencia de resonancia en 5 MHz y geometría cilíndrica de 9 mm de diámetro y 20 mm de altura.

Los transductores son el principal instrumento para la emisión de pulsos ultrasónicos. Midiendo el tiempo de vuelo y conocida la distancia de propagación, se logra determinar la velocidad de propagación, variable en la que se centra esta tesis de investigación. Entonces se hace indispensable una profunda comprensión acerca del funcionamiento y comportamiento de las sondas utilizadas.

Una característica importante al momento de elegir un transductor como emisor para realizar las mediciones, es la distribución del campo de sonido a lo largo del eje en que se desplaza la onda. El campo de sonido de un transductor está dividido en dos zonas; el campo cercano y campo lejano.

Las ondas emitidas desde la superficie de la sonda se superponen entre ellas de tal manera, que debido a su fase se produce interferencia constructiva y destructiva generando una serie de máximos y mínimos en la señal, hasta llegar a cierta distancia donde el comportamiento comienza a ser la de una onda de frente plano siendo reconocible por un último máximo el cual comienza a decaer paulatinamente. La distancia  $N$  que abarca desde la superficie emisora y el último máximo se conoce como campo cercano, luego de esta distancia se denomina campo

lejano [11].

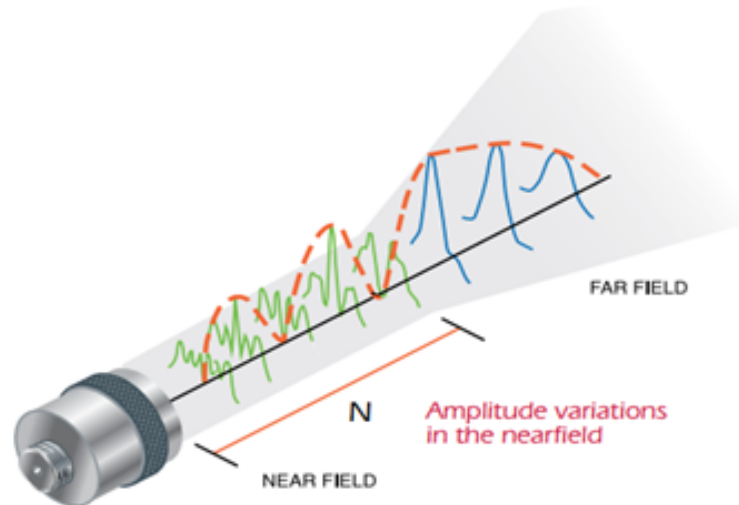


Figura 2.3: Imagen de la referencia [?], página 44, figura 7. Diagrama de la localización y extensión del campo cercano y lejano para un transductor.

El campo lejano es el área más allá de  $N$  donde la presión del campo de sonido desciende gradualmente a cero. La distancia  $N$  se define como, [?]

$$N = D^2 \cdot \frac{f}{4c} = \frac{D^2}{4\lambda}, \quad (2.1)$$

donde  $N$  es la distancia campo cercano,  $D$  es el diámetro del área efectiva del transductor que para las zonas utilizadas en este montaje experimental corresponde a 6 mm. La frecuencia  $f$  de 5 MHz para ambas ondas,  $c$  corresponde a la velocidad del sonido en el material siendo para la onda  $L$  y  $T$  6320 m/s y 3130 m/s respectivamente a temperatura ambiente (20°C) [12].

Utilizando la ecuación 2.1 y los valores de los parámetros mencionados, se obtiene la distancia de campo cercano es de 14 mm y 7 mm para onda transversal y longitudinal respectivamente.

Una vez que la señal pasa al campo lejano el rayo diverge, este último se concentra en un lóbulo principal que corresponde al mayor porcentaje de energía por la característica de direccionalidad de los transductores; la energía que se encuentre fuera de esta zona está concentrada en los lóbulos laterales, presentes en el campo cercano, responsables de reflexiones indeseadas [?] pudiendo ser detectadas por un segundo transductor si la distancia recorrida por la onda fuera menor o igual a la distancia  $N$  del transductor. Importante condición que debe cumplir la dimensión de la barra de aluminio que se utiliza como longitud de trayecto para asegurar una

correcta medición.

Una segunda relación entre el transductor y la muestra es el tamaño entre las superficies que entran en contacto, destacando dos casos:

- Si el diámetro del transductor es mucho mayor a la muestra, la onda que se propaga sería muy similar a una onda de frente plano, sin distinguirse los efectos de los lóbulos laterales puesto que el pulso sólo estaría formado por el lóbulo principal. El primer problema de esta configuración transductor-muestra, es que la zona de contacto es muy pequeña, por lo tanto se emite sólo una fracción de la energía total, la que es bastante escasa para excitar al transductor receptor, el que también presenta una pequeña zona que está en contacto con la muestra, zona que es la única apta experimentalmente para recibir la señal.

Otra complicación ante esta configuración, es la emisión de energía a través del cilindro que da forma al transductor, interfiriendo con la señal enviada a través del material en estudio.

- Si el diámetro del transductor es mucho menor a la muestra, los lóbulos laterales no podrían ser reflejados por las paredes laterales de la muestra, por lo que sólo nos quedaríamos con la emisión del lóbulo principal.

El segundo caso es el ideal para este procedimiento experimental, se vuelve importante considerar los diámetros de los transductores con respecto a la dimensión de estudio de la muestra, puesto que lo principal es liberarse de los efectos indeseados de los lóbulos laterales para recibir la onda emitida de la manera más íntegra posible por el transductor receptor.

## **2.3 Muestras.**

Las probetas de aluminio (aluminio 1100) sometidas a flexión de pureza comercial (99%), se obtienen a partir de una plancha del mismo material que a través del mecanismo de fresado en todas sus caras dan la geometría y dimensiones mostradas en la figura 2.4:

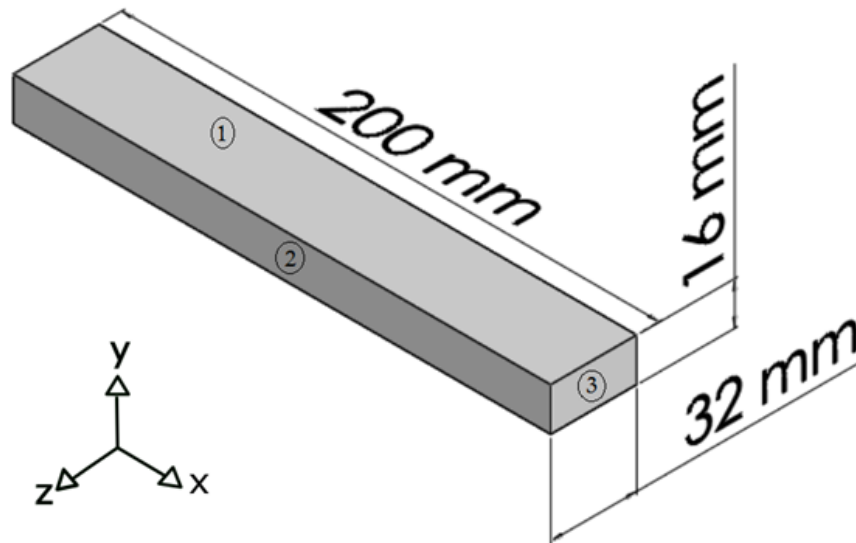


Figura 2.4: Diagrama de la probeta de aluminio y sus dimensiones, utilizada para los ensayos de flexión. Donde la superficie 1 tiene dimensiones de  $32 \times 200 \text{ mm}^2$ , la superficie 2 de  $16 \times 200 \text{ mm}^2$  y la superficie 3 de  $16 \times 32 \text{ mm}^2$ .

El acabado superficial del proceso de la probeta no es del todo crucial, ya que este estudio está enfocado a la ingeniería, por lo que se necesitan condiciones iniciales reales y no las ideales. Se utilizan cargas de flexión para 3 muestras aplicando 3, 4 y 5 kN por barra para el procedimiento ex situ, mientras que para las mediciones in situ se utiliza una carga máxima de 5 kN.

