

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDIO NUMÉRICO DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS GUIADAS EN
RIELES FERROVIARIOS

por

Ing. Javier Luis Idzi

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Fevereiro de 2017

APLICACIÓN DE ONDAS GUIADAS EN LA DETERMINACIÓN DE DAÑO EN
ESTRUCTURAS LAMINARES

Javier Luis Idzi

Ingeniero Electromecánico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de:

Mestre em Engenharia

Área de Conhecimento: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Aprovada por:

Prof. Dr. Thomas G. R. Clarke	PPGE3M / UFRGS
Prof. Dr. Tiago Becker	DEMEC / UFRGS
Prof. Dr. Gustavo P. Mezzomo	PPGPPF / UPF
MSc. Eduardo B. Groth	- / UFRGS

Prof. Dr. Jakson M. Vassoler

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 8 de Fevereiro de 2017

AGRADECIMENTOS

Agradezco a la UFRGS y al PROMEC, a mi orientador Ignacio Iturrioz, por todo el esfuerzo puesto en este trabajo, como así también a Boris Nahuel Rojo Tanzi, que colaboró con los cálculos computacionales y a la Ing. María Emilia Castello, por colaborar en la corrección y edición.

RESUMEN

En las últimas décadas técnicas relacionadas con la medición de ondas elásticas han avanzado sensiblemente. Actualmente, con equipamientos relativamente económicos es posible registrar amplitudes y franjas de frecuencia que eran impensables dos décadas atrás. Este hecho ha motivado que tópicos teóricos que hasta hace un tiempo tenían una aplicación cuestionable tengan que ser desarrollados para poder aprovechar las nuevas potencialidades tecnológicas en la obtención de mayor y mejor información experimental. En este contexto, el estudio de la propagación de ondas guiadas en sólidos se presenta como un conocimiento que posibilita detectar daño con eficiencia y economía en una serie de estructuras en las cuales por lo menos una dimensión es mucho mayor que las otras dos. Es el caso de estructuras tubulares, rieles o recipientes sometidos a presión entre otras. En el presente trabajo se estudian las características de propagación de ondas guiadas primeramente una barra rectangular y posteriormente en la geometría de un riel. En ambos casos, fueron calculadas las curvas de dispersión obtenidas ~~en~~ por dos metodologías de trabajo por elementos finitos, la primer metodología fue emplear un cálculo aplicando un modelo axisimétrico, y luego corroborado con un modelo de condiciones periódicas y posteriormente fue simulada la propagación de una onda tipo Toneburst sobre las geometrías analizadas discutiendo cómo dicha onda se dispersa durante su propagación. Los resultados obtenidos fueron las curvas de dispersión de ambas secciones.

Palabras claves: Curvas de dispersión; Ondas guiadas; Ensayos no destructivos; Riel.

ABSTRACT

In recent decades techniques related to the measurement of elastic waves have advanced significantly. It is now possible with relatively inexpensive equipment to record amplitudes and frequency bands that were unthinkable two decades ago. This has led to the development of theoretical topics which application was questionable until not long ago, to profit from new technological potential in obtaining more and better experimental information. In this context the study of the propagation of guided waves in solids is presented as a knowledge that allows to detect damage with efficiency and economy in a number of structures in which at least one dimension is much larger than the other two. This is the case for rails, tubulations and pressure vessels among others. In this work, guided waves propagation characteristics are studied, first in a prismatic bar and then within the geometry of a rail. In both cases, dispersion curves were computed according two different work methodologies, first using an axisymmetric model and then corroborated with a model of periodic conditions. Finally propagation of a Tone-Burst waves were simulated on the analyzed geometries, leading to the discussion of how the waves scatter along its propagation. The results obtained were the dispersion curves of both sections.

Keywords: Dispersion curves; Guided waves; Nondestructive testing; Rail.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	1
2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	4
2.1 Propagación de ondas	4
2.1.1 Propagación de ondas en un medio infinito.....	4
2.1.2 Propagación de las ondas longitudinales en barras delgadas	6
2.1.3 Solución de D'Alembert.....	7
2.1.4 Atenuación de ondas mecánicas	8
2.1.5 Reflexión de ondas mecánicas.....	9
2.2 Curvas de dispersión de estructuras elásticas isotrópicas con 2D finitas	12
2.3 Integración explícita	12
2.3.1 Método de diferencias centradas	14
2.4 Características generales de los rieles	15
2.4.1 Tipos de rieles más utilizados en Argentina.....	16
2.4.2 Identificación de los defectos de los rieles	18
2.4.3 Desgastes de rieles.....	20
3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	24
3.1 Trabajos relacionados a ensayos no destructivos aplicados a la detección de defectos en rieles	24
3.2 Descripción trabajo relacionado con ondas guiadas realizado por Groth, 2016	27
4 METODOLOGÍA	33
4.1 Descripción de los métodos de obtención de las curvas de dispersión	33
4.1.1 Método que utiliza un modelo de elementos finitos Axisimétrico.....	33
4.1.2 Método que utiliza un modelo de elementos finitos tridimensional con condiciones de contorno periódicas simétricas y anti simétricas	37
4.2 Simulación Numérica, en el software Ls-Dyna, de una guía de ondas sobre la cual se aplica una excitación tipo Toneburst	39
4.3 Función de Toneburst.....	42
4.4 Paquetes comerciales de elementos finitos.....	43

5 APLICACIONES	44
5.1 Cálculo de las curvas de dispersión por las dos metodologías presentadas para el caso de una barra de sección rectangular	44
5.2 Cálculo de curvas de dispersión en un perfil de riel tipo 42,18 kg/m - Perfil B.S. 85 A ...	50
5.3 Simulación numérica de una barra rectangular finita, sujeta a una excitación tipo Toneburst	61
5.4 Simulación numérica de un perfil de riel, tipo riel 42,18 kg/m - perfil B.S. 85 A, sujeto a una excitación tipo Toneburst.....	65
6 CONCLUSIONES	71
7 POSIBLES TRABAJOS FUTUROS	72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
ANEXO I - SCRIPT AXILSIMÉTRICO DE BARRA RECTANGULAR.....	76
ANEXO II - SCRIPT CONDICIONES PERIÓDICAS EN BARRA RECTANGULAR	78
ANEXO III - SCRIP PARA EL MODELO AXILSIMÉTRICO RIEL BS85A	81
ANEXO IV - SCRIP MODELO DE CONDICIONES PERIÓDICAS RIEL BS85A.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Tipos de ondas que se propagan en medios infinitos, (sup) ondas del tipo P (primarias) y (inf) ondas del tipo S (secundarias).	5
Figura 2	Equilibrio longitudinal de una barra.	6
Figura 3	Propagación de la onda.	8
Figura 4	Reflexión de ondas en interfaces (a) en un medio líquido y (b) en un medio sólido según la Ley de Snell.....	10
Figura 5	Detalle de la geometría de un riel AREMA de 115Lb.....	12
Figura 6	Esquema de la sección transversal de un riel, y fotografía de un riel instalado en la vía.	16
Figura 7	- Principales características geométricas, según plano de CNRT.....	17
Figura 8	Defectos típicos internos en Rieles [Manual Integral de Vías, 2014].....	18
Figura 9	Tipos de defectos externos típicos en rieles [Manual Integral de Vías, 2014].	19
Figura 10	Diferentes formas de desgaste del Riel [Manual Integral de Vías, 2014].....	23
Figura 11	Modos de propagación en la franja de frecuencias 80-160 kHz [Nucera y Lanza di Scalea 2014].....	26
Figura 12	Simulación de la propagación de onda en riel [G. Zumpano 2005].....	26
Figura 13	Curvas de dispersión de rieles identificando tres ondas modales donde la actividad del modo es preponderante en la cabeza en el alma y en el patín [Garaibeh y col., 2011].....	27
Figura 14	Curvas de dispersión presentadas por Groth, 2016: (a) resultados en términos de frecuencia y número de onda, y (b) resultados en términos de frecuencia de excitación y velocidad de propagación de onda	28
Figura 15	Forma de las ondas modales indicadas en las curvas [Groth, 2016].....	28
Figura 16	Torsión y Flexión en Z [Groth, 2016].....	30
Figura 17	Tracción/compresión y flexión en Y [Groth, 2016].....	30

Figura 18	Curvas de dispersión graficadas sobre las FFTs generadas a partir de los modelos numéricos [Groth, 2016].....	32
Figura 19	Esquema del modelo axisimétrico [Groth, 2016].	34
Figura 20	Esquema del modelo axisimétrico para un riel.	35
Figura 21	Elemento PLANE25, utilizado en la metodología 1 para calcular las curvas de dispersión de la sección rectangular [Ansys, 2009].....	36
Figura 22	Elemento PLANE83, utilizado en la metodología 1 para calcular las curvas de dispersión del riel en estudio [Ansys, 2009].....	36
Figura 23	Detalle de las caras A y B, para modelo de condiciones periódicas.	37
Figura 24	Mallado de la sección del perfil utilizado para la simulación numérica.	39
Figura 25	Mallado 3D del riel utilizado para la simulación numérica.	40
Figura 26	Carga aplicada en la toda la sección del perfil.....	40
Figura 27	Esquema del lugar geométrico, donde se estudian los desplazamientos de los nodos.	41
Figura 28	- Esquema de FFT2d	42
Figura 29	Función Toneburst, 5 ciclos.	43
Figura 30	Gráfica de las curvas obtenidas por Groth, 2016, superpuestas con las generadas en el presente trabajo.	45
Figura 31	Curvas de dispersión para la barra rectangular.	46
Figura 32	Punto de control por método de condiciones periódicas.....	46
Figura 33	Punto de control por método de condiciones periódicas.....	47
Figura 34	Punto de control por método de condiciones periódicas.....	47
Figura 35	Punto de control por método de condiciones periódicas.....	48
Figura 36	Punto de control por método de condiciones periódicas.....	48
Figura 37	Mallado aplicado con el elemento PLANE83.....	50
Figura 38	Curvas de dispersión para un riel nuevo [Heese 2005].....	51

Figura 39	Curvas de dispersión riel BS85 A generadas por el modelo Axisimétrico.....	52
Figura 40	Curvas de dispersión para un riel tipo AREMAS 115lb [Coccia y col. 2011].	53
Figura 41	Curvas de dispersión riel BS85 A generadas en este trabajo por el método Axi- simétrico.	54
Figura 42.	Curvas de dispersión riel de 42,18kg/m - Perfil B.S. 85 A. (Zoom ver Figura 39)	55
Figura 43	Curvas de dispersión riel de 42,18kg/m - Perfil B.S. 85 A, en el dominio (Co vs.f)	55
Figura 44	Curvas de dispersión riel de 42,18kg/m - Perfil B.S. 85 A generadas por condiciones periódicas.....	56
Figura 45	Punto de control condiciones periódicas.....	56
Figura 46	Punto de control por método de condiciones periódicas.....	57
Figura 47	Punto de control por método de condiciones periódicas.....	57
Figura 48	Punto de control por método de condiciones periódicas.....	58
Figura 49	Punto de control por método de condiciones periódicas.....	58
Figura 50	Punto de control por método de condiciones periódicas.....	59
Figura 51	Punto de control por método de condiciones periódicas.....	59
Figura 52	Punto de control por método de condiciones periódicas.....	60
Figura 53	Ondas de Toneburst en las frecuencias aplicadas para la simulación numérica.	61
Figura 54	Simulación barra rectangular, aplicada una Toneburst Longitudinal	62
Figura 55	Simulación barra rectangular, aplicada una Toneburst Transversal.....	62
Figura 56	Curvas de dispersión graficadas sobre FFTs generadas a partir de simulación numérica.	64
Figura 57	Ondas de Toneburst en las frecuencias aplicadas para la simulación numérica.	65
Figura 58	Simulación de riel aplicando una Toneburst dirección longitudinal.....	66
Figura 59	Simulación de riel, aplicando una Toneburst dirección Transversal en X.....	67

Figura 60	FFTs generadas a partir de la simulación numérica longitudinal del riel	68
Figura 61	FFTs generadas a partir de la simulación numérica transversal en X del riel.....	69
Figura 62	FFTs generadas a partir de la simulación numérica transversal en Y del riel.....	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Propiedades y características utilizadas para generar la curva de dispersión del perfil de riel.	51
Tabla 2	Propiedades del material Barra de sección rectangular.	61
Tabla 3	Propiedades del material del riel.	65

LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

ABCM	Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas
CNRT	Comisión Nacional de Regulación de Transporte
END	Ensayos No Destructivos
FE	Elementos Finitos
LES	Large Eddy Simulation
PROMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
SAFE	Elementos Finitos Semi Analíticos
3D	3 Dimensiones
2D	2 Dimensiones

LISTA DE SÍMBOLOS

ω	Frecuencia angular, [rad/s]
f	Frecuencia, [Hz]
$l_0; \lambda$	Longitud de onda, [m]
k	Número de Onda, [rad/m]
$v; c_x$	Velocidad de propagación de la onda, [m/s]
ρ	Densidad, [kg/m^3]
E	Módulo de elasticidad o Módulo de Young's, [Pa]
ν	Coefficiente de Poisson, [ad]
R	Radio, [m]
L	Longitud característica, [m]

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de técnicas de detección de daño basadas en propagación de ondas en sólidos ha crecido en las últimas décadas gracias a la disponibilidad de instrumentos cada vez más sensibles y precisos. Para aprovechar este potencial es mandatorio conocer los fundamentos de la propagación de ondas en sólidos lo cual requiere cierto esfuerzo intelectual.

Muchas estructuras de interés en ingeniería son laminares, considerando así aquellas en las que por lo menos una dimensión es mucho menor que las otras dos. En este tipo de estructura es común la propagación de las llamadas ondas guiadas.

