

Curvas de dispersión aplicadas a la propagación de ondas guiadas en estructuras de sección circular hueca

Dispersion curves applied to the propagation of guided waves in structures of hollow circular section

Gonzalo Díaz¹, María Emilia Castelló¹, Marcos Amado¹, Javier Idzi¹, Fernando Gutierrez¹, Eduardo B. Groth²

1. UIDET Ingeniería Aplicada en Mecánica y Electromecánica (IAME), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 48 y 116, La Plata (B1900TAG), Argentina.
2. Laboratório de Metalurgia Física LAMEF, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Paulo Gama, 110 - Bairro Farrupilha - Porto Alegre - Rio Grande do Sul, Brasil.

E-mail: gonzalo.diaz@ing.unlp.edu.ar

Resumen

El uso de estructuras tubulares largas, como cañerías de transmisión de fluidos o soporte estructural (área civil), son habituales en muchas industrias (petroleras, petroquímicas, plantas de energía). Estas estructuras deben garantizar fiabilidad y ausencia de defectos, necesitando un método de inspección adecuado para asegurarlo.

Su inspección, empleando ensayos no destructivos convencionales es costosa, difícil y a veces imposible por la longitud, inaccesibilidad a las estructuras completas y dependencia de la evaluación exacta de los defectos; motivo por el cual muchos investigadores consideran el uso de ondas guiadas como método de inspección porque permite utilizar ondas con diferentes propiedades para la detección de defectos.

Estas ondas proporcionan una solución atractiva a este problema porque pueden excitarse en un lugar de la estructura y propagarse a muchos metros. Sin embargo, este método se dificulta por la presencia de muchos modos de onda posibles, siendo la mayoría dispersivos.

En el presente trabajo se estudian las características de propagación de ondas guiadas en estructuras metálicas de sección circular hueca, calculando las curvas de dispersión obtenidas por dos metodologías de trabajo empleando elementos finitos, obteniéndose curvas de dispersión para una sección cilíndrica.

Palabras clave: Ondas guiadas, ensayo no destructivo, curvas de dispersión.

Abstract

The use of long tubular structures, such as fluid transmission pipes or structural support (civil area), are common in many industries (oil, petrochemical, power plants). These structures must guarantee reliability and absence of defects, requiring an adequate inspection method to ensure this.

Its inspection, using conventional non-destructive tests, is expensive, difficult and sometimes impossible due to its length, inaccessibility to complete structures and dependence on the exact evaluation of defects; This is why many researchers consider the use of guided waves as an inspection method because it allows the use of waves with different properties for the detection of defects.

These waves provide an attractive solution to this problem because they can be excited in one place in the structure and travel many meters. However, this method is made difficult by the presence of many possible wave modes, the majority being dispersive.

In the present work, the characteristics of guided wave propagation in metallic structures of hollow circular section are studied, calculating the dispersion curves obtained by two work methodologies using finite elements, obtaining dispersion curves for a cylindrical section.

Keywords: Guided waves, nondestructive testing, dispersion curves.

1. Introducción

El área estructural de la ingeniería tiene como foco el diseño y concepción de estructuras que no colapsen, presentando buen desempeño a lo largo de su vida útil sin fallar abruptamente. No siempre es posible estimar la vida de las estructuras reales, debido a una gran cantidad de factores, como la homogeneidad de las propiedades de los materiales utilizados en la construcción y severidad de las acciones actuantes, entre otros, que hacen que sea compleja la estimación de vida estructural. Es por ello que el desarrollo de métodos que revelen la situación de la integridad estructural son de fundamental importancia, razón por la cual se justifica la enorme inversión realizada en la ingeniería moderna en el desarrollo de técnicas de evaluación y monitoreo de las estructuras sin producción de daño de la misma, los llamados ensayos no destructivos (END).

Dentro de los END se encuentran los ensayos por ultrasonido, basados en la medición de la propagación de ondas acústicas en el medio que constituye la pieza a analizar. Las ondas transportan energía en cuanto se propagan por un medio, cuando este medio es físico (no vacío) y la onda a propagar lo deforma, el fenómeno es conocido como acústica, rama de la física que estudia el sonido que no necesariamente es el audible por el hombre.

Estos, son de utilidad para identificar la presencia de posibles discontinuidades en la pieza tanto superficiales como internas y utilizan la reflexión de las ondas que, en función de su comportamiento, podrán detectar la presencia de las discontinuidades y su ubicación.

En estructuras donde una de sus dimensiones es mucho más grande que las otras dos es común la propagación de las llamadas ondas guiadas, teniendo buena relación costo-beneficio debido a la simplicidad y rapidez de inspección. La comparación entre la forma convencional de realizar inspecciones con la utilización de ondas guiadas se muestra en la Figura 1. Las ondas guiadas cubren la totalidad del espesor de la estructura en una distancia mucho mayor comparándola con el área de cobertura localizada de la inspección convencional. Esta metodología permite localizar daños en estructuras inaccesibles (sumergidas, enterradas o aisladas) debido a que solo se requiere una pequeña área de acceso cuando se aplica una vibración que se extenderá como una onda guiada (Rose, 2014). En este caso es posible, con un mismo sensor emisor receptor, obtener información de defectos localizados a distancias considerables en estructuras de acero de difícil acceso (de hasta 100 metros dependiendo el material).

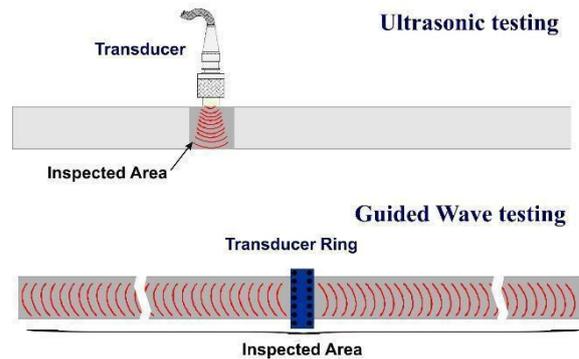


Figura 1. Comparación entre inspección por ultrasonido convencional y de ondas guiadas.