Las muestras rectangulares de aluminio se someten a ensayos de flexión de 3 puntos, cuasi-estáticos en una máquina de ensayos mecánicos marca INSTRON modelo 3369, donde la carga se aplica en el punto central de la barra apoyándose en los extremos de la cara inferior, el espécimen se dobla hasta una condición predeterminada, en este caso el fin del ensayo sucede cuando el sistema alcanza la carga de flexión configurada. El ensayo es realizado con velocidad de carga constante a  $0,01 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$ .

## 2.4 Monitoreo.

### 2.4.1 Monitoreo in situ.

El primer objetivo dentro de este trabajo de investigación es establecer una metodología de monitoreo in situ para un ensayo de flexión de tres puntas a través de la adquisición de tiempo

de vuelo de onda transversal y la distancia que recorre, para luego obtener el comportamiento de la velocidad de propagación en una posición fija a lo largo del ensayo de flexión.

En primera instancia, para conocer el comportamiento de tracción y compresión en la muestra de aluminio se fijan tres sensores de deformación en la barra a través de un adhesivo especializado. Uno de ellos posicionado en la superficie 1, según la figura 2.4, un segundo en la superficie 2 y el restante en la cara paralela a ésta, cada uno de ellos conectados a un puente de Wheatstone.

El puente de Wheatstone está constituido por un circuito cerrado de cuatro resistencias; tres de ellas son fijas y conocidas, la restante varía a partir de la deformación detectada por el sensor, generando un voltaje de salida que será coherente con el comportamiento de compresión o tracción de la zona estudiada en la barra; dicho voltaje es recopilado por una tarjeta de adquisición de datos marca National Instruments que permite realizar mediciones en simultáneo (hasta 32 puntos en tiempo real).

El objetivo principal en esta construcción experimental es determinar la velocidad de propagación de la onda a partir del tiempo de vuelo ( $\tau$ ) y la distancia recorrida ( $L$ ) que experimenta, ambas medidas in situ durante el ensayo de flexión.  $\tau$  se determina a partir del tiempo que le toma a la onda recorrer el espesor de la barra en dirección del eje Z (32 mm) a través de un par de transductores de onda transversal marca Olympus modelo v-156 RM, posicionados a 4 cm del centro de flexión, la distancia más cercana que permite el sistema experimental. La posición es fijada por una prensa permitiendo un monitoreo continuo en la misma zona durante el ensayo de flexión. La disposición espacial de la barra para el ensayo de flexión se muestra en la figura 2.6.

El monitoreo de la distancia recorrida por la onda,  $L$ , se realiza por adquisición de imágenes cada 30 segundos una vez iniciado el ensayo al mismo nivel donde se posicionan los transductores, que abarca una sección transversal desde los 4 a los 7 cm desde el centro de flexión en la superficie 1. Para este objetivo se utiliza una cámara marca Point Grey, conexión USB de 3 Mpx y lente óptico de distancia focal fija de 50 mm. La superficie 1, cuyo interés recae en ella por entregar  $L$ , se encuentra transversal a la dirección de la carga aplicada, impidiendo una visibilidad directa hacia la cámara. Así, a través de un espejo posicionado sobre la cara 1 a  $45^\circ$  respecto al eje Z como muestra la figura 2.5, permite visualizar la superficie en estudio y monitorear el espesor de dicha cara mientras se realiza el ensayo de flexión. Para una mejor visualización de los bordes de la barra, quienes entregarán información de la variación del espesor, es importante crear un contraste apropiado entre la muestra y el fondo, ayudando al posterior análisis de imagen.

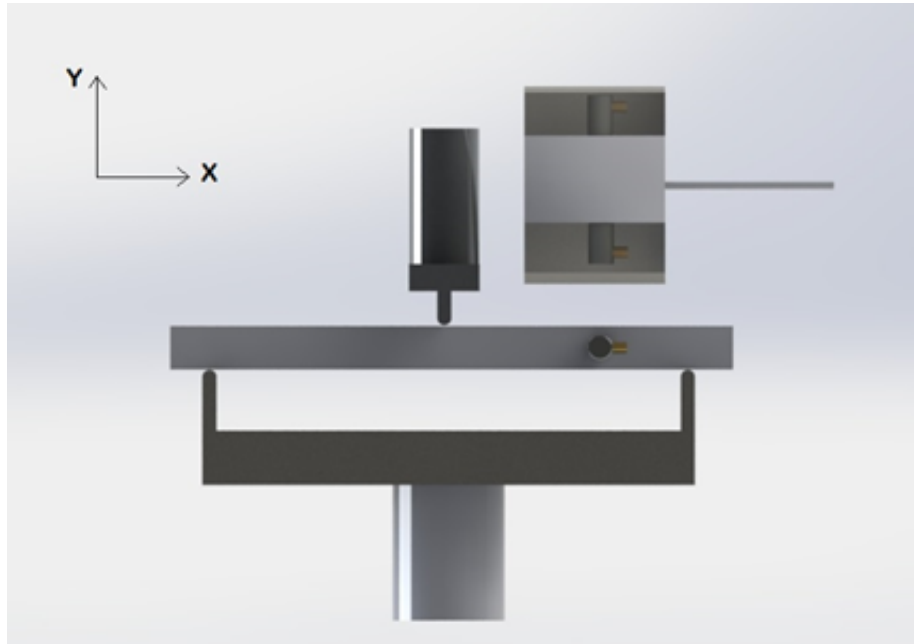


Figura 2.5: Montaje experimental visualizado en el plano XY, donde se visualiza la imagen que toma la cámara desde el espejo, correspondiente a la sección transversal de la cara superior de la barra de aluminio.

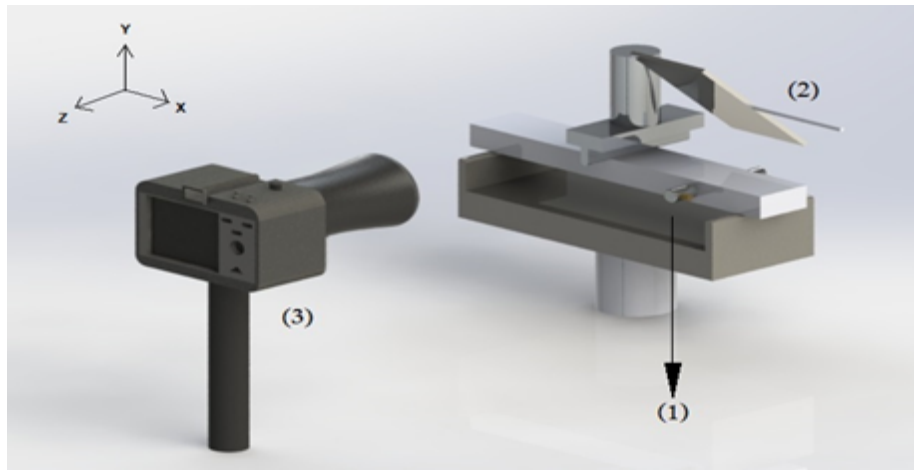


Figura 2.6: Diagrama de montaje experimental in situ;(1) corresponde a los transductores de onda transversal, (2) espejo posicionado a  $45^\circ$  respecto al eje Z y (3) corresponde a la cámara y el lente utilizados para la adquisición de imágenes.

#### **2.4.1.1 Procedimiento e inconvenientes experimentales y de procesamiento de datos para montaje in situ.**

Dentro de diversos ensayos mecánicos se evidencian diferentes obstáculos experimentales. Uno de ellos es la implementación en el sistema experimental de los transductores. Si bien, a través de una prensa son alineados y fijados para que las sondas no se desplacen a lo largo de la barra, ocurre que sí se desplazan a lo largo del eje Y. Sucede que a lo largo de esta dimensión se distinguen tres zonas a partir de la aplicación de la flexión; la primera de ellas es la superficie en contacto directo con la carga quien está bajo compresión. Avanzando en el sentido de aplicación de la fuerza, disminuye la intensidad de la compresión hasta cierto punto donde comienza a ocurrir tracción, destacando también la existencia de la zona de transición entre ambos fenómenos donde no ocurre deformación alguna. Por esta razón, si los transductores se desplazan a lo largo del eje Y, se monitorea diferentes fenómenos pasando por diferentes zonas con diferentes condiciones experimentales a lo largo del ensayo, ya que la aplicación del gel para el correcto acoplamiento transductor-muestra varía a medida que se desplaza en el alto de la barra, pudiendo interferir en la correcta implementación de la sondas influyendo en la información adquirida.