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 caracteriza la propagación de las ondas elásticas que viajan en las direcciones longitudinales. Para su estudio resulta fundamental la utilización de las llamadas curvas de dispersión que dependen de las dimensiones finitas de la estructura laminar estudiada. Pocas soluciones analíticas que permiten la construcción de estas curvas están disponibles destacándose la propuesta por Lamb para placas [Auld, 1973].

La utilización de las curvas de dispersión permite entender como una determinada perturbación que tiene una función temporal y espacial específica se polariza en ondas modales que viajan a velocidades diferentes lo cual produce el fenómeno de la dispersión.

El estudiar la propagación de una guía de onda con geometría específica utilizando las curvas de dispersión permite entender qué frecuencias pueden propagar en que forma modal sobre la guía de ondas.

De esta forma se puede determinar que en perfiles con forma tubular inducir ondas torsionales permite generar perturbaciones que propagan grandes distancias con una baja dispersión, o en rieles, determinar en qué frecuencias viajan ondas por el patín o por la cabeza del riel, 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.

Asociar la técnica de ultrasonido con la propagación de ondas guiadas tiene una buena relación costo-beneficio debido a la simplicidad y rapidez de inspección. Esta metodología permite localizar daños en estructuras inaccesibles debido a estar sumergidas, enterradas o aisladas. Esto es porque cuando se aplica una vibración que se extenderá como una onda guiada sólo se requiere una pequeña área de acceso [Rose, 2014]. En este caso, es posible, con un mismo sensor emisor receptor obtener información de defectos localizados a distancias considerables (20-30 metros), en estructuras de acero de difícil acceso. Es cierto que este tipo de metodología no permite un diagnóstico preciso de la magnitud y tipo de daño identificado, pero permite realizar una localización de potenciales regiones críticas donde deberá ser realizada una intervención con otras técnicas de Ensayo No Destructivo (END).

En el caso de la aplicación de la técnica de emisión acústica [Othsu Groose, 2009] que consiste en capturar las emisiones de ondas producidas por la estructura cuando ocurren rupturas internas o daños durante su vida útil o cuando son sometida a una sobrecarga, 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 la 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.

También 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 contexto en el presente trabajo se proponen los siguientes objetivos:

Objetivo general: Explorar los conceptos teóricos relacionados a ondas guiadas visando su aplicación en métodos de detección de daño no destructivos.

Como objetivos específicos se proponen:

1) Construir las curvas de dispersión de una guía de ondas de sección rectangular, empleando dos metodologías numéricas complementares.

2) Simular la propagación de una excitación específica sobre la guía de ondas de sección rectangular verificando que la polarización de dicha excitación es coherente con las curvas de dispersión presentadas.

3) Comparar los resultados obtenidos con los presentados por Groth, 2016, y de esta forma verificar la correcta implementación de las dos metodologías de construcción de las curvas de dispersión.

4) Automatizar el cálculo de las curvas de dispersión para cualquier tipo de sección transversal de la guía.

5) Expandir los dos primeros objetivos específicos presentados para el estudio de un Riel 42,18 kg/m - Perfil B.S. 85 A [Norma Técnica de Vías y Obras, CNRT]

6) Discutir las características de la propagación de ondas en el riel estudiado visando su aplicación en ensayos no destructivos.

El presente documento está organizado de la siguiente forma: después de la presente introducción en el capítulo 2 se expone la formulación básica de la propagación de ondas en sólidos, y también algunas características básicas sobre rieles, una de las geometrías que serán estudiadas en este trabajo. A seguir, en el capítulo 3, se realiza una revisión bibliográfica que servirá de sustento al trabajo aquí desarrollado. Posteriormente, en el capítulo 4 se presenta la descripción de las herramientas utilizadas. En el capítulo 5, son presentados los productos desarrollados hasta ahora. Finalmente, en el capítulo 6, son presentados las conclusiones parciales y el cronograma sugerido para realizar la defensa de esta disertación y presentar el documento definitivo asociado a ella.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En esta sección se presentan las expresiones básicas de propagación de ondas en estructuras laminares y un resumen de las principales características de los rieles y principales defectos que se pueden encontrar en ellos.

2.1 Propagación de ondas

2.1.1 Propagación de ondas en un medio infinito

La propagación de una onda mecánica resume la interacción entre átomos en un medio. En la mecánica de sólidos y líquidos, el medio es considerado como continuo, de manera que sus propiedades (constantes elásticas y densidad, entre otras) son pensadas como funciones continuas. Considerando un modelo compuesto de una serie de masas discretas interconectadas por resortes, de modo que una perturbación aplicada a una masa se transmite inmediatamente hacia la otra para mantener el equilibrio de los cuerpos luego de la recepción de una excitación externa que propaga energía a través del medio, siendo la velocidad de esa propagación influenciada por la masa y rigidez del conjunto. En el caso de un medio continuo, la masa y los parámetros elásticos están distribuidos en términos de módulos elásticos y densidad [Graff, 1975].

Las ondas elásticas se mueven en un elemento cúbico infinitesimal presente en un medio sólido en dos modos básicos, un movimiento volumétrico, en el que se comprime y se expande el cubo, y uno de distorsión en el que el elemento se deforma manteniendo su volumen constante. Estas ondas también se conocen como ondas P (primario) y ondas S (secundarias), respectivamente, donde la primera oscila paralelamente a la dirección de propagación y la segunda perpendicularmente. La Figura 1 muestra el efecto del paso de los dos tipos de ondas [Moore y col., 2005].

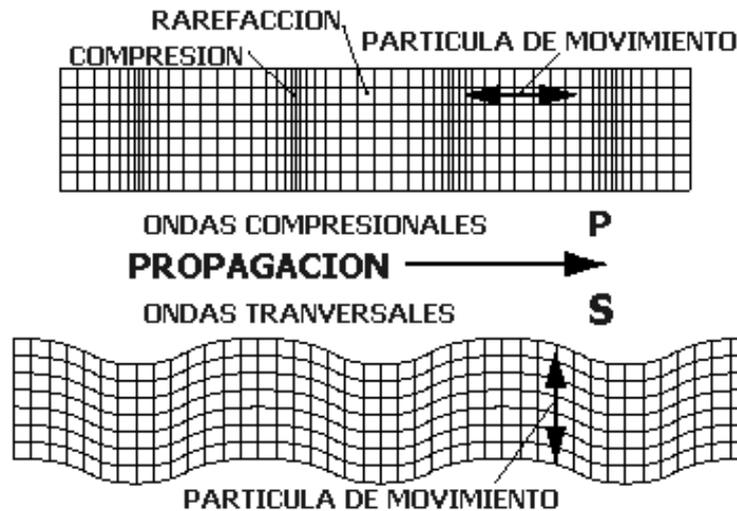


Figura 1 - Tipos de ondas que se propagan en medios infinitos, (sup) ondas del tipo P (primarias) y (inf) ondas del tipo S (secundarias).

La velocidad de propagación de estas ondas se puede definir por las ecuaciones de movimiento para el desplazamiento en un cuerpo elástico lineal, homogéneo e isotrópico de una fuerza externa aplicada, sin fuerzas de cuerpo. Las ecuaciones (2.1) y (2.2) muestran la velocidad de propagación de las ondas P y S, respectivamente, donde C_1 y C_2 son las velocidades de propagación de las ondas P y S, λ y μ son constantes de Lamé para el material y ρ es la densidad de medio [Moore et al., 2005].

$$c_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.1)$$

$$c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.2)$$

Para un medio finito, donde la onda interactúa con cualquier superficie, se dice que la propagación resultante es una combinación de ambas ondas, que tiene su frecuencia, número de onda, velocidad de fase y modos propios, que están influenciados por la geometría de la guía de onda. Una herramienta que permite una mejor comprensión de estas ondas, son las curvas de dispersión, curvas que presentan los tipos de ondas modales en las cuales la onda aplicada se puede descomponer.

2.1.2 Propagación de las ondas longitudinales en barras delgadas

Para deducir la ecuación de una onda unidimensional, [Graff, 1975] considera una onda longitudinal en una barra delgada. El equilibrio en el diferencial de dimensiones dx y área de sección transversal A , dejando de lado las fuerzas del cuerpo, se describe en la ecuación (2.3), donde σ es un campo de tensión variable en el tiempo, $u(x,t)$ es un campo de desplazamiento longitudinal, ρ es la masa específica del material y t es el tiempo.

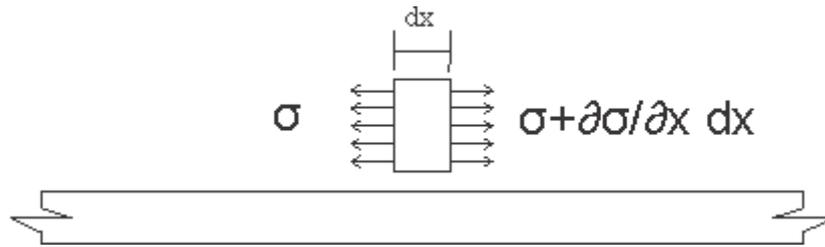


Figura 2 - Equilibrio longitudinal de una barra.

$$-\sigma A + \left(\sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial x} dx \right) A = \rho dx A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.3)$$

Considerando un material elástico lineal, bajo pequeños deslizamientos y pequeñas deformaciones, las Ecuaciones (2.4) y (2.5) son utilizadas en la Ecuación (2.3). Trabajando algebraicamente se llega a la Ecuación (2.6), donde ε es la deformación axial y E el módulo de elasticidad del material.

$$\sigma = E \varepsilon \quad (2.4)$$

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.5)$$

$$\frac{d^2 u_x}{dx^2} = \frac{\rho}{E} \frac{d^2 u_x}{dt^2} \quad (2.6)$$

$$c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.7)$$

Sustituyendo la ecuación (2.7) en (2.6), podemos obtener la ecuación (2.8) en la cual c_0 es la velocidad de propagación de ondas longitudinales en una barra.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

La solución de esta ecuación se basa en las siguientes condiciones: área de la sección transversal del material constante y homogéneo. Se supone también que las secciones transversales permanecen planas y paralelas entre sí durante la propagación de las ondas. Los efectos de la inercia lateral debido al efecto Poisson se desprecian, los que podrían haber sido cuantificados usando la ley de Hooke generalizada, o sea que la expresión (2.7) es una simplificación de la expresión (2.1). En forma similar es posible proceder para encontrar la velocidad de las ondas secundarias o distorsionales ya presentada en la expresión (2.2).

2.1.3 Solución de D'Alembert

La solución a la ecuación de onda encontrada por D'Alembert introduce un cambio de variables, llegando a la ecuación (2.9), en la que “f” y “g” son funciones arbitrarias determinadas por las condiciones iniciales o funciones de potencia de un problema específico que representan la propagación de perturbaciones [Graff, 1975].

$$y(x, t) = f(x - c_0 t) + g(x + c_0 t) \quad (2.9)$$

Es importante destacar que f y g representan perturbaciones que se propagan y que, independientemente de la forma de las perturbaciones, se mantienen durante la propagación. Luego las ondas se propagan sin distorsión. Para el caso particular en el que la excitación es una función armónica, el comportamiento se describe por la Ecuación (2.10).

$$u(x, t) = B \cos(kx - \omega t) = B \cos[k(x - c_0 t)] \quad (2.10)$$

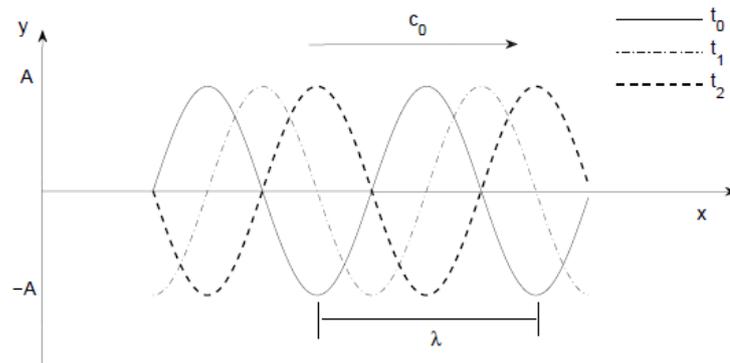


Figura 3 - Propagación de la onda.

Donde B es una constante que está relacionada con la amplitud, ω es la frecuencia angular, k es el número de onda y c_0 la velocidad de propagación de la onda. Otras relaciones importantes se pueden escribir en las siguientes formas:

$$\omega = 2\pi f \quad (2.11)$$

$$k = 2\pi/\lambda \quad (2.12)$$

$$c_0 = \omega/k \quad (2.13)$$

$$f = 1/T \quad (2.14)$$

Donde T es el periodo de la onda por segundo, λ es la longitud de onda, f es la frecuencia en [Hz].

2.1.4 Atenuación de ondas mecánicas

En una perturbación que se propaga en un medio que ha disminuido su energía durante su propagación se dice que dicha perturbación es atenuada. El fenómeno de atenuación es causada por diferentes mecanismos, analizamos a continuación algunos de ellos:

Atenuación geométrica, que actúa sobre las propagaciones en las que el frente de onda es esférico o cilíndrico, el área del frente de la onda aumenta a medida que la onda se aleja del punto de emisión. Como la energía de la onda es la misma, esta se redistribuye en el frente de

onda haciendo que la amplitud de los desplazamientos causados por la onda disminuya a medida que la parte delantera se aleja del punto emisor. Los frentes de onda planos en los que el área frontal permanece constante, no están sujetos a este tipo de atenuación.