Para el caso de las ondas guiadas que viajan en sólidos, los límites interactúan de una manera muy especial para que se puedan satisfacer las condiciones de borde. Los límites podrían ser la superficie de una estructura de gran espesor donde la estructura se considera como medio, espacio o medio infinito. En este caso, las ondas superficiales de Rayleigh (tipo de onda acústica superficial que viaja a lo largo de la superficie de los sólidos) pueden propagarse sobre la superficie de una placa, por ejemplo, o sobre cualquier estructura donde la frecuencia es tal que la longitud de onda es muy pequeña en comparación con el grosor de la estructura.

Asimismo, las ondas guiadas pueden propagarse en diferentes tipos de estructuras: placas delgadas, varillas, caños y estructuras de varias capas. A medida que las ondas se propagan de un lado a otro, se produce una conversión de modo, por lo que cada vez que se encuentra una interfaz, tanto las ondas longitudinales como las de corte (ondas P y S) se reflejan y/o se refractan como en el caso de los medios de varias capas.

Estructuras tubulares, rieles, recipientes sometidos a presión, y tanques son algunos ejemplos de tipologías estructurales en las que se presenta el característico fenómeno de propagación de ondas en la dirección de las mayores dimensiones. En estos casos el fenómeno de dispersión se caracteriza por la propagación de ondas elásticas que viajan en direcciones longitudinales. Para su estudio resulta fundamental la utilización de las curvas de dispersión que dependen de las dimensiones finitas de la estructura estudiada. Pocas soluciones analíticas que permiten la construcción de estas curvas están disponibles destacándose la propuesta por Lamb para placas (Auld, 1973).

Una eventual discontinuidad en la estructura generaría una interacción que dependerá de las condiciones geométricas y del modo de propagación presente en ese medio. De esta manera, el estudio de los modos en que las ondas elásticas se propagan

puede determinar para cada situación una forma eficiente de caracterizar las discontinuidades presentes en la estructura analizada.

La utilización de las curvas de dispersión permite entender cómo una determinada perturbación que tiene una función temporal y espacial específica se polariza en ondas modales que viajan a velocidades diferentes las cuales producen el fenómeno de dispersión. Estudiar la propagación de ondas sobre una determinada guía de onda con geometría específica utilizando las curvas de dispersión permite entender que frecuencias y modos pueden polarizar.

De esta manera se puede determinar que en perfiles con forma tubular inducir cierto tipo de ondas permite generar perturbaciones que propagan grandes distancias con una baja dispersión o procurar ondas que tengan sus componentes modales mayores en el interior de la guía disminuyendo así el amortiguamiento debido al poder disipativo del revestimiento o contactos con el medio ambiente. Son los anteriores solo algunos ejemplos del tipo de información que la correcta utilización de las curvas de dispersión permite obtener como resultado.

En el caso de la aplicación de la técnica de emisión acústica (Groose y Ohtsu 2009) la perturbación asociada a ruptura es compleja y mucha información puede ser extraída de ella. En el caso de estructuras laminares estas ondas viajan en las direcciones longitudinales y el fenómeno de dispersión permite que la emisión emanada durante la ruptura interna se polarice y disperse siendo posible así interpretar mejor la información incluida en ella.

Existen diversos métodos numéricos para la construcción de curvas de dispersión para una geometría específica. Asimismo, es posible realizar la simulación de una onda propagando una guía de ondas, utilizando elementos finitos para su discretización espacial y algún esquema explícito de integración para resolver el problema en el dominio del tiempo. Registrando información en una región espacial del modelo durante un lapso de tiempo es posible identificar si la dispersión de la excitación aplicada responde a lo predicho por las curvas de dispersión asociadas a la guía de onda estudiada.

En este trabajo se estudiarán los conceptos teóricos relacionados a la propagación de onda guiada en caños metálicos mediante el análisis de curvas de dispersión estudiando su aplicación en métodos de detección temprana de fallas.

Las metodologías de cálculo para hallar las curvas de dispersión consisten en la aplicación de dos modelos diferentes, el modelo axisimétrico y el modelo por condiciones periódicas. Estos modelos se analizan en detalle en la siguiente sección.

2. Materiales y métodos

Materiales y geometría

La selección de materiales para su aplicación en la construcción o fabricación de tubos y caños, es un proceso que requiere ciertas consideraciones de las características del material apropiado para el servicio requerido.

Además, debe considerarse el entorno operativo que rodea la cañería o el componente de la cañería. La degradación de las propiedades del material o la pérdida de una sección transversal efectiva de carga puede ocurrir a través de la corrosión, la erosión o una combinación de ambas. La naturaleza de las sustancias que contiene la cañería también es un factor importante.

También se deben tener en cuenta las características de fabricación de los materiales considerados. La capacidad de doblarse o formarse, la idoneidad para soldar u otros métodos de unión, la facilidad de tratamiento térmico y la uniformidad y estabilidad de la microestructura resultante. El proceso de selección debe conducir al material más económico que cumpla con los requisitos de las condiciones de servicio y los códigos y normas que se aplican.

Para los usos mencionados se puede encontrar que la producción de caños y tubos se basa en acero debido a su gran resistencia y alta fiabilidad, particularmente en aceros al carbono y aceros aleados e inoxidables.

Los aceros al carbono representan los 2/3 de todos los materiales usados en cañerías, excepto los aceros de medio y alto contenido de carbono debido a que su alto contenido de carbono dificulta en exceso la soldabilidad del material.