La segunda variable que influye en la velocidad de propagación de la onda es la distancia recorrida por ésta (L). La variable L también presenta inconvenientes para su adquisición en el sistema experimental, a simple vista el comportamiento del espesor de la sección transversal estudiada no varía como sí es posible observar en un ensayo de tracción, donde surge un cuello de adelgazamiento por efecto del ensayo. En el caso de la zona estudiada bajo flexión, se observa más bien que el espesor se mantiene constante confirmándolo a través de un pie de metro marca Mitutoyo, rango de medición entre 1-2" y sensibilidad de 0.001 mm, donde se obtiene que la barra en un inicio tiene un espesor de 31.998mm y una vez flectada tiene un espesor de 32.062 mm. La diferencia entre el estado inicial y final de la muestra tiene una diferencia de espesor de 0.074 mm lo que evidencia que el comportamiento del espesor es más bien constante en esta zona, presentando dificultad en el procesamiento de imagen utilizado ya que se considera que presenta una baja sensibilidad para registrar el comportamiento de espesor de la barra durante el ensayo de flexión in situ.

Es importante mencionar que es posible observar una importante deformación en la zona más cercana a la aplicación de carga, hasta unos 3 cm desde el centro de la muestra. Dicha zona no es posible monitorearla experimentalmente in situ, ya que los instrumentos de medición obstruyen a la barra de la máquina de tracción que aplica la flexión. Así, ante los inconvenientes experimentales obtenidos y de no obtener resultados que describan un comportamiento claro

en la sección transversal utilizada, se sugiere un cambio de objetivo, uno menos ambicioso; la exploración ex situ a lo largo y alto de la barra del comportamiento que presenta la velocidad de propagación de la onda a tres diferentes niveles de carga; 3, 4 y 5 kN. Determinando si realmente hay un cambio medible de la velocidad en flexión y precisando el lugar donde se observa el mayor cambio de velocidad a medida que se aumenta la carga de flexión encontrando el punto ideal para monitorear in situ.

#### 2.4.2 Monitoreo ex situ.

Se ocupan 2 pares de transductores; un par de ellos de onda longitudinal (Olympus v110-RM) y el otro de onda transversal (Olympus v156-RM). El procedimiento experimental a detallar se realiza para cada par de transductores. Para el montaje experimental se posiciona un transductor emisor y otro receptor en caras paralelas exactamente uno frente al otro en la probeta de aluminio, utilizando para un mejor acoplamiento transductor-muestra un gel marca PANAMETRICS-NDT, el que es distribuido uniformemente en la superficie de contacto para cada transductor.

Las mediciones de tiempo de vuelo ( $\tau$ ) en la probeta se realizan en la dirección Z e Y, con espesor de 32 mm y 16 mm respectivamente, como muestra la figura 2.7. La primera dirección será detallada a continuación y la segunda será detallada cuando se proceda a explicar y analizar dicha dirección.

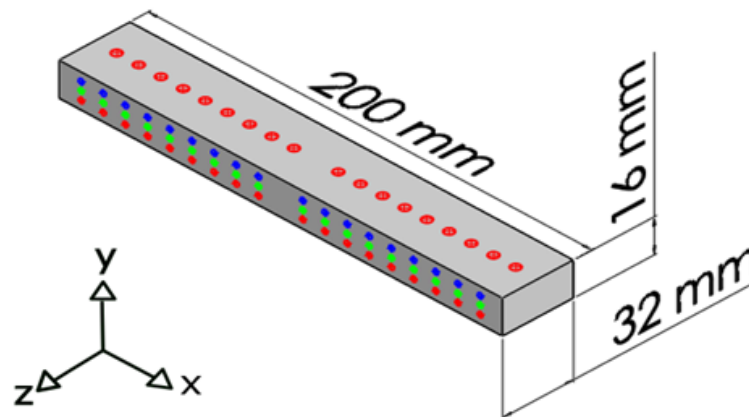


Figura 2.7: Distribución de puntos donde se realizan las mediciones de  $\tau$ . Las caras del plano XY se distribuye a lo largo de la probeta tres líneas de mediciones correspondientes a una línea media, una línea media inferior y otra superior. Para las superficies en el plano XZ se distribuye sólo una línea de medición, correspondiente a lo largo de X.



#### 2.4.2.1 Distribución de los puntos de medición en la zona de estudio.

Para la medición de  $\tau$  en la dirección Z, el estudio es realizado como sigue.

- Las mediciones se realizan en el plano XY. A lo largo del eje X se distribuyen 3 líneas de medición (L1, L2, L3) equidistantes como se muestra en la figura 2.8; donde L1 se encuentra en contacto directo con los pivotes, la L2 será la línea media de la barra en el eje Y, finalmente L3 estará en contacto con la carga aplicada. Para cada línea mencionada se realizan puntos de medición equidistantes entre sí por 1 cm a lo largo de la cara que mide 200 mm, obteniendo 19 puntos, de los que descontamos el punto central el que es utilizado como referencia, quedando 18 puntos de medición para cada línea de la superficie. La figura 2.8 ilustra la zona de medición para el ancho de la barra.

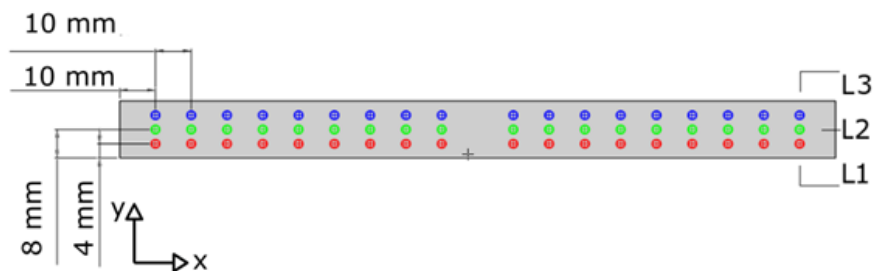


Figura 2.8: Distribución de los puntos de medición para las caras en el plano XY, distinguiendo una línea media inferior (L1), que se encuentra en contacto con los puntos de apoyo, una línea media (L2), y una línea media superior (L3), la que se encuentra en contacto a la aplicación de la carga.

#### 2.4.2.2 Procedimiento de medición para la obtención de la velocidad de propagación.

Para cada  $\tau$  en los punto de medición en dirección del eje Z o Y se realiza el mismo protocolo a describir en el siguiente párrafo.

Desde el transductor emisor la señal es direccionada hacia el transductor receptor, una vez medido  $\tau$  a través de un sistema de adquisición de datos, se reposicionan ambas sondas en el mismo punto y se repite la medición. Este proceso se realiza 10 veces y se continúa con el siguiente punto repitiendo el mismo protocolo. Al finalizar todas las mediciones de  $\tau$ , se procede a realizar 10 mediciones de espesor ( $L_Z$  y/o  $L_Y$ ) para cada locación de estudio con un tornillo micrométrico marca Mitutoyo, rango de medición entre 0-1" con sensibilidad de 0.001 mm.