Otra forma de atenuación es la separación de ondas debido a la interacción con dislocaciones y grietas, de modo que las ondas pierden energía mediante la interacción con dichas discontinuidades. Con el choque, parte de la energía de las ondas se separa en forma de reflexión o transmisión de onda a otros medios [Groth, 2016].

Otra forma de atenuación es producida por la dispersión, este es un fenómeno presente en geometrías en las que una o dos dimensiones son del orden de magnitud de la longitud de onda, l_0 , caso que se da en estructuras laminares. Este fenómeno es causado por la dependencia de la velocidad de propagación de la onda con la frecuencia. Una perturbación que puede ser descompuesta en una suma de funciones armónicas con frecuencias y amplitudes diferentes que se irán separando, ya que cada una de estas funciones armónicas se propaga a diferentes velocidades debido a la dependencia de la velocidad de propagación con la frecuencia. Así, la amplitud de la perturbación disminuye a medida que se dispersa cuando propaga en la dirección de la guía de onda (dimensión infinita en la estructura analizada).

Otra forma de dispersión es por la disipación de energía producida por mecanismos internos de disipación del material el llamado comportamiento visco elástico del material.

2.1.5 Reflexión de ondas mecánicas

Las ondas pueden encontrar un cambio en el entorno en el que su propagación se reflejará en la interfaz o será transmitida a otro medio, también puede cambiar su modo de propagación: puede reflejarse o refractarse al interactuar con una interface.

En el caso de la propagación en un medio sólido, el comportamiento es complejo y se rige por la Ley de Snell.

Una onda transversal que incide sobre una superficie reflectora, se separará en dos ondas reflejadas, una transversal y una longitudinal, reflejadas respectivamente en un ángulo de θ_{rt} y

un ángulo θ_{rl} , en el que el segundo depende de las velocidades de propagación, c_1 y c_2 . Los dos tipos de onda satisfacen la ecuación (2.15):

$$\frac{\text{sen}\theta_{rl}}{c_1} = \frac{\text{sen}\theta_i}{c_2} \quad (2.15)$$

Donde c_l es la velocidad de propagación de la onda longitudinal en el medio y c_t es la velocidad de propagación de la onda transversal en el mismo medio. La Figura 4 muestra el comportamiento de reflexión de ondas en medios líquidos y sólidos.

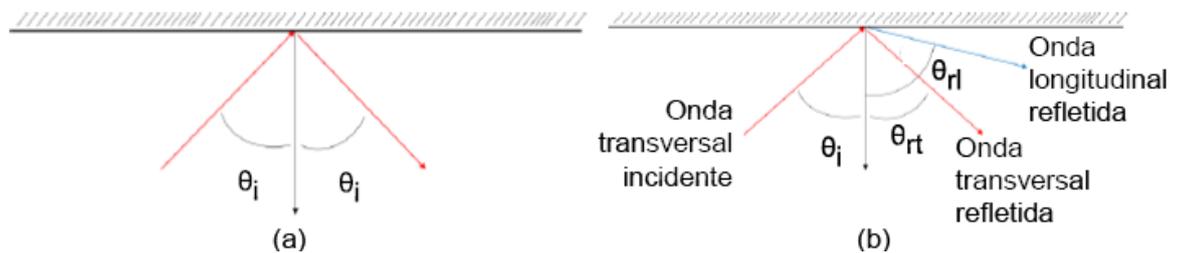


Figura 4 - Reflexión de ondas en interfaces (a) en un medio líquido y (b) en un medio sólido según la Ley de Snell

Notar que la onda longitudinal reflejada será normal a la onda incidente transversal, es decir,

$$\theta_{rl} + \theta_i = 90$$

Expresiones similares para determinar el ángulo de reflexión de las ondas reflejantes se pueden encontrar en el caso en que la onda incidente sea longitudinal.

Ecuaciones de Rayleigh-Lamb: en las expresiones (2.16) y (2.17) son representadas estas ecuaciones que gobiernan la propagación de ondas oblicuas en una placa de espesor b [Auld, 1973].

$$\frac{\tan(k_{ts} b/2)}{\tan(k_{tl} b/2)} = -\frac{4\beta^2 k_{tl} k_{ts}}{(k_{ts}^2 - \beta^2)^2} \quad (2.16)$$

$$\frac{\tan(k_{ts} b/2)}{\tan(k_{tl} b/2)} = -\frac{(k_{ts}^2 - \beta^2)^2}{4\beta^2 k_{tl} k_{ts}} \quad (2.17)$$

Donde c_1 y c_2 son velocidades de propagación de las ondas primarias y secundarias presentadas en (2.1) y (2.2), y

$$k_{tl}^2 = \left(\frac{\omega}{c_1}\right)^2 - \beta^2 \quad (2.18)$$

$$k_{ts}^2 = \left(\frac{\omega}{c_2}\right)^2 - \beta^2 \quad (2.19)$$

En las expresiones (2.16) y (2.17) se representan las relaciones entre el número de onda en la dirección de propagación β , la frecuencia ω , la densidad de la placa ρ , las constantes de Lamé μ y λ , y el espesor de la placa b . Finalmente, k_{ts} y k_{tl} representan el número de onda en dirección transversal a la dirección de propagación de las ondas transversal y longitudinal, respectivamente.

Las ondas definidas por la combinación de β y ω que verifican las expresiones de Rayleigh-Lamb pueden ser representadas como una familia de curvas llamadas curvas de dispersión.

Las expresiones de Rayleigh-Lamb pueden ser calculadas analíticamente para el caso de una placa o tubos, en el caso de otras geometrías o perfiles con secciones transversales complejas es necesario realizar el cálculo de las curvas de dispersión en forma numérica.

Como un ejemplo de curva de dispersión en la Figura 40 se presentan las curvas de dispersión de un riel de acero tipo AREMA de 115Lb estudiado por Coccia [2011], con una densidad $\rho=7932 \text{ kg/m}^3$, velocidad de la onda primaria $c_1=5960 \text{ m/s}$, velocidad de la onda de corte $c_2=3260 \text{ m/s}$. La sección transversal del riel tenía una geometría característica con un eje vertical de simetría. Las letras S y A representan modos simétricos y anti simétricos respecto al eje de simetría del perfil (eje y en la Figura 5.a).

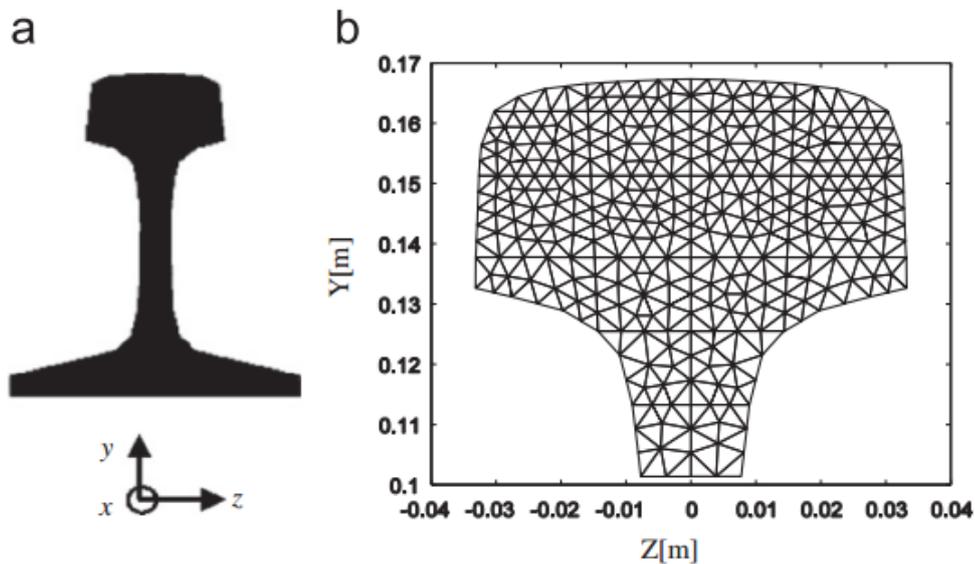


Figura 5 - Detalle de la geometría de un riel AREMA de 115Lb.

2.2 Curvas de dispersión de estructuras elásticas isotrópicas con 2D finitas

En el caso de estructuras laminares elásticas como un riel del tren, por ejemplo, la determinación de curvas de dispersión se vuelve compleja e imposible de calcular en forma analítica y para obtener dichas curvas se deben emplear técnicas numéricas. El método de elementos finitos, combinado con condiciones de contorno especiales o soluciones analíticas, es actualmente la herramienta más ampliamente utilizada. Estos métodos son llamados métodos híbridos, ya que combinan las soluciones analíticas con técnicas numéricas, en la literatura son llamados por sus siglas en inglés SAFE (Método de Elementos Finitos Semi Analítico) [Rose, 1999].

2.3 Integración explícita

Los problemas que la ingeniería debe solucionar son en su mayoría de naturaleza no lineal. Para simplificar su estudio y formulación matemática, se utilizan hipótesis de linealización que simplifican enormemente los modelos utilizados pero que muchas veces tienden a perder la percepción de la realidad arrojando resultados erróneos. Dentro de las

técnicas para el estudio de problemas no lineales, la utilización de métodos de integración explícita en el dominio del tiempo ocupa un lugar destacado. Entre los métodos de integración explícita el más popular es el de las diferencias finitas centrales. Existen innumerables aplicaciones de este tipo de análisis, entre ellas la simulación de problemas de impacto, de conformación mecánica, el análisis de problemas de fractura y/o fragmentación, problemas de contacto, problemas de grandes deformaciones y/o grandes desplazamientos, no linealidades en el comportamiento del material, etc. Otras de las ventajas en la aplicación de este tipo de análisis es la posibilidad de realizar un balance energético durante el proceso que permite entender mejor el fenómeno estudiado. Utilizando un esquema explícito para la integración de la ecuación de movimiento, la misma resulta del empleo de algún método de discretización espacial, en este sentido existen varias opciones, la más clásica y tradicionalmente utilizada es el método de los elementos finitos, existen un gran trabajo realizado en este sentido por investigadores en el área numérica en los últimos años en todo el mundo, y hoy esta forma de trabajo ha sido consolidada por gran cantidad de aplicaciones tanto en el ámbito académico como en aplicaciones en ingeniería.

La característica esencial de los métodos explícitos radica en que el intervalo de integración es corto, tanto que los nodos contiguos de la malla no llegan a tener interacción entre ellos, y esto se puede calcular como el tiempo crítico de integración.

La importancia del método es la definición de un paso de tiempo inferior al crítico de *Courant-Friedrichs-Levy*, para de esta manera garantizar la estabilidad del método planteado.

$$\Delta t \leq \Delta t_{crit} = \frac{2}{\omega_{max}} = \frac{T_{min}}{\pi} \quad (2.20)$$

Donde ω_{max} es la mayor frecuencia natural del sistema y T_{min} es el periodo mínimo de integración, así el tiempo crítico es el tiempo en que tarda una onda en recorrer un elemento.

La imposición de este tiempo tiene por objeto desacoplar las ecuaciones de movimiento de los nodos, con lo que estas son resueltas individualmente en cada intervalo de integración. Imponer esta condición de tiempo garantiza la estabilidad de la integración, y en la práctica, asegura la precisión del cálculo sin necesidad de utilizar sub intervalos de integración.

Pero el problema del método, es que a intervalos de tiempo tan pequeños, aumenta el costo computacional de manera proporcional.

Existen algunos métodos explícitos, como el de Euler o el de diferencias centradas, este último es el utilizado en este trabajo.

2.3.1 Método de diferencias centradas

El método aplicado por el software LS-Dyna, es un método de diferencias centradas. Este método calcula las velocidades y aceleraciones de un problema de la siguiente manera.

$$U_n = \frac{1}{\Delta t_{n+1/2}} (U_{n+1/2} - U_{n-1/2}) \quad (2.21)$$

$$U_{n+1/2} = \frac{1}{\Delta t_{n+1}} (U_{n+1} - U_n) \quad (2.22)$$

Donde el subíndice $n + 1/2$ significa la media de la diferencia, entre los tiempos t_{n+1} y t_n .
1. La aceleración se calcula mediante:

$$\ddot{U}_n = M^{-1} (F_{ext} - F_i)_n \quad (2.23)$$

Sustituyendo este valor en las ecuaciones anteriores llegamos al valor de velocidad

$$\dot{U}_{n+1/2} = \dot{U}_{n-1/2} + \Delta t \ddot{U}_n \quad (2.24)$$

Sustituyendo nuevamente tenemos

$$U_{n+1} = U_n + \Delta t \dot{U}_{n+1/2} \quad (2.25)$$

Donde U_n es un valor obtenido del paso anterior. Las condiciones iniciales son necesarias en estos problemas, como el desplazamiento y la velocidad inicial. En este problema la matriz de masa es diagonalizada para simplificar, y de esta manera logra una reducción de las frecuencias naturales del sistema, que es compensada por un aumento causado por el mismo método. La no linealidad de este método está concentrada en los términos de fuerzas internas y externas, y el resto permanece igual a un problema lineal.

2.4 Características generales de los rieles

Se buscó con esta revisión básica de la patología y de las principales características en rieles conocer qué tipos de defectos sería de interés detectar.

Para el ferrocarril, el riel cumple simultáneamente las funciones de camino de rodadura, de elemento portante y de elemento de guiado. Este está sometido tanto a sollicitaciones estáticas como dinámicas. En ferrocarriles de carga se llega a 35 tn/eje.

En líneas de alta velocidad, actualmente se alcanzan velocidades que superan los 300 km/h. En función de la topografía a la que se emplazó el ferrocarril, este puede estar exigido y/o colocado en radios reducidos los que producen altas sollicitaciones laterales por el empuje que ejercen las ruedas sobre el riel [Manual Integral de Vías, 2014].