Desde el punto de vista económico, no es conveniente usar aceros aleados para prolongar la vida de las cañerías, debido a que las instalaciones industriales tienen una duración limitada y su costo es varias veces mayor que los del acero al carbono.

Método de elementos finitos semianalítico (SAFE)

El método SAFE se ha adoptado para la resolución de problemas de propagación de ondas en guías de ondas de sección compleja. Fue desarrollado como un enfoque alternativo a los métodos tradicionales, como el método de matriz global, debido, principalmente, a sus beneficios de resolver problemas arbitrarios de guía de onda de sección transversal (Hayashi, Song y Rose, 2003).

En este método, la guía de onda se discretiza en la sección transversal, mientras que se adopta una solución analítica en la dirección de propagación de

la onda. Basado en un esquema de variaciones, se puede construir un sistema de ecuaciones lineales con la frecuencia y el número de onda como incógnitas, las que pueden resolverse utilizando rutinas estándar de valores propios. De esta manera, se pueden resolver problemas de propagación de ondas en guías de ondas con secciones transversales complejas como, por ejemplo, laminados multicapa y rieles (Gavric, 1995; Hayashi, Song y Rose, 2003), donde frecuentemente es difícil obtener soluciones analíticas.

Para las guías de onda que son infinitamente largas en una dimensión, el método SAFE es superior al método por elementos finitos (FEM) puro en el que se utilizan representaciones analíticas exactas para una o dos dimensiones de la guía de onda, reduciéndose el costo computacional.

El método semianalítico también es ventajoso en comparación con los métodos de matriz analítica, es menos propenso a la falta de raíces en el desarrollo de las curvas de dispersión. El empleo temprano de este método en la resolución de problemas de propagación de ondas guiadas se puede encontrar en el trabajo Dong et al. (1972), donde se observa su utilización en el análisis de modos de onda en un codo de tubería (Hayashi et al., 2004) y en materiales con propiedades viscoelásticas (Bartoli et al., 2006; Matt et al., 2005).

Modelo axisimétrico

El modelo axisimétrico para el cálculo de curvas de dispersión consiste en modelar una guía de ondas a través de un aro de gran radio (Figura 2), en la cual la sección transversal bajo estudio es la sección transversal del aro ($R > 10L$, siendo R el radio adoptado y L una dimensión característica de la sección transversal estudiada).

El aro consiste en un sólido de revolución que, bajo condiciones de contorno de simetría axial, puede resolverse mediante el empleo de un modelo constituido por elementos finitos axisimétricos (Boeraeve, 2010).

En el análisis modal de modelos de esta naturaleza, los paquetes de simulación ofrecen una forma de establecer cuántos nodos y antinodos pueden tener los modos encontrados en el análisis, y cómo aplicar una restricción a los desplazamientos de la sección transversal periódicamente.

En el caso del aro estudiado, la restricción de los desplazamientos perpendiculares a la sección transversal genera los antinodos y la restricción a los desplazamientos paralelos genera los nodos.

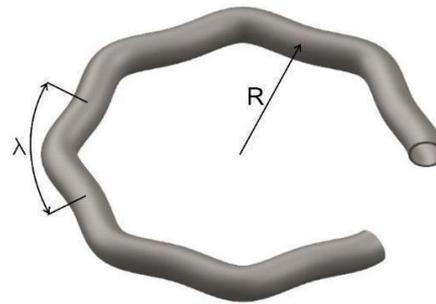


Figura 2. Esquema del método SAFE axisimétrico.

Los softwares comerciales de elementos finitos, que ofrecen un análisis modal a través del modelo axisimétrico, usualmente permiten la entrada de las condiciones de contorno descritas a través de un comando. Este comando, preestablece una cantidad de longitudes de onda λ para las cuales el modelo está sujeto a vibrar.

La cantidad de longitudes de onda son fijadas a través de un parámetro conocido como C_{order} (Celga, 2008). Por consiguiente, resulta de importancia determinar este parámetro, que representa el número por el cual debemos dividir a la longitud de la circunferencia del modelo axisimétrico analizado, para poder determinar la longitud de onda λ definida como:

$$\lambda = (2 \cdot \pi \cdot R) / C_{order} \quad (1)$$

$$\lambda = (2 \cdot \pi) / k \quad (2)$$

De las ecuaciones 1 y 2 es posible establecer una relación entre el parámetro C_{order} y el número de onda k de la siguiente manera:

$$C_{order} = k \cdot R \quad (3)$$

Para la obtención de las curvas de dispersión utilizando el modelo axisimétrico, debe hacerse un barrido para las longitudes de onda de interés. El número de onda se puede modificar variando el valor de C_{order} (o de R), es decir que, los valores de λ y k varían para cada nuevo valor de C_{order} . Por consiguiente, el análisis modal calculará un conjunto de frecuencias naturales donde cada una de ellas pertenece a un modo que se propaga por la guía de ondas en estudio.

Se realiza un análisis modal con el modelo axisimétrico donde los valores de k se varían dentro de los requeridos para el estudio y se fija el valor del radio (R) de la simetría axial, de dimensiones mayores que las dimensiones de la sección transversal ($R > 10L$). De este análisis, se obtienen los valores de las frecuencias naturales de la estructura para cada valor de C_{order} , a partir de la cual se obtendrán los puntos para cada valor de k de la curva de dispersión.

Una vez obtenidos los puntos provenientes del estudio modal para cada valor de k , se los grafica obteniendo, de esta manera, una nube de puntos que generarán las curvas de dispersión.