## 2.5 Procedimiento para la adquisición de datos.

El pulso enviado tiene una frecuencia de 3 MHz, 5 oscilaciones, un ancho de 10 mm y un voltaje de  $2 V_{PP}$ , es originada a partir del generador de señal, marca Agilent modelo 33220A con frecuencia de corte superior de 80 MHz para ondas arbitrarias. Para luego ser aumentada x10, utilizando un amplificador marca NF modelo HS-4011 con frecuencia de corte en 1 MHz y voltaje máximo de salida  $150 V_{PP}$ . La señal amplificada corresponde a la onda incidente en el material a través del transductor emisor, la que luego es medida por el receptor. Ambas señales son visualizadas en directo por el osciloscopio digital LeCroy WaveJet334-A con ancho de banda de 350 MHz y velocidad de muestreo de 1 Gs/s. A partir de este último instrumento se toman los datos de voltajes correspondientes a la señal emitida y recibida, y la base de tiempo que corresponde al intervalo entre cada punto que compone cada señal, siendo para onda transversal  $1e-8$  s y para longitudinal es  $4e-9$  s. Toda esta información es recopilada a través de la interfaz GPIB marca National Instrument modelo GPIB-USB-H y visualizada en el computador a través de LabView, este último permite configurar los canales a utilizar en el osciloscopio, la amplitud de la señal ( $V_{PP}$ ) y la frecuencia de la misma.

## 2.6 Procedimiento para análisis de datos.

Para las señales emitidas y recibidas, las que son obtenidas a partir del osciloscopio, se obtiene para cada una de ellas el valor absoluto de la transformada de Hilbert donde se obtiene la amplitud instantánea de la serie temporal correspondiente a las envolventes para luego aplicar una interpolación tipo spline la que permite suavizar la señal y para aquellos datos atípicos a la curva se realiza un promedio móvil a una ventana de datos. Luego de aplicar a la señal los arreglos mencionados, se correlaciona la onda emitida con su correspondiente onda recibida, lo que permite determinar el desfase temporal correspondiente a  $\tau$ .

A partir del tiempo de vuelo determinado y del espesor medido, se obtiene la velocidad de propagación a partir de la ecuación 1.3.

## 2.7 Procedimiento para análisis de resultados.

Para el grupo de datos de tiempo de vuelo y espesor se obtiene el error para cada variable,

$$\Delta \tau = \sqrt{(std(\tau(i)))^2 + \Delta t^2}, \quad (2.2)$$

$$\Delta L = \sqrt{(\text{std}(L(i)))^2 + \Delta l^2}, \quad (2.3)$$

Para la ecuación 2.2,  $\Delta\tau$  corresponde a la incertidumbre del tiempo de vuelo de la señal,  $\tau$  como el tiempo de vuelo,  $i$  es el número de iteraciones,  $\Delta t$  es el paso de tiempo entre cada dato que constituye la señal, en onda transversal es 1e-8 s y para longitudinal es 4e-9 s. En la ecuación 2.3,  $\Delta L$  representa la incertidumbre de la medición de espesor,  $L$  el espesor medido y  $\Delta l$  la sensibilidad del tornillo micrométrico utilizado, tomando el valor de 1e-6 m.

De la toma de datos para el tiempo de vuelo y su espesor se determina la velocidad longitudinal y transversal a partir de la ecuación 2.2. Junto a los datos correspondientes a tiempo de vuelo y espesor con sus incertidumbres respectivas, se determina el error para la velocidad a partir de la ecuación 2.4,

$$\Delta V = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{\tau}\right)^2 + \left(\frac{L \cdot \Delta\tau}{\tau^2}\right)^2}, \quad (2.4)$$

de esta manera es posible dar paso a los resultados obtenidos en este trabajo de investigación.

## **Capítulo 3**

# **Resultados Experimentales y Análisis**

## **3.1 Monitoreo ex situ.**

### **3.1.1 Resultados para mediciones en dirección del eje Z.**

#### **3.1.1.1 Geometría de la muestra después del ensayo de flexión.**

Las mediciones de  $\tau$  para la zona de estudio en el plano XY, no es posible realizarlas en todos los puntos de medición que entrega la figura 2.8, ya que en la zona más cercana a la carga aplicada produce un ensanchamiento de la parte superior en contacto con el aplicador de fuerza y un angostamiento de la zona inferior que no está en contacto con el aplicador de la fuerza, afectando principalmente a los niveles de carga 4 y 5 kN. La geometría resultante no permite el contacto correcto entre los transductores y la barra, impidiendo que la señal emitida se reproduzca como una señal detectable para el transductor receptor. Por lo que las mediciones se realizan a 2 cm desde el centro de la barra.

#### **3.1.1.2 Velocidad de propagación.**

La distribución de velocidad longitudinal y transversal para cargas de 3, 4 Y 5 kN a lo largo del eje X para la barra  $n^{\circ}1$ , presenta un comportamiento repetitivo en cada nivel de fuerza para L1, L2 y L3; así se toma como representativa el resultado en 4 kN.

En las figuras 3.1 y 3.2 se muestran los resultados promedio de velocidad longitudinal y transversal respectivamente, para cada línea de estudio a nivel de carga 4 kN.

En primera instancia es posible observar a partir de las figuras 3.1 y 3.2 el promedio de las velocidades para las barras sin y después de flectar. El sistema de medición tiene la capacidad de determinar la diferencia de velocidad promedio entre las tres líneas de estudio del orden del 1 %, por lo que se infiere que el sistema de medición utilizado tiene una gran sensibilidad.

Para la velocidad longitudinal antes y después de deformar la muestra en todos los niveles de carga, la velocidad promedio en L2 está por debajo de los valores obtenidos para L1 y L3 (figura 3.1). Caso contrario sucede con la velocidad transversal; el promedio en L2 es mayor al grupo de datos de L1 y L3 (figura 3.2). Por lo que se produce una situación contradictoria entre onda longitudinal y transversal.

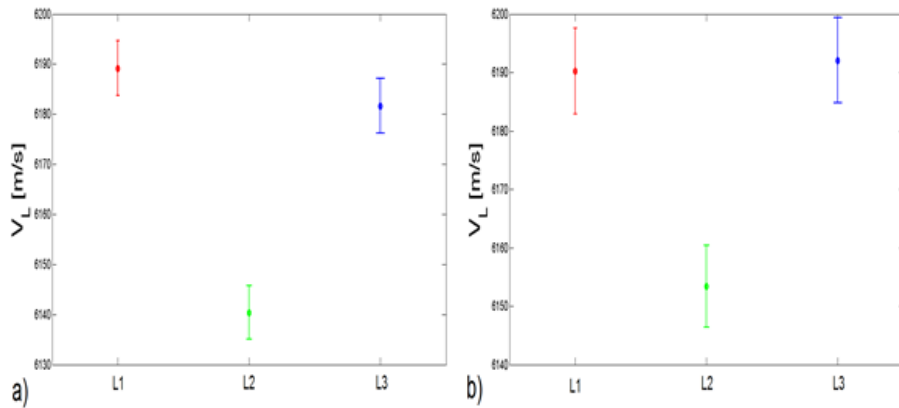


Figura 3.1: Velocidad longitudinal promedio para L1, L2 y L3 para un nivel de flexión de 4 kN para la barra 1; a) corresponde a la barra de aluminio sin flectar mientras que en b) ya se encuentra deformada.

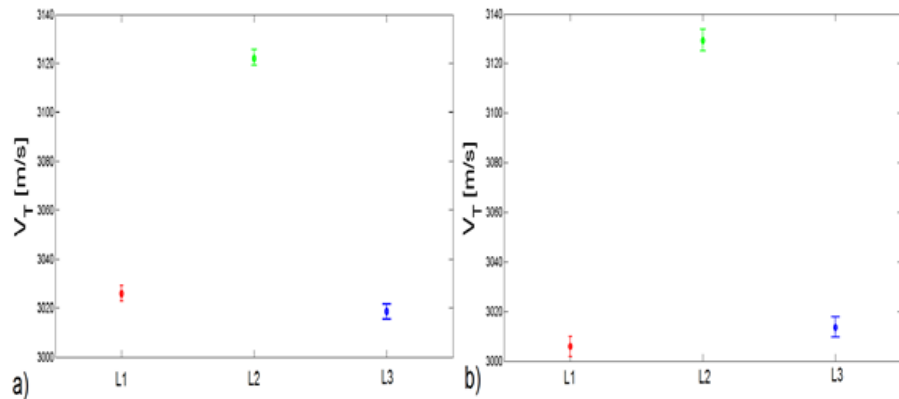


Figura 3.2: Comportamiento de la velocidad transversal para un nivel de flexión de 4 Kn para la barra 1; a) corresponde a la barra de aluminio sin flectar mientras que en b) ya se encuentra deformada.