Para que un riel pueda soportar estas múltiples sollicitaciones en servicio, debe cumplir con las siguientes exigencias:

- Alta resistencia al desgaste
- Alta resistencia a la compresión
- Alta resistencia a la fatiga
- Alto límite elástico, una alta resistencia a la tracción y elevada dureza
- Alta resistencia a la rotura
- Poder ser soldado
- Alto grado de pureza de los componentes
- Buena calidad de la banda de rodadura

En función de lo expuesto el riel fue motivo de minuciosos estudios desde su origen de manera de ir evolucionando junto con el avance tecnológico a través de los años que experimentó el ferrocarril.

El perfil de riel utilizado en este trabajo es el llamado de Vignole, que está constituido por tres partes identificadas en la Figura 6 que son:

-Hongo o cabeza: Es la que se utiliza como superficie de rodamiento y está expuesta a las mayores sollicitaciones y sufre el desgaste. Debe tener un alto y ancho suficiente, dependiendo del calibre de cada riel.

-Alma: Es el elemento de espesor reducido que tiene la función de unir el hongo con el patín, asegurando la transmisión de las cargas desde el hongo al patín.

-Patín: Constituye la base del riel y su parte inferior es plana, lo que permite su apoyo a los durmientes y debe tener un ancho suficiente con el fin de distribuir la carga sobre los durmientes.

Las masas están repartidas un 40% en el hongo, 22% en el alma y 38% en el patín.

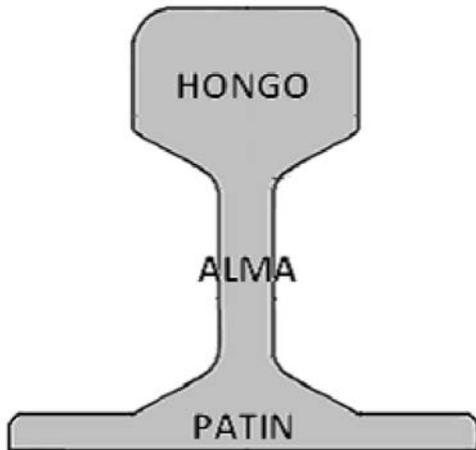


Figura 6 - Esquema de la sección transversal de un riel, y fotografía de un riel instalado en la vía.

2.4.1 Tipos de rieles más utilizados en Argentina

Los rieles que podemos encontrar en los distintos ramales de la red ferroviaria Argentina según la Comisión Nacional de Regulación del Transporte (CNRT) dentro de la Gerencia de Vías y Obras son:

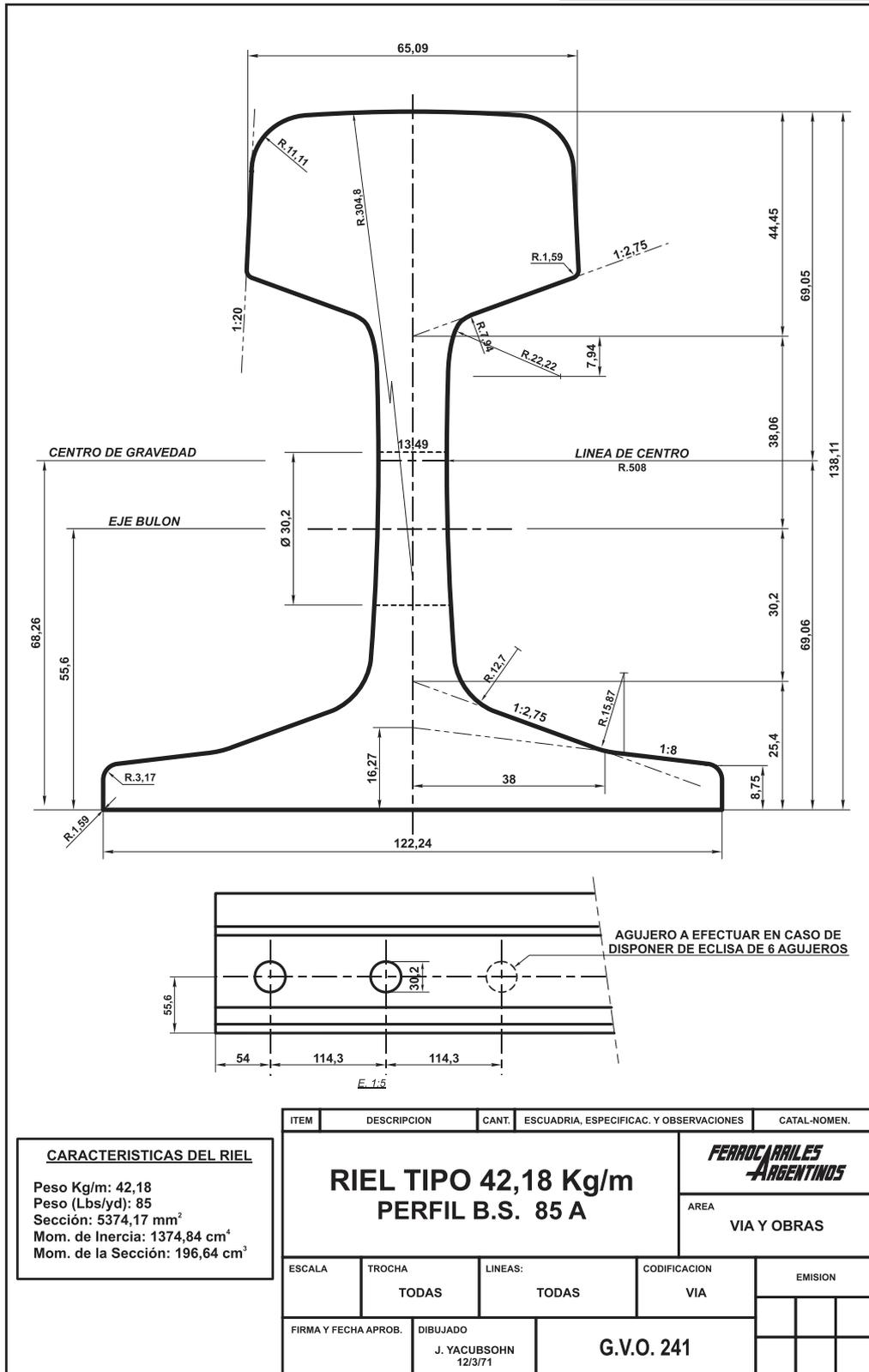
- Riel de 49,61 kg/m (100 Lbs/yd) - Perfil B.S. (R)
- Riel de 42,18 kg/m - Perfil B.S. 85 A
- Riel de 50,632 kg/m - Perfil U.36 (S.N.C.F.)
- Riel de 60,34 kg/m - Perfil U.I.C. 60
- Riel de 50,88 kg/m - Perfil U.50 (S.N.C.F.)
- Riel de 54,43 - Perfil UIC 54
- Riel de 54,77 kg/m - Perfil UIC 54 E.1
- Riel de 44,65 kg/m (90 lbs/yd) - Perfil ARA-A
- Riel de 60,21 kg/m - Perfil U.I.C. 60 E.1

En este trabajo será estudiado el riel 42,18 kg/m - Perfil B.S. 85 A.

En la Figura 7 se presentan las principales características geométricas de este riel.

ES COPIA DEL PLANO G.V.O. 241

M. BELLOCCHIO - AREA INGENIERIA - C.N.R.T. E.1:1



CARACTERISTICAS DEL RIEL
 Peso Kg/m: 42,18
 Peso (Lbs/yd): 85
 Sección: 5374,17 mm²
 Mom. de Inercia: 1374,84 cm⁴
 Mom. de la Sección: 196,64 cm³

Figura 7 - Principales características geométricas, según plano de CNRT

2.4.2 Identificación de los defectos de los rieles

Se identifican a continuación los principales tipos de defectos que pueden ser encontrados en los rieles.

DEFECTOS INTERNOS: estos defectos son visibles solamente después que llegan al hongo, alma o patín. Tales defectos progresan con el tráfico y aumentan su tamaño con mayor número de toneladas transportadas. La mayoría de los defectos internos solamente son detectados a través de técnicas de ultrasonido, de acción localizada o basadas en la aplicación de ondas guiadas.

Se dividen en:

- Fisuras longitudinales horizontales (Figura 8.a)
- Fisuras longitudinales vertical (Figura 8.b)
- Fisuras transversales (Figura 8.c)
- Burbuja, ampolla o vacío interno producto de la laminación (Figura 8.d)
- Defectos internos en las soldaduras (Figura 8.e)

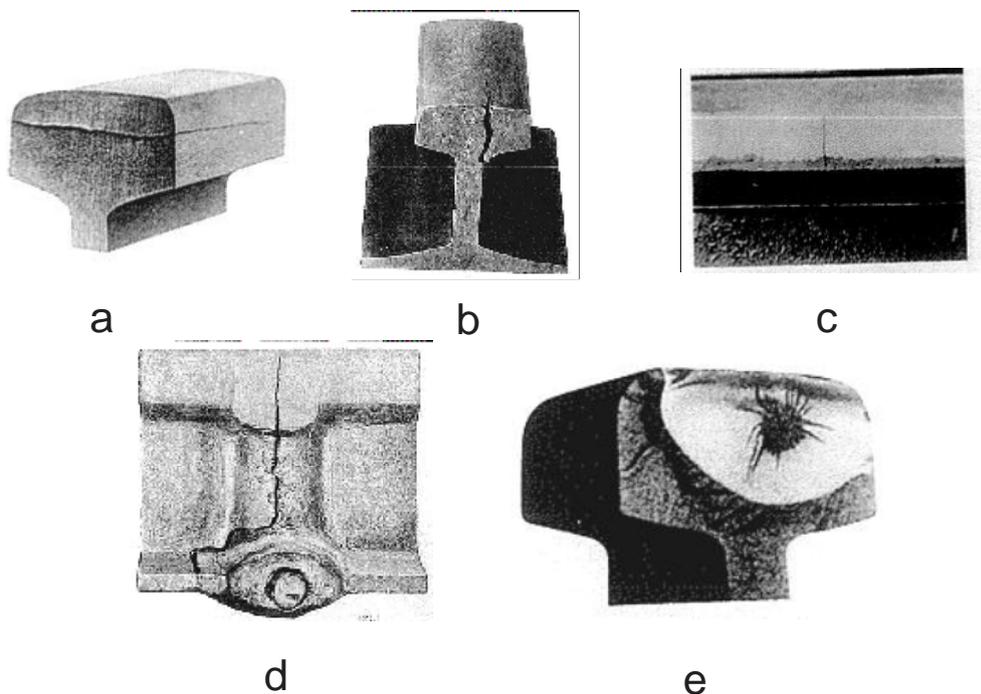


Figura 8 - Defectos típicos internos en Rieles [Manual Integral de Vías, 2014].

DEFECTOS EXTERNOS: son aquellos visibles, permitiendo observar el acompañamiento de su degradación a lo largo del tiempo.

Algunos ejemplos son:

- Hundimiento local de la superficie de rodamiento (Figura 9.A)
- Desgaste ondulatorio – Ondas largas (Figura 9.B)
- Picadura o escamado (Figura 9.C)
- Desgaste ondulatorio – Ondas cortas (Figura 9.D)
- Descascarado (Figura 9.E)
- Zurco (Figura 9.F)
- Línea (Figura 9.G)
- Marcas de patinadas (Figura 9.H)

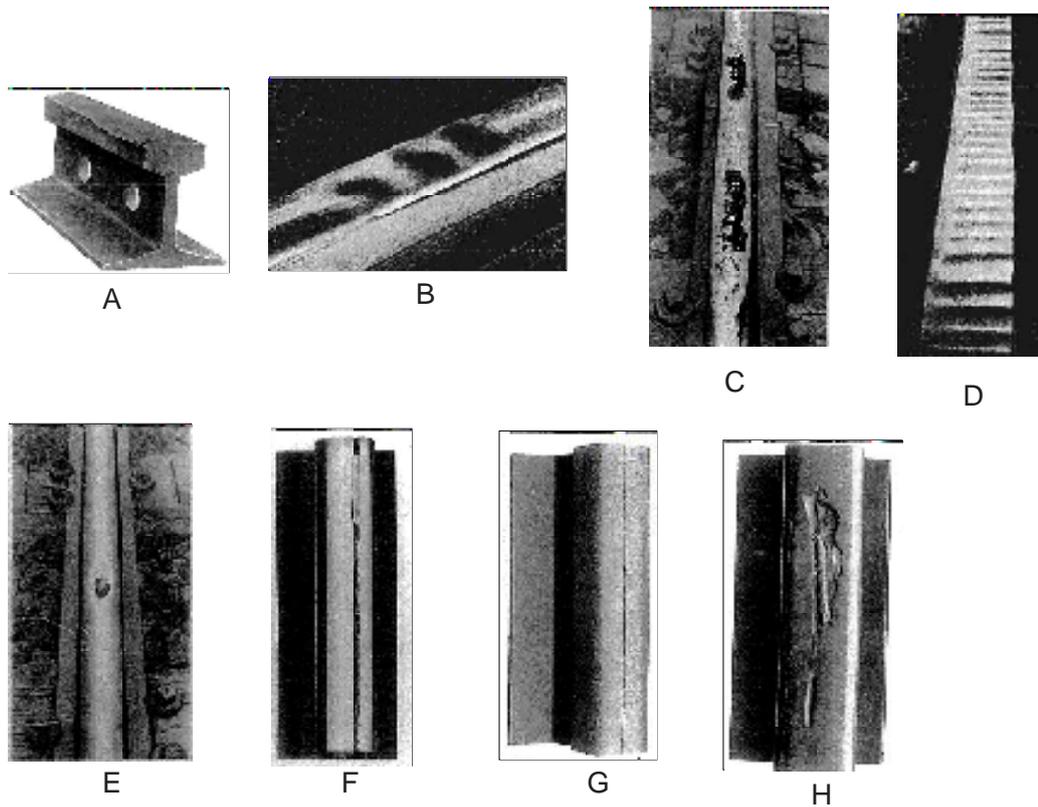


Figura 9 - Tipos de defectos externos típicos en rieles [Manual Integral de Vías, 2014].