Para el cálculo de la sección, se utiliza el elemento PLANE83 (Figura 3) que permite automatizar el proceso de formación de las curvas de dispersión (Idzi, 2017). Este elemento, está definido por cuatro nodos que tienen tres grados de libertad cada uno: trasladados en las direcciones x , y , y z nodal. En el caso de coordenadas nodales sin rotar, estas direcciones corresponden a las direcciones tangencial, radial y axial.

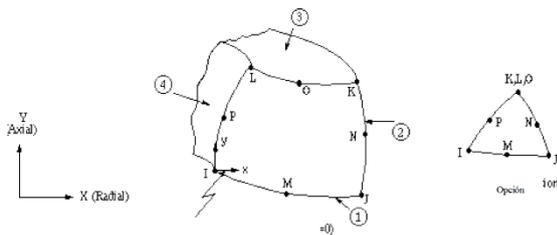


Figura 3. Elemento PLANE83, utilizado en modelo axisimétrico para el cálculo de las curvas de dispersión del caño en estudio (ANSYS®, 2009).

Modelo de elementos finitos tridimensional considerando condiciones periódicas

Este método consiste en modelar una porción de la guía de onda en elementos finitos, como se muestra en la Figura 4, donde sobre las caras A y B son aplicadas las condiciones de contorno periódicas.

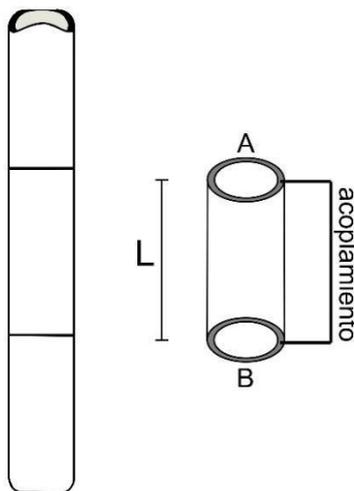


Figura 4. Porción de la guía de ondas utilizada en la elaboración del modelo de longitud L , mostrando en detalle las caras A y B, sobre las cuales se aplican las condiciones de contorno periódicas.

Estas condiciones de contorno hacen posible el acoplamiento de los desplazamientos de las caras, de modo que la cara A tenga un desplazamiento igual a la cara B, o que los desplazamientos de ambas caras tengan sentido contrario pero el mismo valor absoluto.

Las condiciones de contorno periódicas, son aplicadas en el modelo nodo a nodo de manera que cada nodo de la cara A tenga su respectivo par en la cara B y ambos se encuentran acoplados entre sí.

En el presente trabajo, se utiliza un comando que permite aplicar las condiciones periódicas acoplando los nodos entre sí a través de la ecuación 4,

$$\sum_{i=1}^n (u_{Aj}^i C_A + u_{Bj}^i C_B) = 0 \quad (4)$$

donde u_{Aj}^i y u_{Bj}^i son los desplazamientos de los nodos de las caras A y B en la dirección j , y C_A y C_B son los coeficientes escalares que determinan las características de la restricción.

Si se aplican las condiciones de contorno sobre los desplazamientos de las secciones laterales del modelo, su análisis modal proporciona las frecuencias de vibración, es decir, las frecuencias (imágenes) de las curvas de dispersión. El valor de k es inversamente proporcional a la longitud de onda λ , la cual proviene de la expresión 5,

$$\lambda = L/p \quad (5)$$

donde L es la longitud del modelo y su valor arbitrario puede elegirse convenientemente de acuerdo a la región de las curvas de dispersión de interés, y p es la cantidad de veces que el patrón de deslizamiento, perteneciente al modo, se repite dentro del modelo.

En la práctica, la determinación de p depende de un análisis visual de cada uno de los modos calculados.

El objetivo de este método consiste en, con las condiciones periódicas impuestas, hacer que el modelo imite el comportamiento de una guía de ondas durante el pasaje de una propagación, haciendo posible la generación de las curvas de dispersión de una guía de ondas de cualquier geometría.

Esta metodología, permite visualizar el modo de propagación en un modelo de tres dimensiones, pero presenta la dificultad de automatizar el método.

Con este método se obtuvieron, únicamente, puntos característicos de las curvas de dispersión, para poder

visualizar los modos asociados a las curvas obtenidas con el método basado en el modelo axisimétrico anteriormente explicado.

A continuación, se presentan observaciones adicionales sobre la implementación del método por condiciones periódicas:

Es importante entender, que existe una cierta libertad al escoger la relación entre las condiciones de contorno de las caras A y B. La lógica de esta metodología es, a través de las condiciones de contorno reproducir el desplazamiento producto del pasaje de una perturbación por una guía de ondas y, a través de la selección de las condiciones de contorno dar preferencia a los desplazamientos característicos de un modo u otro.

Inicialmente se puede trabajar con condiciones de contorno libres, pero al calcular los modos de vibración por el análisis modal, aparecerían modos que no pertenecen a la guía de ondas, dificultando la identificación de los mismos, motivo por el cual se aplican condiciones periódicas.

En la Figura 5 se representan, esquemáticamente, los desplazamientos debidos a condiciones de contorno simétricas y antisimétricas (periódicas), aplicadas sobre las caras del modelo.

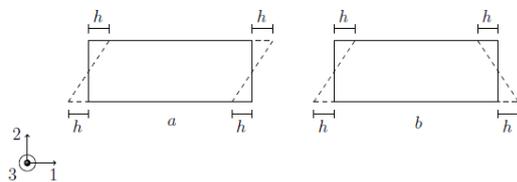


Figura 5. Condiciones de contorno periódicas (a) simétricas y (b) antisimétricas.

Al correr el análisis modal por elementos finitos, se calculan una serie de frecuencias naturales, cada una con su respectivo campo de desplazamientos característico (modo de vibración). Dentro de los modos generados, es posible determinar patrones que se van repitiendo, significando que, a una determinada frecuencia f , el modelo presenta un campo de desplazamientos específico, y a una frecuencia f' ($f > f'$) se obtiene el mismo campo de desplazamientos pero reducido, de manera que el patrón se repite dentro del modelo de tamaño L .