Ante los gráficos expuestos los resultados entre la velocidad transversal y longitudinal presentan contradicciones en su comportamiento entre las tres líneas de estudio, por lo que se procede a probar una solución para homogenizar las velocidades, el recocido de una nueva barra de estudio, a la que se denominará barra  $n^{\circ}2$ . El proceso tiene una duración de 125 horas a  $400^{\circ}\text{C}$ .

### 3.1.1.3 Resultados para de velocidad para la dirección Z, antes y después del recocido.

Se realizan mediciones de tiempo de vuelo ( $\tau$ ) y espesor ( $L$ ) antes de deformar la barra en dirección Z antes y después del recocido. Con las variables mencionadas se obtiene la velocidad promedio para cada línea de estudio como muestra la figura 3.3.

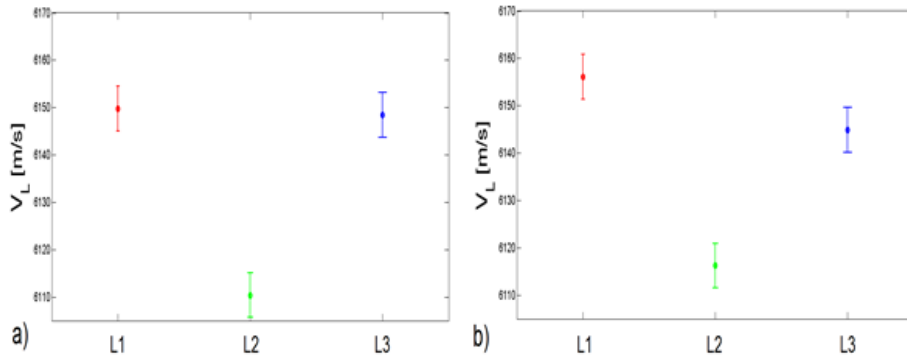


Figura 3.3: Velocidad longitudinal para barra  $n^\circ 2$  sin deformar, antes (a) y después del recocido (b).

En la figura 3.3, en a y b se muestran los resultados para la barra  $n^\circ 2$  antes y después del recocido respectivamente previo al ensayo mecánico. Se observa en ambos casos que la distribución de velocidad promedio para las tres líneas de estudio se distribuye de manera similar y con valores muy parecidos entre ambos casos, asemejando el mismo comportamiento de velocidad longitudinal que la barra  $n^\circ 1$  sin deformar (figura 3.1a).

Ante los resultados expuestos en la figura 3.3 se puede observar que el comportamiento de velocidad se mantiene después del recocido en la muestra infiriendo que se repetiría el mismo comportamiento contradictorio para la onda transversal. Para éste último la velocidad en los bordes es menor que L2 y en onda longitudinal es mayor a esta línea media, comportamiento que no pudo ser reivindicado por el procedo de recocido de la barra.

Analizando L1 y L3, ambas línea de distribución a lo largo de la barra corresponden a los bordes de la probeta, mientras que L2 corresponde a la línea media en dirección X. Analizando, cuando los transductores están posicionados en L2 existe una distancia a las paredes de la muestra de 5.3 mm, considerando que el campo cercano N en onda transversal es del orden de 14 mm y en onda longitudinal de 7 mm, se desprende que en ambas ondas sí es posible que los lóbulos laterales se propaguen a través de sucesivas reflexiones con la pared de la muestra ya que el campo cercano es mayor a la distancia desde L2 al borde. Así, la propagación de los lóbulos laterales al ser recibidas en el transductor receptor, interfiere con la información

recibida del lóbulo lateral. Por lo tanto el campo cercano no sólo se debe tener consideraciones experimentales a lo largo de la trayectoria, sino que en todas las direcciones del cuerpo en estudio. Así, ante este obstáculo experimental se hace indispensable encontrar una nueva orientación para las mediciones eliminando el efecto del campo cercano del transductor emisor. Por esta razón se decide cambiar la orientación de medición de la dirección Z a Y, sólo en la línea medía a lo largo de X, donde el campo cercano es menor a la distancia del transductor a los bordes; eliminando el efecto indeseable del campo cercano. Las mediciones en dirección Y contienen el efecto de compresión y tracción a causa de la flexión, por lo que se hace innecesario dividir la sección transversal de estudio como se hizo en la dirección Z.

### 3.1.2 Resultados para mediciones en dirección del eje Y.

#### 3.1.2.1 Distribución línea de estudio en dirección Y.

Para la medición de  $\tau$  en la dirección Y en la barra  $n^{\circ}2$  con un nivel de carga de 5 kN, el estudio es realizado como sigue.

- Las mediciones se realizan a lo largo de la línea media en la superficie del plano XZ, en la que se realizan puntos de medición a lo largo (200 mm) obteniendo 19 locaciones, de ellas, se descuenta el punto central el que es utilizado como referencia para la aplicación de la carga, quedando 18 puntos de medición. La figura 3.4 ilustra la distribución de puntos en la zona experimental en el plano XZ.

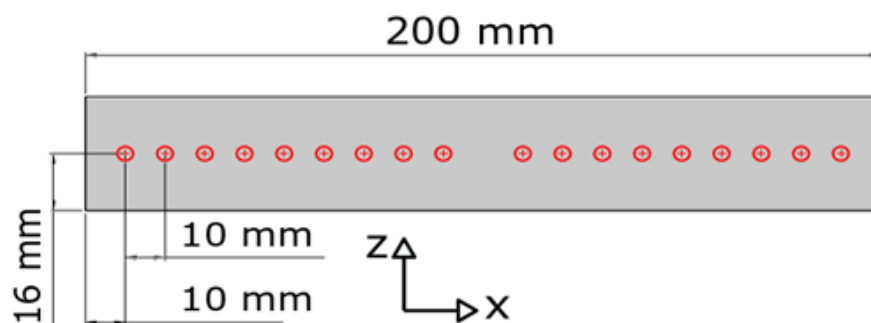


Figura 3.4: Distribución de los puntos de medición para las caras de dimensión  $32 \times 200 \text{ mm}^2$ .

Para el tiempo de vuelo y distancia que recorre la onda en cada punto de medición, se realiza el mismo procedimiento experimental que en la dirección Z.



Así, se realiza un estudio preliminar para conocer las condiciones de velocidad antes y después del recocido de la barra a través del error relativo porcentual, obteniendo el gráfico de la figura 3.5.

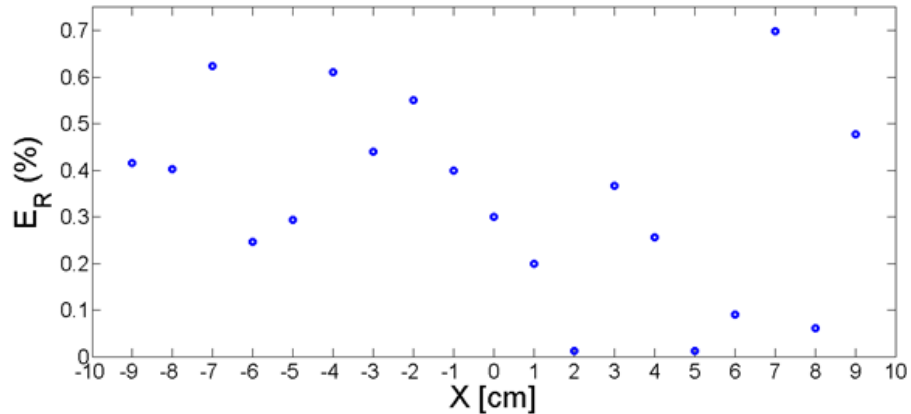


Figura 3.5: Gráfico de error relativo porcentual vs la posición a lo largo del eje X en la barra.