2.4.3 Desgastes de rieles

Se define como el límite de desgaste en función del área consumida del hongo del riel, tanto en vertical como en lateral, este está en el orden de los 25 a 30 % de su sección.

Los límites de desgaste también pueden ser determinados a través de analizar el modulo resistente del hongo, considerando los aspectos de carga por eje, volumen transportado, densidad de durmientes que posee la vía y la velocidad del corredor.

Como desgaste vertical máximo, se considera que en vía principal la pestaña más alta no toque y/o desgaste las eclisas de las juntas, está en el orden de los 8 a 10 mm según el perfil del riel.

La vida útil del riel es determinada básicamente por el límite de desgaste que ha experimentado a través del cálculo de su módulo resistente mínimo en función de su perfil. A su vez el desgaste del riel se da en función de la carga y clase de vía. Por lo tanto la vida útil del riel será variable conforme a las condiciones de tráfico y clase de vía a la cual el riel estará sujeto a sus características o perfil.

Es importante tener presente estos conceptos cuando se procede a la inversión de rieles con desgaste laterales muy importantes que estarían al límite de su condenación, sea por ancho del hongo medido con calibre a 14 mm por debajo de la rodadura y/o con ángulos próximos a 30°.

Además del análisis referente a capacidad de soporte del riel en cuanto al tráfico ferroviario, la clasificación de los rieles para reemplazo debe atender las siguientes condiciones:

- Verificar la existencia de fisuras, defectos superficiales, defectos identificados por ultrasonido, desgaste en ambos laterales del hongo (es decir que ya fue invertido), desgastes laterales y horizontales que superan los límites permitidos.
- Verificar el perfil ante corrosión, principalmente en el patín del riel.

Rieles que presenten fisuras, fracturas, defectos superficiales (patinadas) que no posibiliten su corrección mediante esmerilado.

Los defectos geométricos afectan e incrementan el desgaste de los rieles y estos son:

- Alineación
- Nivelación longitudinal

- Nivelación transversal, alabeo
- Variaciones brusca de la trocha
- Inclinación deficiente del entalle

Todos estos defectos deben ser corregidos y estar dentro de los límites fijados para cada clase de vía y/o velocidad de circulación.

En curvas el riel exterior es el que más se desgasta, agravándose aún más en curvas de radios reducidos entre 250 a 500 m.

Para evitar desgaste en curvas se debe tener presente los siguientes parámetros:

- Correcto sobreancho con variación correcta en transición y constante en el sector de curva circular.
- Alineación en transición y curva circular lo más correcta posible y tratar siempre cuando se realizan estas correcciones locales con equipos de mecanización pesada que logran este objetivo o calcular la curva por el método de la flechas y proceder al ripado o alineación.
- Peralte inadecuado o brusco alabeo en transición y curva circular.

Dos tipos de desgaste típicos de rieles son:

DESGASTE VERTICAL DEL HONGO DEL RIEL: es el desgaste natural de la superficie o banda de rodamiento del riel como consecuencia de las toneladas brutas transportadas provocando una disminución en la altura vertical del hongo y aplastamiento. Ver en la Figura 10 en forma esquemática este tipo de desgaste.

DESGASTE LATERAL DEL HONGO DEL RIEL: es el desgaste que se origina por el contacto de la pestaña en la parte lateral del hongo. Este desgaste es más característico en curva pero también se da en recta cuando las condiciones geométricas no responden a valores admisibles y por la inscripción de los bogíes del material rodante. En la Figura 10 se ilustra este tipo de desgaste.

Este desgaste sigue y copia el contacto de la pestaña con el riel en un ángulo equivalente a la pestaña. Este ángulo se va incrementando y al llegar a 30° se convierte en un desgaste peligroso tanto en sectores de curva como en recta, llegando a producir descarrilamiento por esta causa.

El ritmo de desgaste del hongo es muy variable y difícil de precisar, sin embargo es muy importante para un ferrocarril lograr de maximizar la vida útil del riel, adoptando un sistema de control para poder pronosticar y actuar de inmediato.

El desgaste del riel puede evaluarse en tres aspectos a saber:

- Resistencia del riel: afecta la aptitud del riel para soportar la máxima carga por eje a la velocidad (desgaste del hongo y deformaciones plásticas que produce aplastamientos y rebabas).
- Seguridad: afecta el paso seguro de los trenes (fatiga y grado del desgaste lateral del hongo).
- Medio ambiente: tiene un efecto negativo ante las bajas temperaturas porque el acero se fragiliza y pueden producirse roturas importantes.

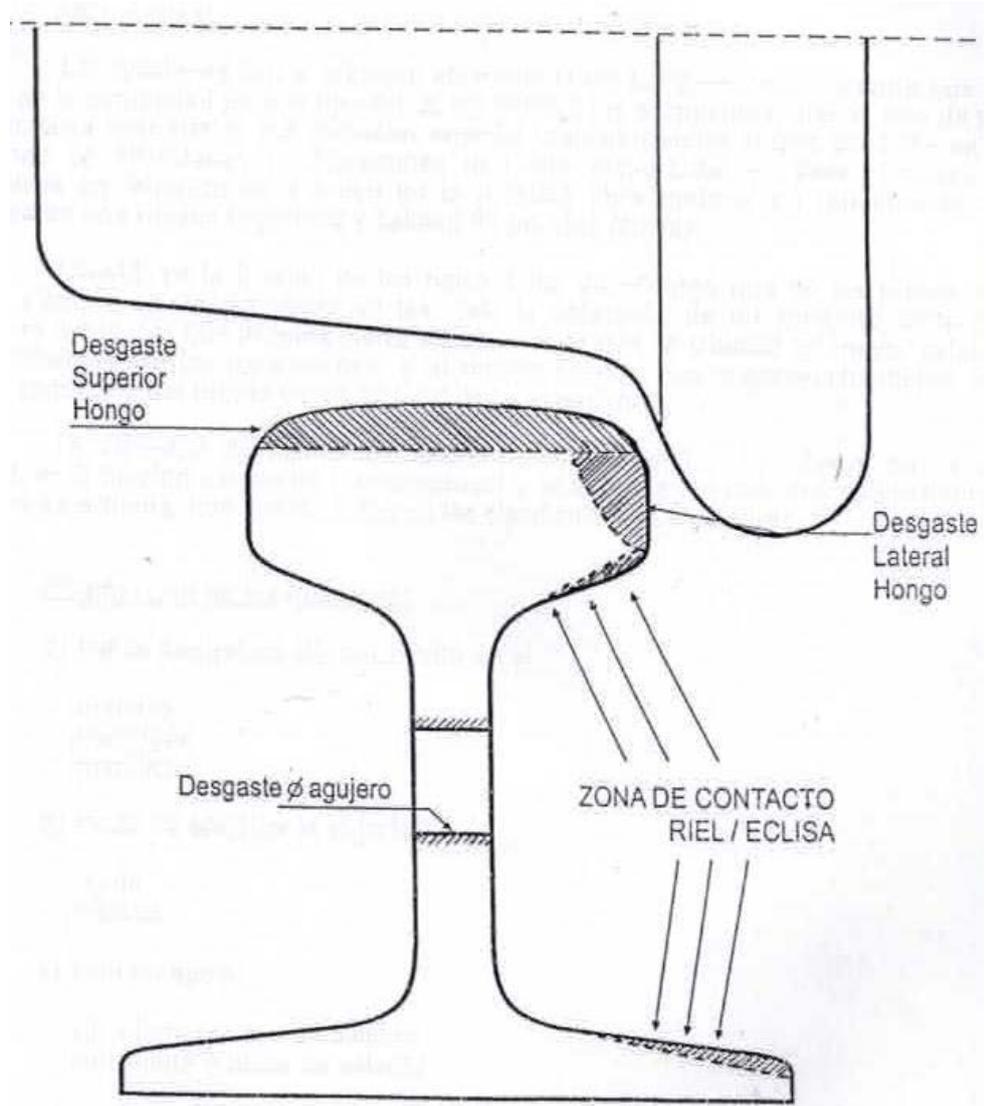


Figura 10 - Diferentes formas de desgaste del Riel [Manual Integral de Vías, 2014].

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se presenta a continuación una revisión bibliográfica de tópicos relacionados con el presente trabajo.

3.1 Trabajos relacionados a ensayos no destructivos aplicados a la detección de defectos en rieles

La prevención de fallas es muy importante en este área de la industria, además de ser costosa pueden causar enormes daños ambientales y personales, por lo que es la obligación del ingeniero responsable de asegurarse de la integridad de las estructuras de ingeniería durante su tiempo de servicio. En el área de prevención de fallas se destacan los ensayos no destructivos (END), que se utilizan para examinar los defectos en busca de componentes de servicio sin dañarlos. Entre las diversas técnicas de END 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.

Diversos estudios numéricos y experimentales han examinado la propagación de las ondas guiadas ultrasónicas específicamente en vías de ferrocarril. Este tema es de interés para el área de ferrocarril para la detección de defectos específicamente por inspección ultrasónica [Lanzadi Scalea y col., 2004; Wilcox y col., 2003; Rose y col., 2004; Lanzadi Scalea y col., 2005; Lanzadi Scalea y col., 2006; Rizzo y col., 2007; Rizzo y col., 2010; Lanzadi Scalea y col., 2007; Rizzo y col., 2009], así como en el contexto de ruido generado por los trenes que pasan [Jones y col., 2006; Ryue y col., 2008; Thompson, 2008].

Es bien conocido que el uso de métodos numéricos es necesario para obtener las curvas de dispersión de ondas guiadas para una sección transversal arbitraria en un amplio rango de frecuencias y números de onda. Hesse y Cawley [2006] determinaron curvas de dispersión de ondas guiadas para secciones de riel hasta una frecuencia de 350 kHz, utilizando modelos axi-simétricos de elementos finitos (FE). Los métodos semi analíticos de elementos finitos (SAFE), conocidos en la literatura como métodos de elementos finitos espectrales o guía de ondas, también han surgido para los modelos de ondas guiadas [Wilcox y col., 2003; Rose y col., 2004; Damljanović y col., 2004; BartoliI y col., 2006; Loveday, 2009]. Los métodos SAFE en general,

para la extracción de las soluciones de dispersión usa una discretización de elementos finitos de la sección transversal. Considerando funciones analíticas o condiciones de contorno particulares en la dirección en la que se desarrolla la guía de ondas.

En el trabajo de Coccia y col. [2011], se realiza un estudio numérico y experimental de ondas guiadas para la detección de defectos en la cabeza del riel. En este trabajo se presenta una metodología a ser aplicada en la propagación de la onda ultrasónica en guías de onda de secciones de rieles, visando su aplicación en la inspección ultrasónica del riel. Debido a la complejidad geométrica de la sección transversal del riel, la solución analítica para la propagación de la onda en los rieles no es factible. Aquí se describe un método SAFE que permite obtener las curvas de dispersión correspondientes a la cabeza del riel en el dominio de la velocidad de propagación vs la frecuencia en un rango de 0 a 500 kHz quedando de manifiesto la complejidad de este tipo de curvas.

En la tesis de Hesse [2005] y en el trabajo de Cawley y Hesse [2006] se utilizan ondas superficiales seleccionadas empleando las curvas de dispersión. Estas curvas superficiales localizadas en la cabeza del riel tienen por objetivo detectar cambios en la superficie del riel.

En el trabajo de Nucera y Lanza di Scalea [2014], estudian un nuevo algoritmo utilizando el Software COMSOL, para realizar un “CO.NO.SAFE”, (COMSOL no lineal semianalítico de elemento finito), y compara las curvas de dispersión de un riel, como de otras estructuras, con los resultados por SAFE lineal, hallando con éste las deformaciones para una franja de frecuencias, mostrando la deformación de los rieles según la frecuencia aplicada. En la Figura 11, se puede ver en: (A) modo vertical de flexión (energía concentrada principalmente en la cabeza del riel); (B) flexión en modo horizontal (energía exclusivamente confinada en el alma del riel); (C) modo axial; (D) modo complejo que implica una mezcla de axial, de torsión y de flexión.

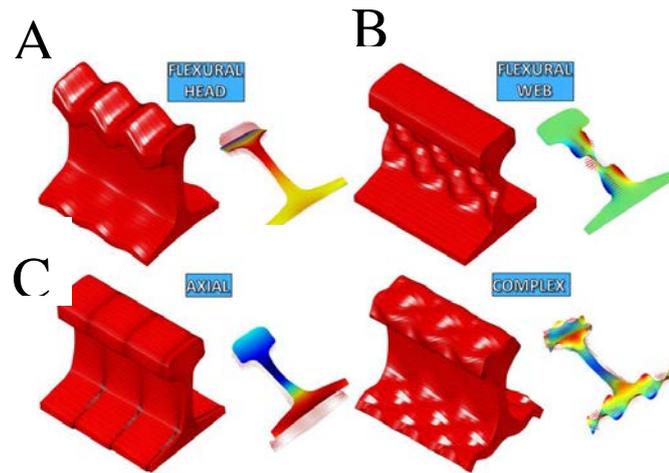


Figura 11 - Modos de propagación en la franja de frecuencias 80-160 kHz [Nucera y Lanza di Scalea 2014].