Este fenómeno se repite sucesivamente a medida que se calculan frecuencias mayores durante el análisis modal, los patrones se van repitiendo pero en menor medida. Cada patrón es una curva que representa un modo de propagación, donde las frecuencias en las que aparece el mismo modo pertenecen a la curva.

Curvas de dispersión aplicadas en ensayos no destructivos (END)

La prevención de fallas es muy importante en la industria, además de ser costosa pueden causar enormes daños ambientales y personales. En el área de prevención de fallas se destacan los END, que se utilizan para examinar los defectos en busca de componentes de servicio sin dañarlos. Entre sus diversas técnicas, el más utilizado es el ultrasonido, en el que el uso de ondas guiadas tiene importantes ventajas sobre los END de ultrasonido convencional, donde se propaga una onda mecánica en largas distancias.

Alleyne y Cawley (1996) desarrollaron un sistema basado en un transductor piezoeléctrico de acoplamiento seco para la detección de corrosión, en caños de 3 a 12 in de diámetro, usando ondas cilíndricas de Lamb, utilizando el modo axisimétrico $L(0,2)$ a una frecuencia de aproximadamente 70 kHz. En las curvas de dispersión mostradas en la Figura 6, puede observarse que este modo no presenta un comportamiento dispersivo a ese rango de frecuencia.

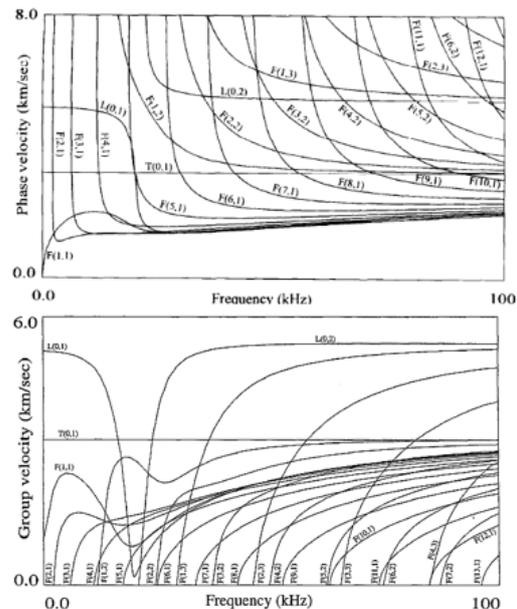


Figura 6. Curvas de dispersión para un caño de 3 in utilizadas por Alleyne y Cawley (1996).

Este método de inspección, proporciona un sistema simple, liviano y fácilmente desmontable para la inspección de grandes distancias de cañería. El inconveniente ocurre que al excitar el modo $L(0,2)$, también se excitan modos no deseados (flexión y altamente dispersivos). En su trabajo, Alleyne y Cawley (1996) llegaron a la conclusión de que, para una óptima inspección por ondas guiadas no solo es necesaria la adecuada lectura de las señales recibidas, sino también la supresión de los modos no deseados producto del ensayo.

3. Resultados y Discusión

Se calcularon las curvas de dispersión de un caño de 3 in de diámetro externo y espesor de pared de 2,225 mm (Figura 7).

En la implementación del método basado en el modelo axisimétrico validado se ha dejado fijo el valor del radio, determinado por los parámetros de cálculo. Para el caso estudiado, $R = 500$ m y los valores de k se variaron entre un valor mínimo de 0,01 rad/m y un valor máximo de 350 rad/m, siendo el intervalo de variación de k de 0,01 rad/m.

Los resultados de las frecuencias encontradas entre las frecuencias máximas y mínimas establecidas para cada valor de k , se grafican en conjunto, permitiendo visualizar las curvas de dispersión.

El contorno del perfil es introducido como output de un archivo neutro, (*.igs). De este modo, a través de este tipo de archivos, se puede importar directamente cualquier perfil que sea requerido para su estudio (Idzi, 2017).

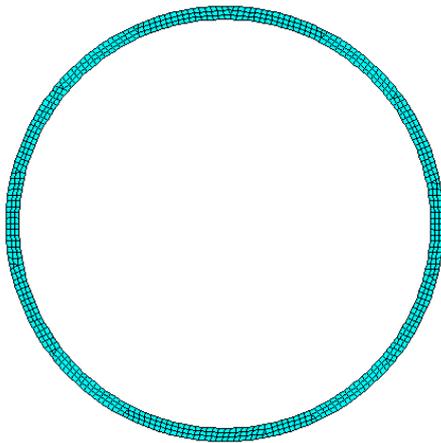


Figura 7. Perfil mallado con el elemento PLANE83.

Los parámetros de cálculo utilizados para la confección de las curvas de dispersión mediante el método axisimétrico se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades y características utilizadas para generar las curvas de dispersión en el perfil del caño

	Valor
Módulo de Young, en N/m ²	2,10 x 10 ¹¹
Coefficiente de Poisson	0,30
Densidad, en N/m ³	7850
Radio de simetría, en m	500
Tamaño característico del elemento, en m	0,001
Cantidad de modos calculados	100
Número de onda mínimo, en rad/m	0,01

Número de onda máximo, en rad/m	350
Intervalo de número de onda, en rad/m	0,01

A partir de los parámetros especificados se construyen las curvas de dispersión para una sección circular hueca de las dimensiones mencionadas. Las curvas obtenidas se muestran en la Figura 8, donde se representa la frecuencia en función del número de onda.