En la figura 3.5, se puede observar que el error relativo porcentual, entre la velocidad de propagación antes y después del recocido a lo largo de la barra no supera el 1 %, por lo que se desprende que la densidad de dislocaciones en la muestra antes y después de este tratamiento se mantiene invariante.

### 3.1.2.2 Mediciones de velocidad en dirección del eje Y.

Se realizan mediciones de tiempo de vuelo a partir de 3 cm del centro de la barra, ya que por la geometría resultante ante la deformación, impide el correcto contacto entre el transductor y la muestra, por la curvatura que presenta éste último.

La velocidad de propagación después de la flexión es contrastada con la velocidad de la muestra antes de deformar, en la figura 3.6.

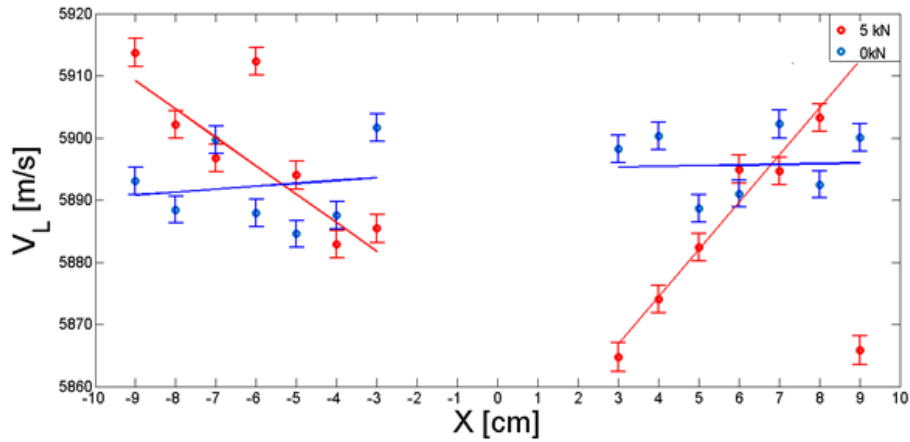


Figura 3.6: Gráfico de velocidad transversal vs posición en dirección Y para ensayo de flexión. La curva en azul representa los valores de velocidad para la barra sin flectar y la curva en rojo representa los valores de velocidad una vez que la barra ha sido flectada a 5 kN.

Para la velocidad longitudinal en dirección Y, se obtiene que la curva para la barra en su estado inicial (figura 20, curva azul) presenta una agrupación de datos que se distribuyen en promedio entre 5890 m/s y 5900 m/s, acercándose más bien a una distribución constante en el eje X; mientras que para la gráfica que representa a la muestra después de flectar (figura 20, curva roja), si bien no hay una diferencia sustancial de valores entre ambas curvas, sí es posible reconocer que una vez flectada la barra los valores se reorganizan de manera descendente desde los extremos hacia el centro de la gráfica, que representa donde se realiza la carga y es en esta última zona donde se concentra la mayor deformación, lo que implica un alza en la densidad de dislocaciones en este lugar y que se ve reflejado en el descenso de la velocidad, tal como lo indica la teoría en la ecuación 1.1.

Para la velocidad transversal en dirección Y a lo largo de la barra se obtiene la gráfica de la figura ??.

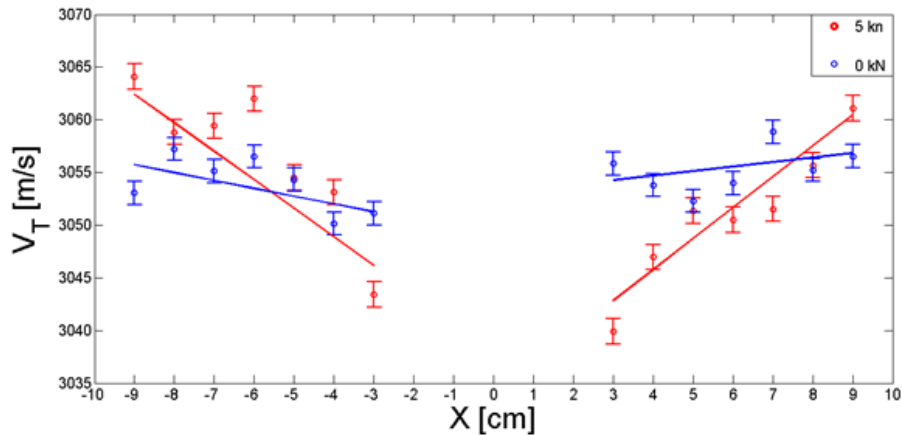


Figura 3.7: Gráfico de velocidad transversal vs posición en dirección Y para ensayo de flexión. La curva en azul representa los valores de velocidad para la barra sin flectar y la curva en rojo representa los valores de velocidad una vez que la barra ha sido flectada a 5 kN.

Para la velocidad transversal a lo largo de la barra en dirección Y, se obtiene que la curva de valores para la barra sin flectar (figura 3.7, gráfica azul) se distribuye entre 3050 m/s y 3055 m/s, considerando que es una distribución de velocidad constante; mientras que la curva para la barra flectada (figura 3.7, gráfica roja) se presenta una reorganización descendente de los valores para la velocidad desde los extremos hacia el centro de la gráfica, donde el centro de flexión, representado por el centro de la curva, es la zona que presenta mayor deformación ante un aumento en la densidad de dislocaciones, reflejándose en el descenso de la velocidad en dicha zona; comportamiento homólogo a la velocidad longitudinal.

El comportamiento obtenido para la velocidad longitudinal y transversal muestra una coherencia con la teoría. En ambas velocidades se obtiene un comportamiento descendente desde los extremos (menor deformación) hacia el centro de flexión (mayor deformación); por lo que es posible inferir que la velocidad de propagación de la onda se ve afectada ante la proliferación de dislocaciones que ocurre por efecto de la deformación, reflejándose en la disminución de la velocidad. De esta manera, si la velocidad de propagación se ve afectada, en instrumentación se traduce como un elemento de detección para el aumento de la densidad de dislocaciones.

### 3.1.2.3 Amplitud del pulso en función a la posición respecto a la carga.

Los resultados expuestos en el inciso anterior para la velocidad de propagación de onda transversal y longitudinal han dejado claro, primero, que el sistema de medición tiene una

gran sensibilidad ante los cambios de velocidad producto de la deformación con diferencias del orden del 1% entre el máximo y mínimo de una curva. Segundo, es claro el comportamiento de la velocidad en los gráficos 3.6 y 3.7 para onda longitudinal y transversal respectivamente; aproximándose a la zona de mayor deformación es claro que la velocidad disminuye, coherente con la teoría expuesta en las ecuaciones 1.1 y 1.2 ante la proliferación de dislocaciones.

Ahora, a medida que se avanza hacia la zona de carga la geometría que adquiere la barra se convierte en un obstáculo para una buena implementación experimental, ya que la superficie de contacto con los transductores tiende a curvarse, obstaculizando el contacto total entre la muestra y las sondas influyendo en la energía recibida. Ante esta situación experimental se genera la interrogante ¿cuál es la zona más apropiada para monitorear in situ un material en servicio bajo flexión?, teniendo en cuenta que el última punto de medición presenta el problema expuesto de contacto sonda-muestra pero a su vez presenta la mayor disminución de velocidad respecto al punto de menor deformación, es lo que se pretende definir en el siguiente estudio.

Para los transductores la frecuencia es un parámetro que se mantiene constante durante todo el desarrollo experimental en la onda emitida y recibida, no así la amplitud de la onda, la que varía en función a la deformación. Así, se procede a analizar las envolventes de la señal recibida para onda longitudinal (extendiendo análisis para onda transversal) en 4 puntos; a 8, 7, 4 y 3 cm respecto al centro de carga aplicada de 5 kN, obteniendo información desde una zona con casi nula hasta la máxima deformación medible experimentalmente.