En el trabajo publicado por G. Zumpano, 2005, se analizan cómo son los efectos de las ondas guiadas en presencia de defectos, estos defectos son provocados con el fin de encontrar las ondas que propagan luego de que sean reflejadas por el mismo. Este trabajo es considerado, pues muestra cuales son resultados provocados por defectos.

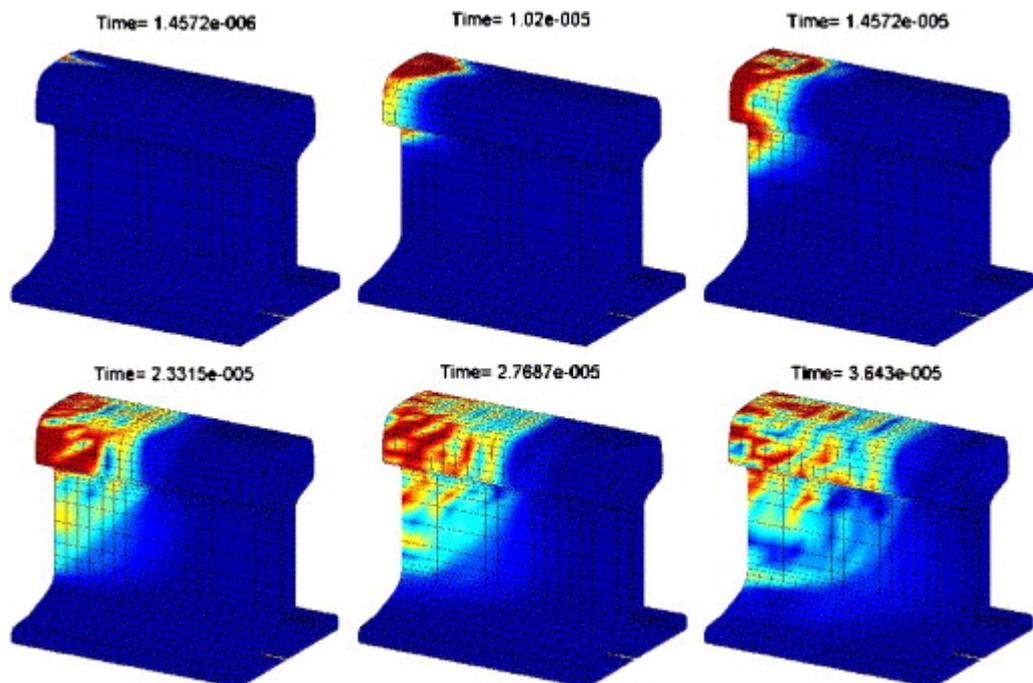


Figura 12 - Simulación de la propagación de onda en riel [G. Zumpano 2005].

Finalmente en el trabajo de Garaibeh y col., 2011, un estudio sobre rieles empleando una técnica SAFE fue realizado y con ello construidas las curvas de dispersión. El trabajo presenta una verificación experimental y tiene el mérito de clasificar los tipos de modo por su característica principal de movimiento, de la cabeza del alma del patín. En la Figura 13 se reproduce una figura que ilustra lo anterior. Este tipo de estudio sirve para poder seleccionar qué tipo de perturbaciones producir sobre el perfil para poder explorar diferentes clases de defectos.

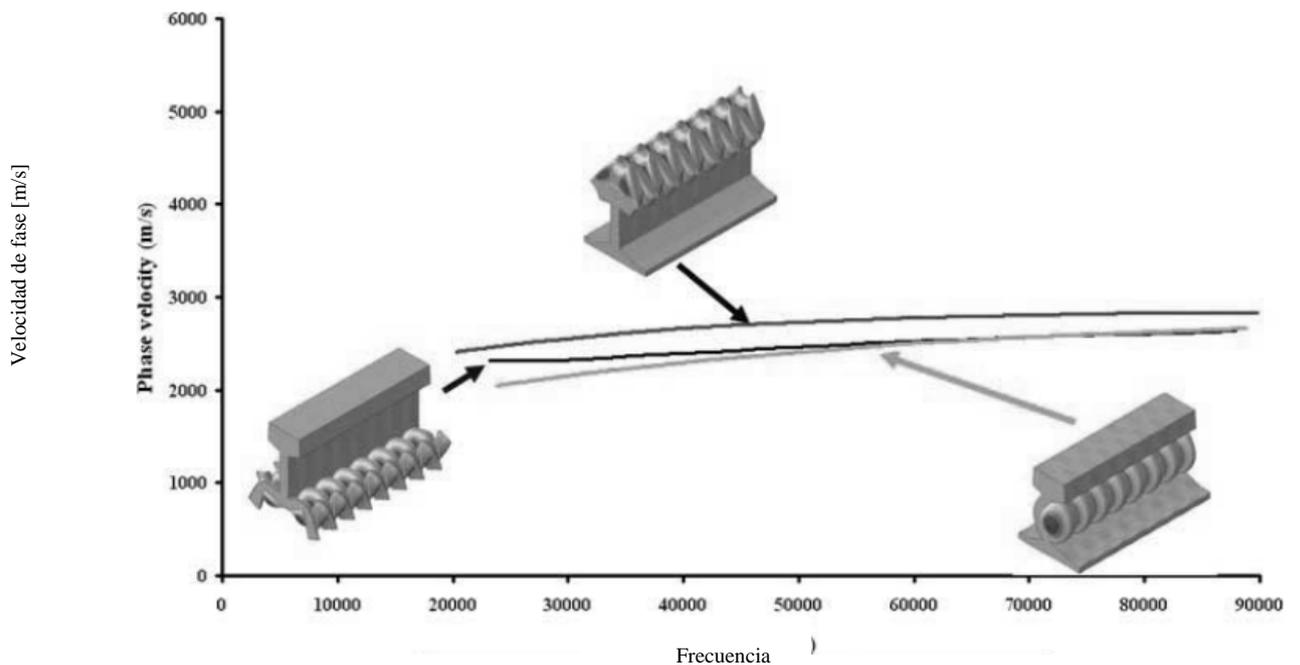


Figura 13 - Curvas de dispersión de rieles identificando tres ondas modales donde la actividad del modo es preponderante en la cabeza en el alma y en el patín [Garaibeh y col., 2011].

3.2 Descripción trabajo relacionado con ondas guiadas realizado por Groth, 2016

Se explica en detalle el trabajo realizado en Groth, 2016, por utilizar el mismo como modelo para varios de los análisis realizados en los próximos capítulos.

En Groth, 2016, se analiza la propagación de ondas guiadas en una barra de sección rectangular. Esta barra forma parte de la armadura de refuerzo de un tubo flexible utilizado en la explotación de petróleo en aguas profundas. En la citada publicación se calculan las curvas

de dispersión de esa geometría para una franja de frecuencias determinada aplicando tres metodologías diferentes dos de las cuales serán utilizadas en este trabajo. También se realiza una verificación numérica y experimental mostrando que la información dada por las curvas de dispersión es consistente con la forma en que las curvas se comportan. Las curvas calculadas se muestran en la Figura 14, donde las cuatro líneas que se extienden desde el origen se denominan líneas fundamentales y están asociadas con los cuatro movimientos fundamentales en vigas, el movimiento longitudinal (tracción y compresión (A), flexión (alrededor dos los ejes perpendiculares a la propagación de la onda (B) y (D)) y torsión (C). La Figura 15 muestra los movimientos de viga mencionados.

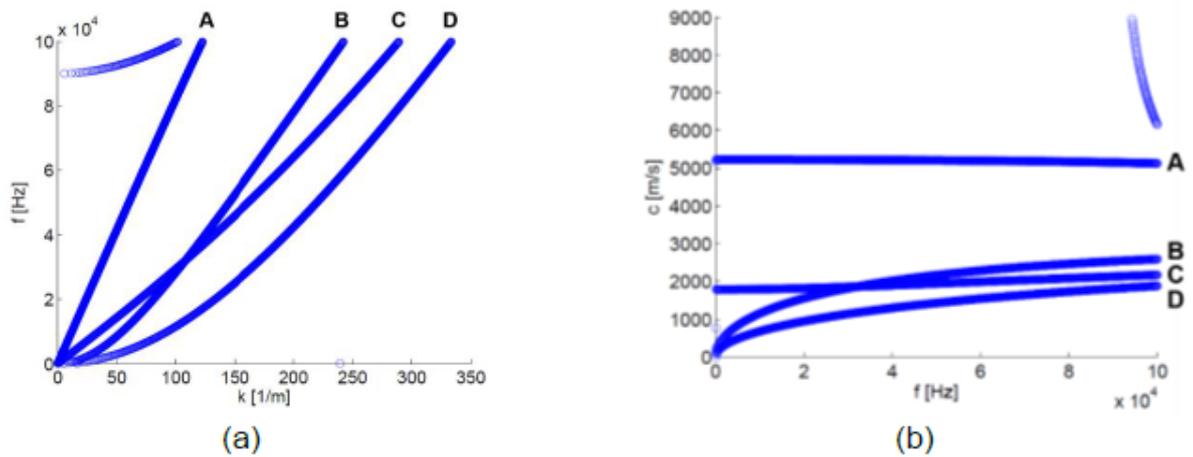


Figura 14 - Curvas de dispersión presentadas por Groth, 2016: (a) resultados en términos de frecuencia y número de onda, y (b) resultados en términos de frecuencia de excitación y velocidad de propagación de onda

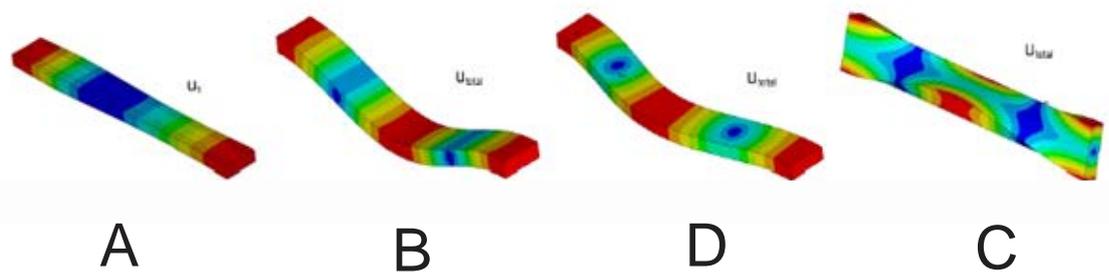


Figura 15 - Forma de las ondas modales indicadas en las curvas [Groth, 2016].

Se verifica que una onda longitudinal se propaga a la misma velocidad, independientemente de la frecuencia de excitación (Figura 14.b curva A), lo mismo sucede con

la onda de torsión, pero con una velocidad de propagación menor (Figura 14.b curva C). Dado que las curvas B y D, que representan los modos de flexión, demuestran un comportamiento diferente, a velocidades diferentes para diferentes frecuencias, estos modos de propagación resultan ser los más dispersivos.

En el capítulo 5 se presentará como primera aplicación el cálculo de la curva de dispersión utilizando dos de las mismas metodologías empleadas por Groth, 2016 y para verificar que dicha metodología fue bien aplicada se realiza una comparación entre los valores obtenidos en este trabajo y los presentados por Groth, 2016.

En el trabajo de Groth, 2016, se realiza un modelo con el software Ls-Dyna, en elementos finitos, de una barra rectangular con las siguientes dimensiones 1500 x 15 x 5 mm, formadas por elementos cúbicos, de ocho nodos, con seis grados de libertad por nodo. El tamaño del mismo fue de 0,5 mm de lado y las propiedades del material fueron: módulo de elasticidad 200 *GPa*, coeficiente de Poisson de 0,3 y una densidad de 7860 kg/m³.

Este modelo fue restringido en un extremo y le fue aplicada una fuerza con variación temporal, dada por una función senoidal encapsulada por otra harmónica de frecuencia menor llamada Toneburst en la cara opuesta, como se presenta en las Figura 16 y Figura 17.

Fueron aplicadas cargas en el sentido de los ejes 1 y 3, con una función Toneburst de 5 ciclos y frecuencias de 50, 70 y 90 kHz.

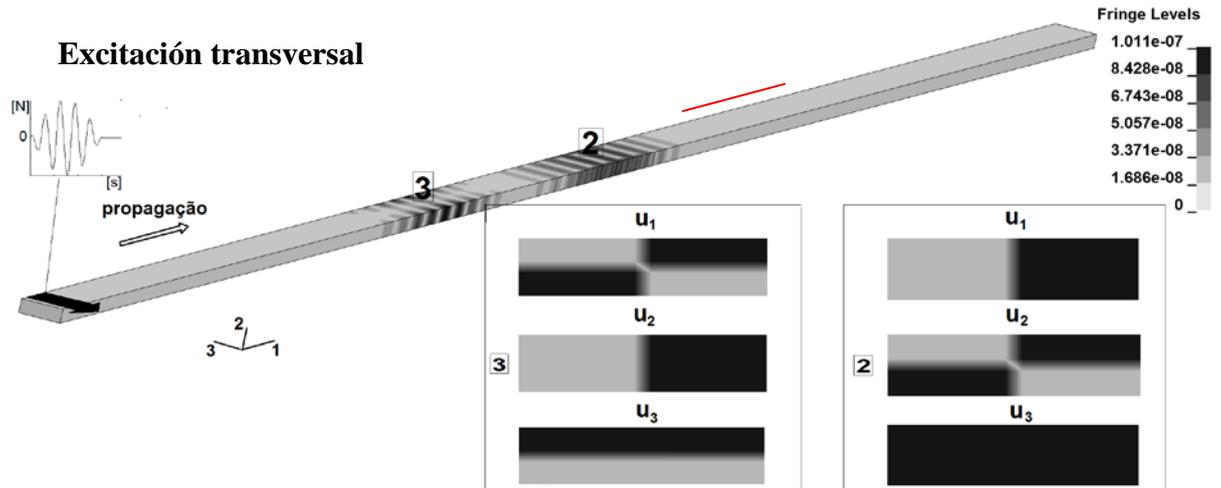


Figura 16 - Torsión y Flexión en Z [Groth, 2016].