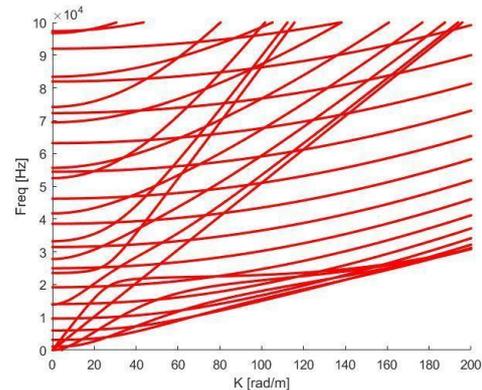


Figura 8. Curvas de dispersión graficadas en frecuencia vs número de onda para la sección estudiada.

A partir de los datos obtenidos, se grafican las curvas representadas por la velocidad de fase en función de la frecuencia (Figura 9), donde cada par de puntos (k, f) se corresponde con un par de valores (C_F, f), siendo C_F la velocidad de propagación en función de la frecuencia para cada uno de los modos que se presentan en la gráfica.

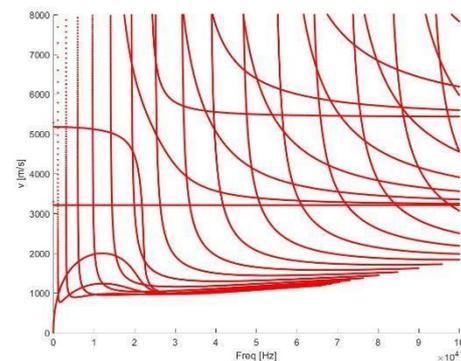


Figura 9. Curvas de dispersión graficadas en velocidad de fase vs frecuencia para la sección estudiada.

Partiendo de los puntos (k, f) obtenidos del método axisimétrico se pueden obtener las gráficas representadas como velocidad de grupo en función de la frecuencia (Figura 10).

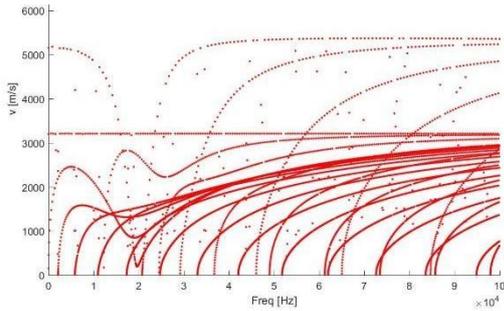


Figura 10. Curvas de dispersión graficadas en velocidad de grupo vs frecuencia para la sección estudiada.

Puede observarse que la velocidad del paquete de ondas está siendo excitada para cada frecuencia.

De lo analizado, se observa que para valores de frecuencia inferiores a los 200 kHz existe un único modo torsional, conocido como T(0,1) y dos modos longitudinales, L(0,1) y L(0,2). Los modos restantes que aparecen en la gráfica se deben a modos de flexión que tienden a alguno de los modos longitudinales o torsional.

Una vez confeccionadas las curvas de dispersión a partir del modelo axisimétrico, se analiza la sección estudiada con el modelo tridimensional por condiciones periódicas. En la Figura 11 se presenta, de manera tridimensional, la estructura estudiada, donde se muestra su comportamiento para los puntos (k, f) estudiados.

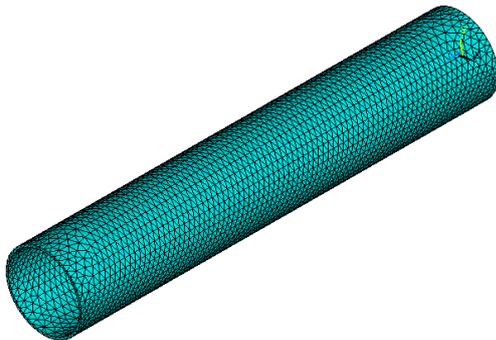


Figura 11. Vista tridimensional del perfil analizado utilizando el método por condiciones periódicas.

En los gráficos anteriores (Figuras 8 a 10) se puede observar la gran cantidad de curvas de dispersión obtenidas para la estructura estudiada.

A continuación, se realiza un estudio para todo el rango (k, f), es decir, k entre 0 y 200 rad/m y f entre 0 y 100 kHz.

El modelo por condiciones periódicas permite obtener las imágenes de los puntos señalados en la

Figura 12, pertenecientes a los modos longitudinales y torsional. La corroboración de esto se muestra en las Figuras 13 a 18, donde se observan las deformaciones de la estructura estudiada.

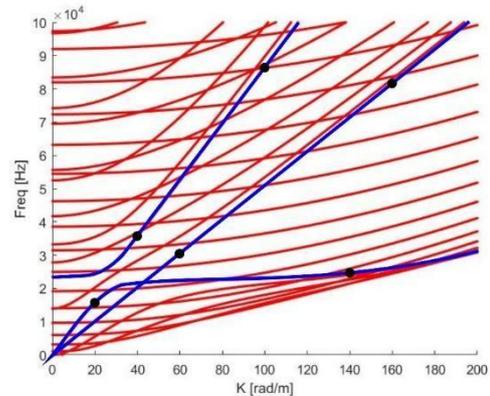


Figura 12. Puntos de control generados por condiciones periódicas.

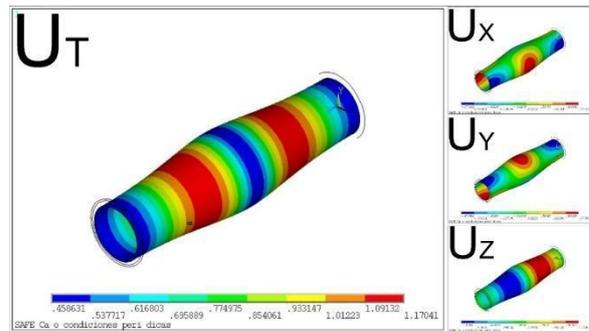


Figura 13. Punto de control por condiciones periódicas modo (k = 20; f = 15,68 kHz).