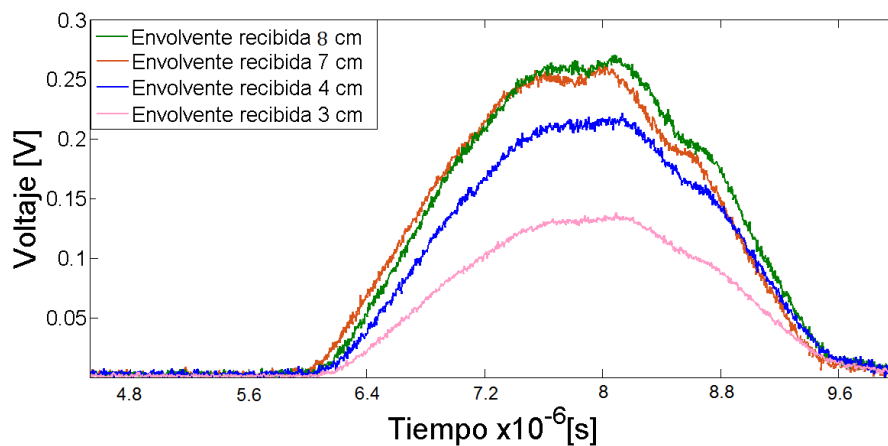


Figura 3.8: Gráfico de Voltaje vs tiempo en onda longitudinal para las señales recibidas a 8, 7, 4 y 4 [cm].

En la figura 3.8, el voltaje máximo para las envolvente de la señal recibida a 8, 7, 4 y 3 cm de la carga, están en el orden de 0.27, 0.26, 0.22 y 0.14 [V] respectivamente. Entre la posición 8 y

7 cm la amplitud de la onda se mantiene más bien constante, coherente con la nula deformación sufrida por esta zona por lo que no hay pérdida de energía en la propagación. El A 4 cm desde el centro, además de ser una zona con una importante deformación, presenta contacto total entre muestra y sondas. La velocidad en este punto es considerablemente menor dentro de la curva en la gráfica 3.6 en  $v_L$  y 3.7 en  $v_T$  respecto a los extremos de la barra. Analizando la intensidad de la onda, la pérdida de energía es de un 14 % , considerando que en esta locación el contacto sonda y muestra es correcto, el principal agente que contribuye a la pérdida de energía es la proliferación de dislocaciones en el sistema ante la deformación sufrida por la flexión.

Finalmente a 3 cm desde el centro de la barra, en la gráfica 3.8, corresponde a la curva con menor amplitud presentando una disminución del 46 % respecto a la zona menos deformada dentro del análisis realizado. En esta locación la contribución de pérdida de energía no tan sólo tiene como posible protagonista a la proliferación de dislocaciones, sino que también al contacto imparcial que existe entre los transductores y la muestra, dejando cierta incertidumbre si esta zona es o no la apropiada para un monitoreo in situ.

Se dejando como estudio posterior el determinar quién es el responsable más importante ante los resultados expuestos para amplitud de la onda.

Sin embargo considerando que el protocolo experimental se basa en el contacto de los transductores con la barra para obtener adquirir los datos experimentales, el punto a 4 cm del centro se considera el más óptimo para un monitoreo in situ ya que en esta zona también hay una deformación considerable y el contacto entre las sondas y la barra es total. También se evidencia la tendencia descendente de ambas velocidades (L y T) en los gráficos 3.6 y 3.7 hasta este punto de la barra. Así se considera que esta es la locación más confiable para medir y predecir la fatiga en un material bajo flexión.

## **Capítulo 4**

### **Conclusiones.**

## **4.1 Conclusiones.**

### **4.1.1 Conclusiones para la velocidad de propagación en el eje Z.**

El objetivo principal de este trabajo de tesis es encontrar un punto de medición adecuado que presente la mayor capacidad de detectar variación en la densidad de dislocaciones a través del comportamiento de la velocidad, para un posterior monitoreo in situ y poder establecer una nueva técnica alternativa a las más utilizadas. Así, el objetivo es estudiar la distribución de velocidad de propagación de la onda longitudinal y transversal realizadas en la dirección Z, donde la distribución de la zona de medición consiste en tres líneas a lo largo de la barra; L1, L2 y L3, donde la primera línea está bajo tracción, la segunda es una transición hasta llegar a L3 que se encuentra bajo compresión.

Para la figura 3.1 y 3.2 para velocidad longitudinal y transversal respectivamente, lo primero que se obtiene es que el sistema de medición implementado presenta una alta sensibilidad detectando cambios entre L1-L3 con respecto a L2 del orden del 1%. Pero dentro de los mismos resultados aparece una contradicción en el comportamiento entre L1-L3 y L2, para onda longitudinal las primeras dos líneas de estudio presentan una velocidad visiblemente mayor dentro de la curva que L2, caso contrario sucede con la onda transversal. Por otro lado, las mediciones realizadas en L1 y L3 presentan problemas experimentales basados en el transductor, ya que el campo cercano logra ser detectado por el transductor receptor, interfiriendo con la correcta información del lóbulo principal del receptor. Por lo tanto ante estos resultados los que son algo confusos, se decide recocer una segunda barra de estudio para amenizar los posibles defectos iniciales que haya en la probeta, pero los resultados de la figura 3.3, muestran el mismo comportamiento obtenido antes del recocido. Es ante estos resultados que no entregan conclusiones coherentes que se cambia la dirección de medición a Y.

### **4.1.2 Conclusiones para la velocidad de propagación en el eje Y.**

La velocidad de propagación tanto para onda longitudinal y transversal en la dirección de medición Y, en las figuras 3.4 y 3.5 respectivamente, se obtiene que la curva desciende a medida que las mediciones se realizan cerca del centro de flexión. De esta manera el método de medición implementado es apropiado para monitorear el cambio de velocidad en función de la deformación sufrida en flexión.

Por otro lado ante el análisis de la amplitud de la señal a través de la envolvente del pulso, para una distancia de 8, 7, 4 y 3 cm desde el centro de la barra, en las primeras distancias la

diferencia de energía entre ambos puntos se acerca al cero, este hecho se debe ya que en la zona la deformación es casi nula. En el caso del punto a 4 cm del centro la pérdida de energía es de un 14 %, coherente con la deformación sufrida en esta zona. Para el caso de 3 cm del centro la pérdida de energía alcanza un 46 % lo que parece coherente por la deformación sufrida en la zona, lo que conduce a un aumento en la densidad de dislocaciones; pero también cabe destacar en este punto que el contacto entre los transductores y la muestra es parcial, por lo que la disminución de energía no tan sólo tiene como causa al aumento de defectos en la zona.

Ante estos resultados, considerando que el sistema de medición se basa en el correcto contacto entre las sondas y la barra, en el último punto de medición posible de medir experimentalmente, a 3 cm del centro, no se considera la opción más óptima para un monitoreo in situ, ya que las condiciones experimentales cambiarían a medida de la deformación, precisamente el contacto transductor-muestra. Es por este motivo, que para un monitoreo in situ se sugiere que la medición sea a 4 cm del centro de la muestra, ya que en todo el proceso de deformación el contacto se mantiene constante y también el cambio de velocidad es registrado por el sistema experimental utilizado.

Finalmente, en este trabajo experimental se concluye principalmente que el objetivo de encontrar un punto óptimo para monitorear un ensayo de flexión in situ se cumple, teniendo como resultado que la zona a monitorear corresponde a 4 cm del centro de flexión en dirección Y, con un sistema de medición implementado que refleja una alta sensibilidad en los resultados obtenidos.

Antes estos resultados totalmente concluyentes se procede a idear y analizar una aplicación para la ingeniería moderna.



## **Capítulo 5**

# **Aplicación en la Ingeniería.**

## 5.1 Aplicación en la Ingeniería.

La velocidad de propagación de la onda, método implementado en este trabajo de tesis para la predicción de la falla de un material en servicio; dado que es afectado por la proliferación de dislocaciones en un metal tiene potencial en diferenciar la deformación elástica de la plástica.