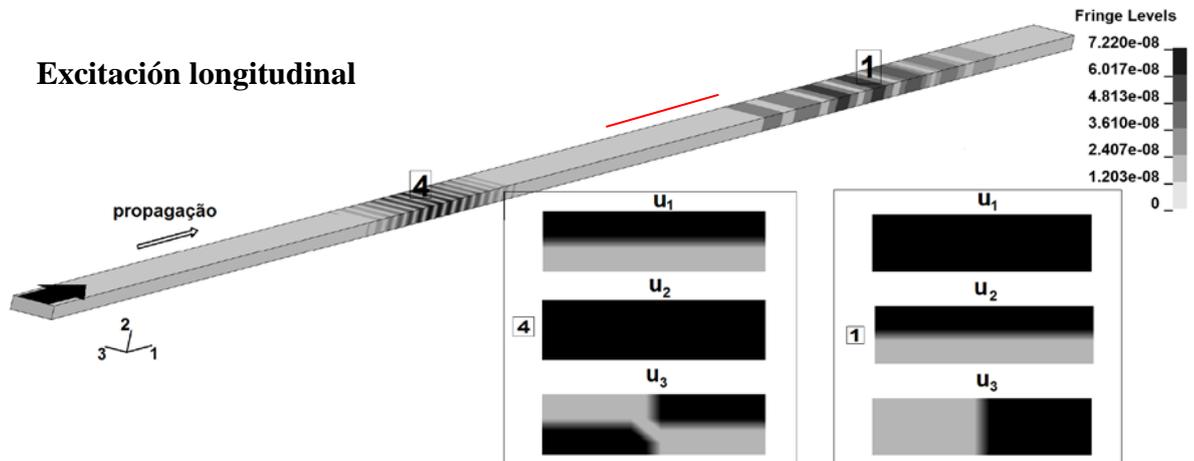


Figura 17 - Tracción/compresión y flexión en Y [Groth, 2016].

La respuesta a la excitación indicada fue el registro de los desplazamientos en puntos sobre una línea a una distancia de 1 m de la excitación sobre la superficie de la barra, tomándose 300 puntos, con una separación de 0,5 mm entre ellos (ver línea roja en las Figura 16 y Figura

17), sobre estos nodos son capturados la variación de los desplazamientos durante un lapso de tiempo. Con los datos capturados es posible crear una matriz de valores con un eje en el tiempo y con el otro eje con las coordenadas espaciales en la dirección axial de la barra. Sobre esta matriz se aplica una función de doble transformada de Fourier realizando una transformación del dominio de los datos almacenados en la matriz que ahora están en el mismo dominio que el utilizado en las curvas de dispersión. Más detalle sobre la metodología empleada será presentado a continuación en el Capítulo 4. En la Figura 18 se presenta la superposición de las curvas de dispersión con los resultados de aplicar la respuesta a diferentes tipos de excitaciones aplicadas en la barra metálica, donde se puede observar cuáles son las ondas modales excitadas en cada caso. Esta misma técnica será utilizada para evaluar los modelos de los rieles que serán presentados en el capítulo 5. Cabe destacar que en el trabajo de Groth, 2016, este segundo análisis fue realizado también en forma experimental.

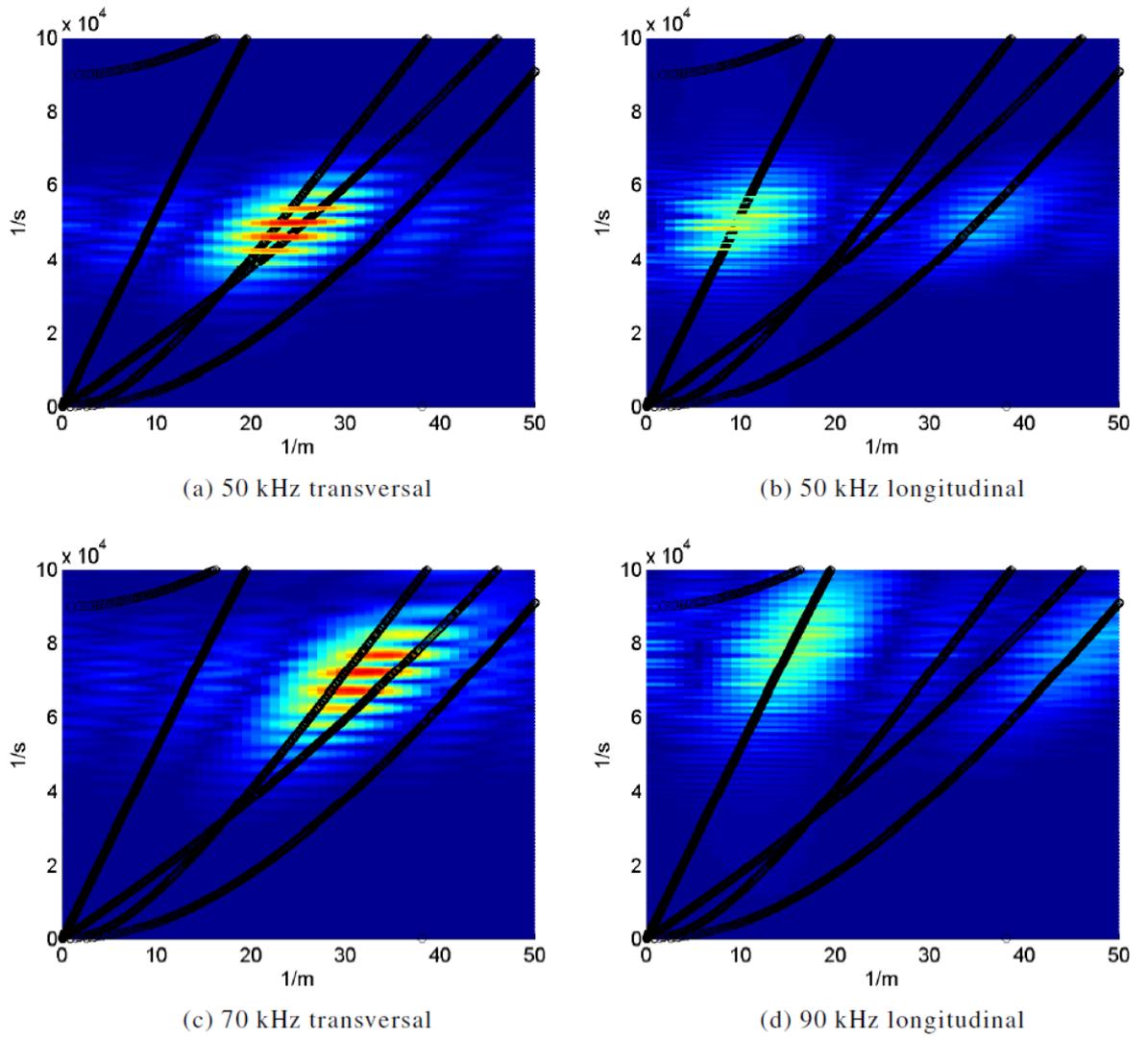


Figura 18 - Curvas de dispersión graficadas sobre las FFTs generadas a partir de los modelos numéricos [Groth, 2016].

4. METODOLOGÍA

4.1 Descripción de los métodos de obtención de las curvas de dispersión

En este trabajo se construyeron las curvas de dispersión por medio de dos métodos descritos a continuación, en primer lugar se aplicó el método axisimétrico a la barra rectangular para así obtener las curvas de dispersión de ella, y con el método de condiciones periódicas se comprobó que los resultados son coherentes con los obtenidos en Groth [2016]. Con esta comprobación, se realizaron los cálculos con el modelo axisimétrico para el perfil de riel, y se comprobaron en varios puntos y estudió cuál es el modo que predomina en estas.

4.1.1 Método que utiliza un modelo de elementos finitos Axisimétrico.

Este método consiste en modelar la sección transversal en análisis como un aro de gran radio ($R > 10L$, siendo R el radio adoptado y L una dimensión característica de la sección transversal estudiada).

Con las condiciones de simetría axial, el mismo puede ser resuelto por un modelo construido en elementos finitos axisimétrico [Boeraeve, 2010].

Los software comerciales de elementos finitos permiten calcular frecuencias naturales de vibración de un modelo axisimétrico, restringiendo el número de lóbulos en la dirección circunferencial que los modos asociados deben tener al vibrar. Esto es equivalente a encontrar frecuencias para un número de onda determinado, ver la ilustración en la Figura 19. Definiendo así líneas verticales de las curvas de dispersión que se está construyendo. Este método es explicado en detalle en Cegla [2008], y fue implementado en el sistema de elementos finitos diferencial ANSYS®. En estos casos resulta importante determinar el coeficiente C_{order} , que representa el número porque debemos dividir la longitud de la circunferencia del modelo axisimétrico analizado para poder determinar la longitud de onda λ definida como:

$$\lambda = \frac{2 \pi R}{C_{order}} \quad (4.1)$$

donde:

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (4.2)$$

Operando con estas dos ecuaciones es posible vincular C_{order} con el número de onda k de la siguiente forma:

$$C_{order} = kR \quad (4.3)$$

Realizando un análisis modal con un modelo axisimétrico, variando k dentro de los valores requeridos para el estudio y fijando el radio (R) de la simetría axial, de dimensiones mayores que las dimensiones de la sección transversal ($R > 10L$), se pueden obtener los valores de las frecuencias naturales de la estructura para cada valor de C_{order} , a partir del cual se obtendrían los puntos para cada valor de k de la curva de dispersión.

Graficando la nube de puntos obtenidos del estudio modal para cada valor de k y uniéndolos podemos generar las curvas de dispersión.

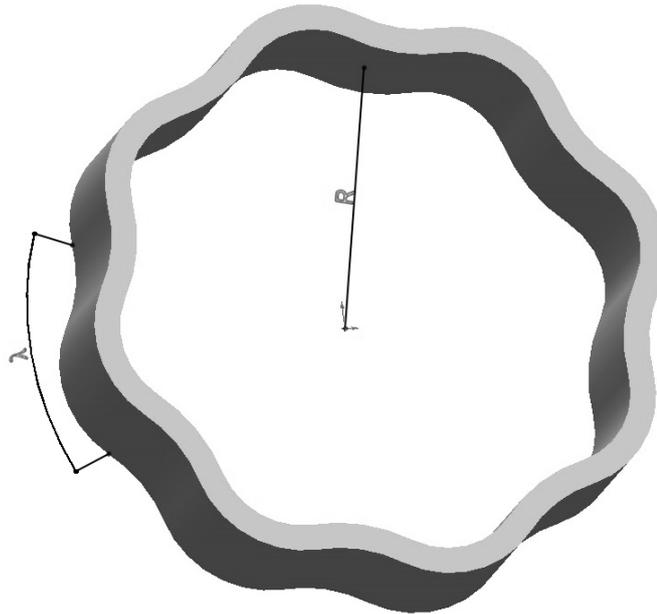


Figura 19 - Esquema del modelo axisimétrico [Groth, 2016].

Cuando fue aplicado este método al estudio del riel el modelo axisimétrico queda como se muestra en la Figura 17.

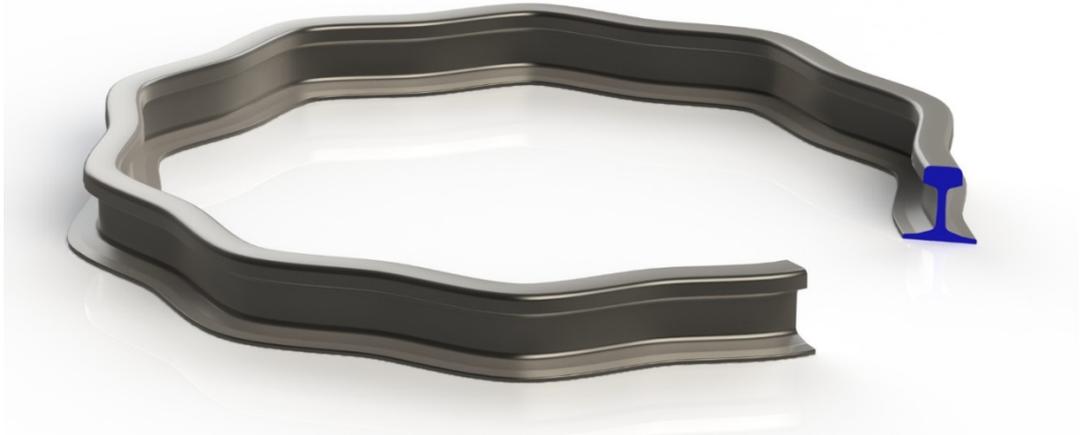


Figura 20 - Esquema del modelo axisimétrico para un riel.

Para automatizar el proceso de formación de las curvas de dispersión empleando el método que trabaja con el modelo axisimétrico se procede como se indica a continuación:

- 1) Entrada de datos referentes al dominio k [$kmin, kmax$], f [$fmin, fmax$] a analizar, como así también de las características del material y su geometría.
- 2) Entrada de archivo neutro generada en un CAD con las características de la sección transversal (en el presente caso fue empleado el SolidWork® y el archivo neutro fue extensión *.igs)
- 3) Creación de la malla de elementos finitos dentro del sistema ANSYS® (se utiliza el elemento PLANE83 con la opción axi-simétrico).
- 4) Dentro de un loop de $k=kmin, kinc, kmax$
 - a) Se calcula el parámetro C_{order} que restringe el dominio sobre el cual el programa va a calcular frecuencias naturales (esto equivale a fijar un valor de k)
 - b) Se extraen los autovalores dentro de este dominio para un rango de valores de f mínimo, f máximo especificado.
 - c) Se guardan las frecuencias obtenidas en el análisis para cada valor de k asociado en un archivo *.txt.
 - d) Termina el loop de “4”
- 5) Guarda el archivo de configuración (*.txt).