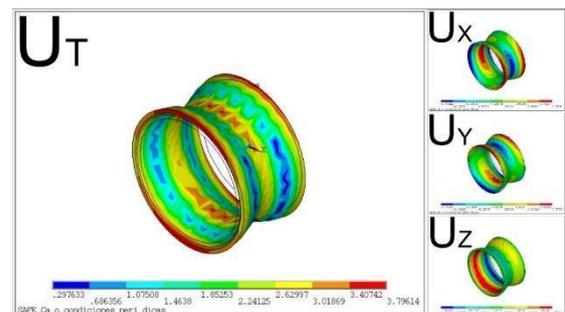


Figura 14. Punto de control por condiciones periódicas modo (k = 140; f = 24,44 kHz).

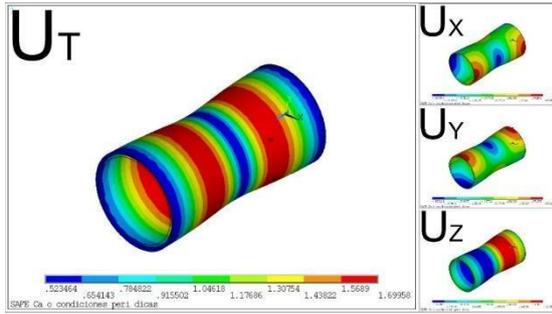


Figura 15. Punto de control por condiciones periódicas modo ($k = 40$; $f = 35,38$ kHz).

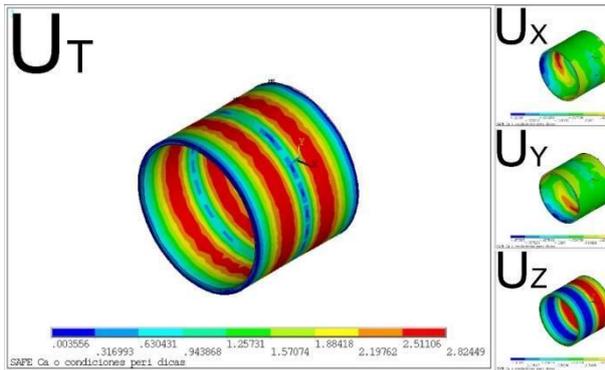


Figura 16. Punto de control por condiciones periódicas modo ($k = 100$; $f = 86,20$ kHz).

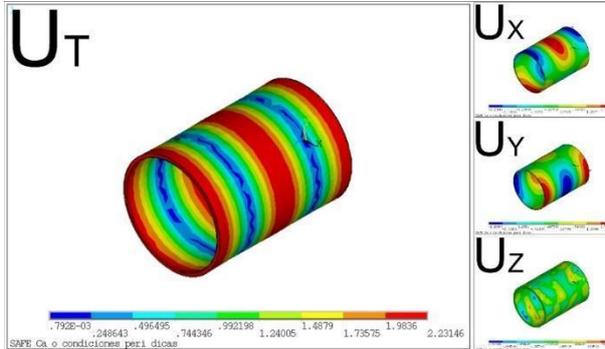


Figura 17. Punto de control por condiciones periódicas modo ($k = 60$; $f = 30,63$ kHz).

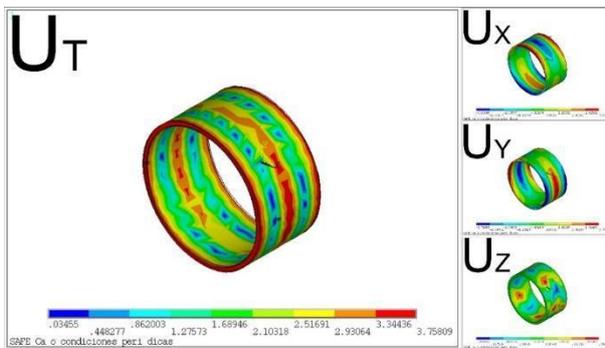


Figura 18. Punto de control por condiciones periódicas modo ($k = 160$; $f = 80,950$ kHz).

De acuerdo a lo analizado anteriormente, se encontraron puntos específicos dentro del rango de la gráfica (k, f) de la Figura 8 que permiten reconocer los modos longitudinales y el modo torsional como se observa en las Figura 19 a Figura 21 en color azul.

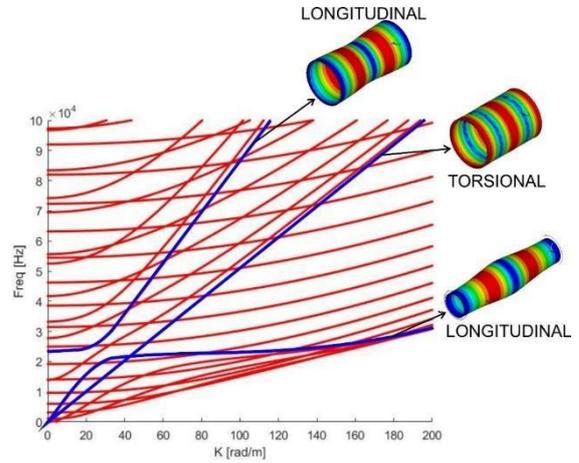


Figura 19. Gráfica (k, f) con los modos de propagación L y T en el caño estudiado.