En la construcción de estructuras que soportan cargas, es posible determinar en qué zona se concentran los esfuerzos mediante análisis mecánicos estructurales. Por lo tanto, es necesario monitorear el estado mecánico en la zona de estudio en la estructura, siendo posible medir la deformación mediante un sensor inductivo de distancia, lo que proveerá información de la deformación, pero no sobre el tipo de ésta. Así, mediante la técnica explorada en este trabajo de tesis, la velocidad de propagación se utilizaría como herramienta para determinar si la deformación sufrida por un material es plástica.

Así, esta técnica podría proveer información vital para el monitoreo de las zonas críticas de estructuras sometidas a cargas, especialmente en el modo flexión, debido a que es un estándar en la ingeniería estructural. A través del procedimiento experimental realizado es posible proponer una estructura a nivel ingenieril en edificaciones que contengan materiales bajo tracción o flexión.

Una de las consideraciones importante a nivel experimental es mantener el nivel de presión entre los transductores a utilizar y la estructura, es por esto que se propone un cilindro hidráulico el que es fijado para mantenerse a cierta presión, de esta manera, ante la deformación del material en el proceso puede ensancharse o adelgazar, por lo que la bomba debe reajustar su sistema para mantener el nivel de presión en los transductores, asegurando que la adquisición del tiempo de vuelo se realice en las mismas condiciones en todo momento.

Por otro lado una segunda variable necesaria para determinar la propagación de la onda es el cambio de geometría sufrida en el sistema, siendo adquirida por sensores inductivos, la elección de ellos debe ser a partir de la deformación presenta en el sistema, con sensibilidad en el orden de la micra según los resultados obtenidos. Los sensores medirían la deformación a partir del movimiento que sufren los transductores por efecto de la deformación. Es por esto que se realiza un esquema para una estructura aplicada a la ingeniería.

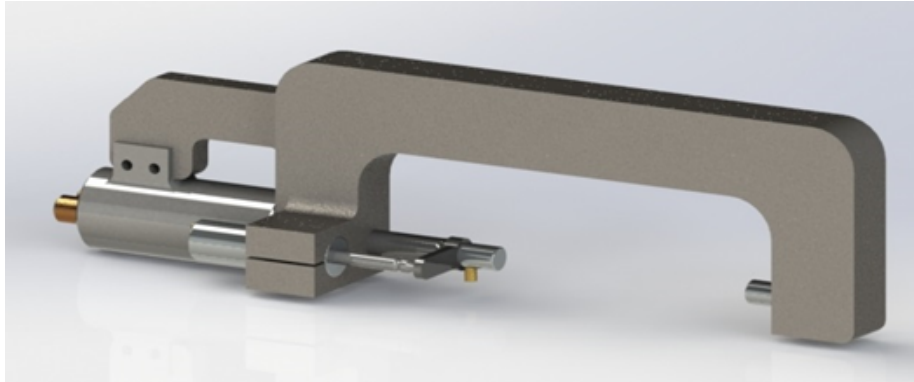


Figura 5.1: Proposición de estructura de medición para la velocidad de propagación con el fin de predecir la falla en el material.

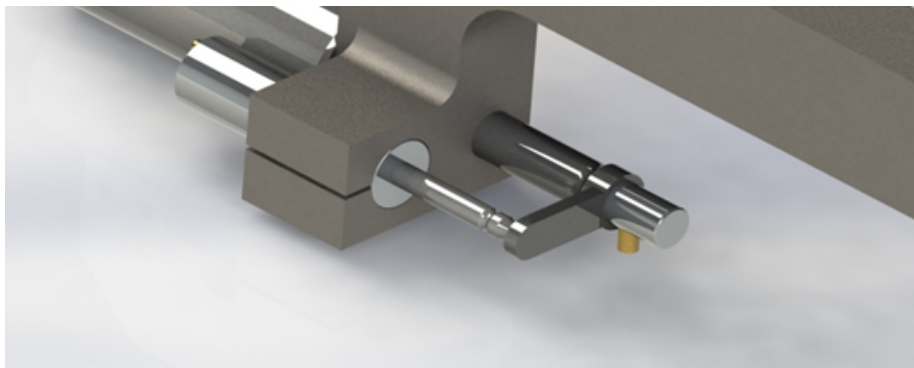


Figura 5.2: Zoom a la estructura en el sensor inductivo y el transductor. Donde se aprecia que el sensor de desplazamiento se ve afectado ante el movimiento que pueda sufrir los transductores producto de la deformación en la estructura de estudio.

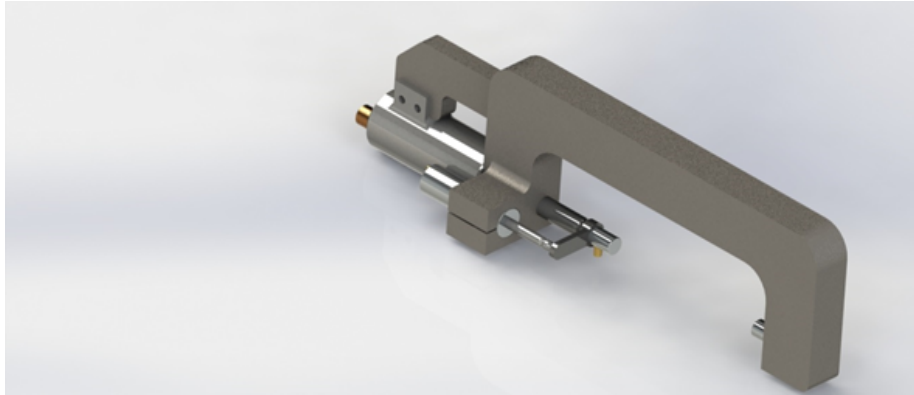


Figura 5.3: Visión del modelo propuesto, donde se diferencia en la parte izquierda el cilindro hidráulico y en el interior de la relación de medición entre el sensor de movimiento y el transductor.

# Bibliografía

- [1] Defectos en sólidos cristalinos. defectos puntuales, defectos lineales y defectos superficiales. departamento de ciencia de los materiales, universidad simon bolivar. venezuela. *Presentación MT-1113*.
- [2] William D. Callister Jr. Introduccion a la ciencia e ingenieria de los materiales. capitulo 4: Subseccion 4.4: Dislocaciones. defectos de linea. figura 4.3, pagina 77. *Editorial Reverte, S.A., 2000*.
- [3] Vicente Salinas Claudio Aguilar Rodrigo Espinoza Fernando Lund y Nicolas Mujica. In situ monitoring of dislocation proliferation during plastic deformation using ultrasound. *International Journal of Plasticity, 2017*.
- [4] William D. Callister Jr. Introduccion a la ciencia e ingenieria de los materiales. *Editorial Reverte, S.A., 2000*.
- [5] Nicolas Mujica Maria Teresa Cerda Rodrigo Espinoza Judit Lisoni y Fernando Lund. Ultrasound as a probe of dislocation density in aluminium. *Acta Materialia, 2012*.
- [6] Agnes Maurel Vicent Pagneux Felipe Barra y Fernando Lund. Interaction between an elastic wave and a single pinned dislocation. *The American Physical Society, 2005*.
- [7] Felipe Barra Andres Caru Maria Teresa Cerca Rodrigo Espinoza Alejandro Jara Fernando Lund y Nicolas Mujica. Measuring dislocation density in aluminum with resonant ultrasound spectroscopy. *International Journal of Bifurcation and Chaos., 2009*.
- [8] Ricardo Casali Maria Caravaca Carolina Acevedo Julio C. Miño Marcela Bizzotto Roberto Torra. Prediccion de la resistencia a la compresion y determinacion de propiedades estructurales a partir de ensayos no destructivos. *Asociacion Argentina de ensayos no destructivos y estructurales., 2007*.

- [9] Observations on the definition of yield stress, *actamech.* 196, 239–244, (2008).
- [10] Landau y Lifshitz. *Teoria de la elasticidad. Volumen 7, edicion 1, editorial Reverte, S.A., 1994.*
- [11] Olympus ndt: Ultrasonic transducers for nondestructive testing.
- [12] Ndt resource center: Acoustic properties for metals in solid form: [www.nde-ed.org](http://www.nde-ed.org).