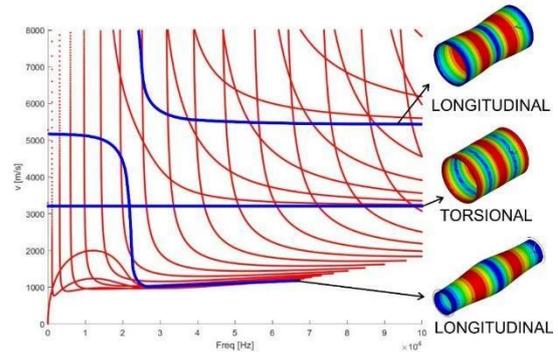


Figura 20. Gráfica (f, C_p) con los modos de propagación L y T en el caño estudiado.

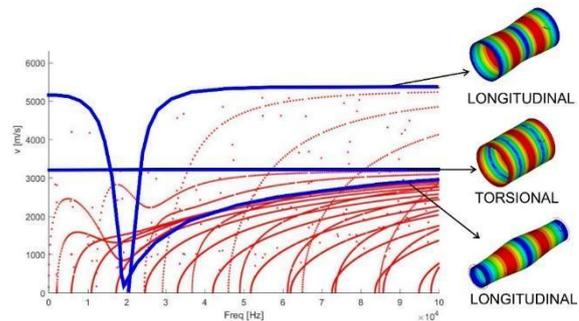


Figura 21. Gráfica (f, C_G) con los modos de propagación L y T en el caño estudiado.

Se puede observar que, ante la necesidad de utilizar ondas guiadas para realizar inspecciones en estructuras cilíndricas, el modo torsional no es dispersivo debido a que su velocidad es constante para todo el rango de frecuencias estudiado, lo que

hace que el procesamiento de los datos recibidos luego de la reflexión y conversión de modo ocurrido en la propagación sea más simple. Esto significa que, definiendo la frecuencia de trabajo al momento de la inspección y la disposición de los transductores, se puede generar una onda puramente torsional que se propaga a lo largo de la estructura con la velocidad correspondiente calculada en las curvas de dispersión. Las señales recibidas generadas en los defectos presentes en la estructura se procesarán de acuerdo al tiempo de arribo, permitiendo estimar la distancia aproximada a la cual se encuentra el defecto.

Se puede observar que, las curvas de dispersión obtenidas, se verifican con las curvas encontradas por Alleyne y Cawley (1996) (Figura 6), quienes también utilizaron una sección circular hueca de 3 pulgadas de diámetro, identificando los modelos longitudinales, de flexión y torsión que se corresponden a lo analizado en el presente trabajo.

4. Conclusiones

Mediante el análisis de los modos presentes en las curvas obtenidas, se logró verificar de manera tridimensional el tipo de excitación que polariza en cada uno de estos modos durante su propagación, pudiendo vincularlos con los modos disponibles en la bibliografía.

La utilización de ondas guiadas como método de inspección es importante debido a su gran utilidad para la predicción de la vida remanente de las estructuras estudiadas, agilizando los tiempos de inspección gracias a su capacidad de ensayar grandes distancias (de acuerdo a las condiciones donde la estructura se encuentre) y brindar datos de posibles defectos y una aproximación de su localización.

El modo torsional es el más útil para realizar una inspección por ondas guiadas, debido a que no es dispersivo para ningún rango de frecuencias visto. Por lo tanto, es primordial el desarrollo de técnicas de inspección en las que este modo pueda ser excitado para su implementación.

Las curvas fueron calculadas con un programa validado para cálculo de curvas de dispersión y verificadas con los resultados de otros autores.

5. Referencias

Alleyne, D. and Cawley, P. (1996). *The excitation of Lamb waves in pipes using dry coupled piezoelectric transducers*. Journal of Nondestructive Evaluation, 15(1), p.11-20.

Ansys, I. (2009). *Programmer's Manual for Mechanical APDL*. Ansys, Inc.

Auld, A. B. (1973) *Acoustic Fields and Waves in Solids*. Vol. I. John Wiley and Sons Inc.

Bartoli, I., Marzani, A., Lanza di Scalea, F., and Viola, E. (2006). *Modeling wave propagation in damped waveguides of arbitrary crosssection*. J. Sound Vib., 295, p 685–707.

Boeraeve, P. (2010). *Introduction to The Finite Element Method*. Institut Gramme. LIEGE.

Cegla, F. B. (2008). *Energy concentration at the center of large aspect ratio rectangular waveguides at high frequencies*. Journal of Acoustical Society of America, vol. 123, p. 4218–4226.

Dong, S. B., & Nelson, R. B. (1972). *On natural vibrations and waves in laminated orthotropic plates*. Journal of applied mechanics, 39(3), 739-745.

Gavrić, L. (1995). *Computation of propagative waves in free rail using a finite element technique*. Journal of Sound and Vibration. 185(3), 531-543.

Grosse, C. U., Ohtsu M. (2008) *Acoustic Emission Testing: Basics for Research - Applications in Civil Engineering*. Springer.

Hayashi, T, Kawashima, K, Rose, J. L. (2004). *Calculation for guided waves in pipes and rails*. Key Engineering Materials Vols 270-273 p 410-415.

Hayashi, T., Song, W, Rose, J. L. (2003). *Guided wave dispersion curves for a bar with an arbitrary crosssection, a rod and rail example*. Ultrasonics Vol. 41 No.3 p 175-183.

Idzi, J. L. (2017). *Estudio Numérico de la Propagación de Ondas Guiadas en Rieles*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Matt, H., Bartoli, I., & Lanza di Scalea, F. (2005). *Ultrasonic guided wave monitoring of composite wing skin-to-spar bonded joints in aerospace structures*. The Journal of the Acoustical Society of America, 118(4), 2240-2252.

Ohtsu & Groose (2009). *The history and development of acoustic emission in concrete engineering*. Magazine of concrete research, 48(177): 321–330

Rose, J. L. (2014). *Ultrasonic Guided Waves in Solid Media*. Vol. I. Cambridge University, Press.