En los ANEXOS A y C se presenta el script para ser utilizado en el ANSYS® que permite calcular las curvas de dispersión.

Para el cálculo de la sección rectangular, se ha utilizado el elemento PLANE25, este está definido por cuatro nodos que tienen tres grados de libertad por nodo: trasladados en la

dirección x , y , y z nodal. Para coordenadas nodales sin rotar, estas direcciones corresponde a las direcciones tangenciales radial, axial.

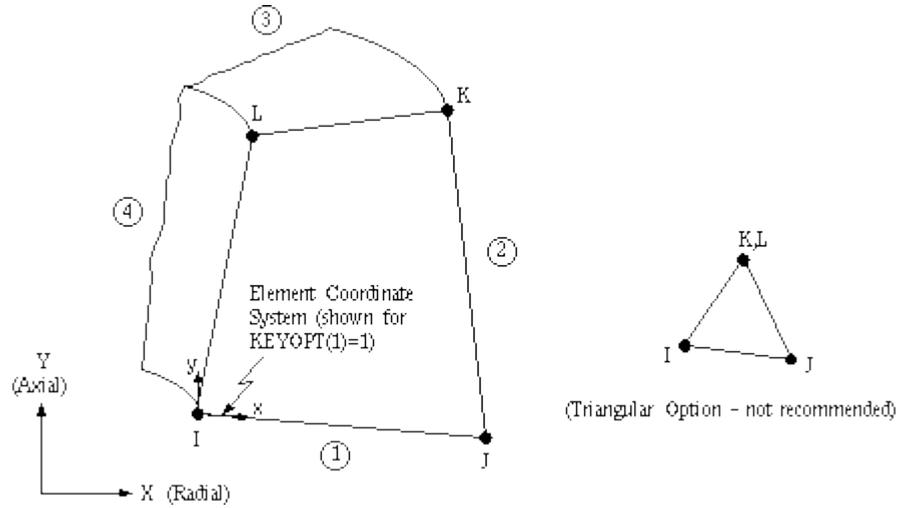


Figura 21 - Elemento PLANE25, utilizado en la metodología 1 para calcular las curvas de dispersión de la sección rectangular [Ansys, 2009]

En el caso de la sección del riel el tipo de elemento utilizado es el PLANE83, el cual se observa en la Figura 22, se define con 8 nodos y seis grados de libertad por nodo.

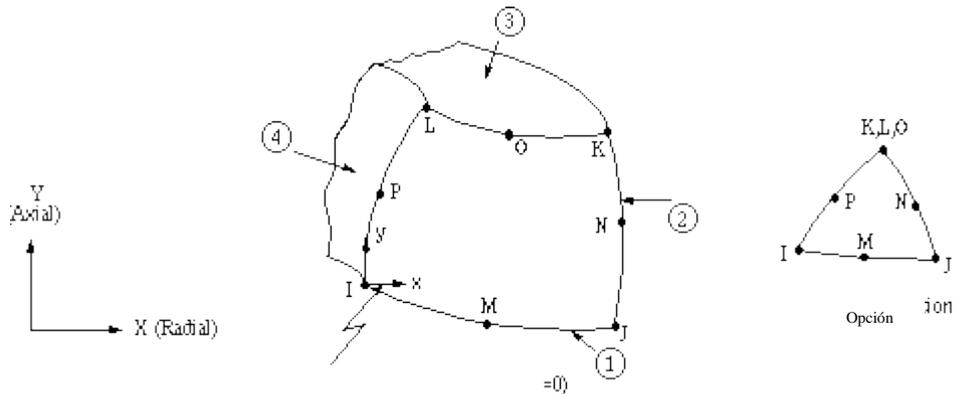


Figura 22 - Elemento PLANE83, utilizado en la metodología 1 para calcular las curvas de dispersión del riel en estudio [Ansys, 2009]

4.1.2 Método que utiliza un modelo de elementos finitos tridimensional con condiciones de contorno periódicas simétricas y anti simétricas

Esta segunda metodología consiste en calcular modos y frecuencias de la guía de onda, aumentando o disminuyendo su longitud y colocando en sus extremos condiciones de contorno periódicas simétricas y anti-simétricas de modo a permitir que aparezcan los modos correspondientes a las ondas modales buscadas.

Estas condiciones de contorno hacen que el acoplamiento entre los desplazamientos de las caras del modelo como se aprecia en la Figura 18. El desplazamiento de la cara A va a tener un deslizamiento igual al de la cara B, o el deslizamiento de la cara A será igual al de B en módulo, pero en sentido opuesto.

Las condiciones de contorno periódicas (simetría) son aplicadas en el modelo en las caras de las secciones extremas, de manera que cada nodo de la cara A tenga su respectivo par de la cara B y ambos estén acoplados.

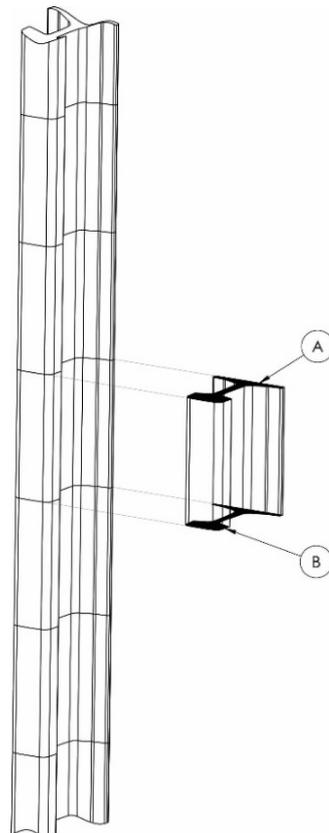


Figura 23 - Detalle de las caras A y B, para modelo de condiciones periódicas.

Aplicando las condiciones de contorno periódico simétrico o anti simétricos sobre los extremos del perfil y calculando sobre el modelo así definido modos y frecuencias es posible por inspección encontrar las frecuencias y modos correspondientes a puntos de las curvas de dispersión generadas con el otro método.

En la práctica, la determinación de cada uno de los puntos de la curva de dispersión depende de un análisis visual de cada uno de los modos calculados. El objetivo del método consiste, con las condiciones de contorno impuestas, en hacer que el modelo imite el comportamiento de las ondas guiadas, para una determinada longitud de onda. La gran ventaja de esta metodología es la posibilidad de visualizar el modo de propagación en un modelo 3D; la desventaja está en la dificultad de la automatización del método.

Por lo mencionado anteriormente, con este método no se obtuvieron las curvas de dispersión, sino solo puntos característicos de la misma para poder visualizar los modos asociados a las curvas de dispersión obtenidas con el método basado en el modelo axisimétrico anteriormente explicado.

En los ANEXOS B y D se presenta el script para ser utilizado en el ANSYS® que permite calcular las curvas de dispersión.

4.2 Simulación Numérica, en el software Ls-Dyna, de una guía de ondas sobre la cual se aplica una excitación tipo Toneburst

Para la simulación de la propagación de la onda por el riel se utilizó el solver de dinámica explícita del LS-DYNA, con el LS-PrePost de la empresa LSTC® el cual permite generar el archivo *.k entrada del solver de elementos finitos de integración explícita del LS-DYNA.

Para resolver este problema se debe proceder de la siguiente forma:

- 1) Generar la geometría. En el caso de la barra se genera la sección rectangular, y para el riel se importa la sección del *.igs y luego se extruda la sección importada.
- 2) Se crea el mallado, definiendo el tamaño del elemento. (Figura 24 y Figura 25)
- 3) Se cargan las propiedades del material.
- 4) Se aplican las restricciones (se restringió todos los grados de libertad en la cara opuesta a donde la carga fue aplicada).
- 5) Se selecciona y aplica la carga en la sección extrema de la barra (como es una onda, el valor de la carga es unitario), (Figura 26)
- 6) Se configura donde se desea conocer la respuesta, (valores de desplazamientos en las tres direcciones en los puntos situados en la línea roja indicada en la Figura 14 durante el tiempo que de la simulación. Figura 27)

BS85A 10m TONE BURST

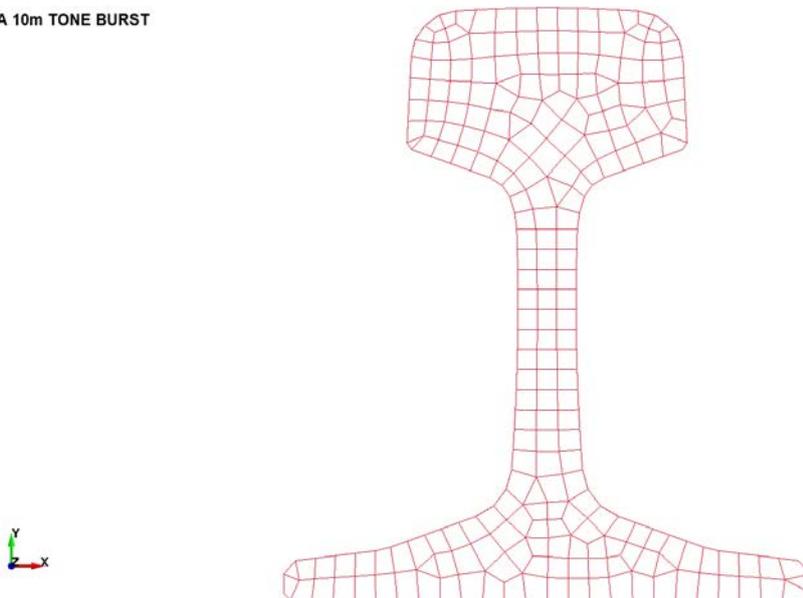


Figura 24 - Mallado de la sección del perfil utilizado para la simulación numérica.

BS85A 10m TONE BURST

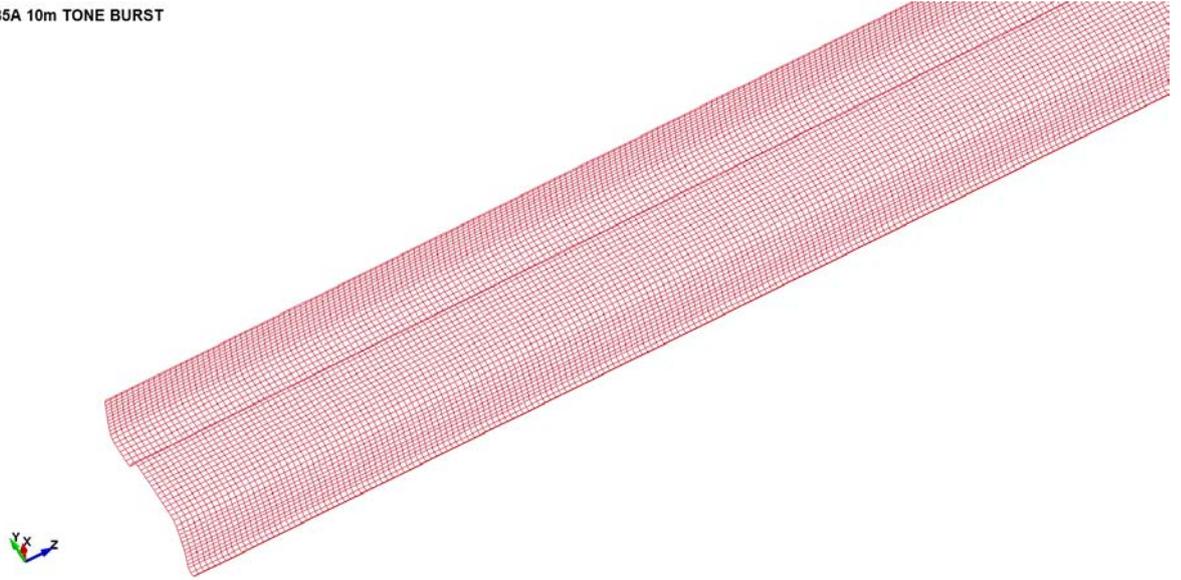


Figura 25 - Mallado 3D del riel utilizado para la simulación numérica.

BS85A 10m TONE BURST



Figura 26 - Carga aplicada en la toda la sección del perfil.

BS85A 10m TONE BURST



Figura 27 - Esquema del lugar geométrico, donde se estudian los desplazamientos de los nodos.

La respuesta de los valores de desplazamiento en los puntos localizados sobre la línea roja indicada en las Figura 16 y Figura 17 durante el tiempo de la simulación, permite generar una matriz de valores; esta matriz, que se esquematiza en la Figura 28 puede ser modificada aplicándole una transformada rápida de Fourier en el dominio de la frecuencia y en el dominio espacial. De esta forma, es posible presentar los resultados en el mismo dominio de las curvas de dispersión.

El análisis de señales que contienen más de un modo de propagación es a veces complejo de hacer viendo un único punto por donde pasa la onda, en la práctica, la señal obtenida viendo un único punto, genera información oculta por la sobre posición de los modos generados. Una solución posible es realizar el análisis mediante el análisis por la doble transformada de Fourier en dos direcciones, pues de esta, tiene la capacidad de revelar los modos propagados aunque ellos estuvieran superpuestos. En la Figura 28 se esquematiza este proceso.

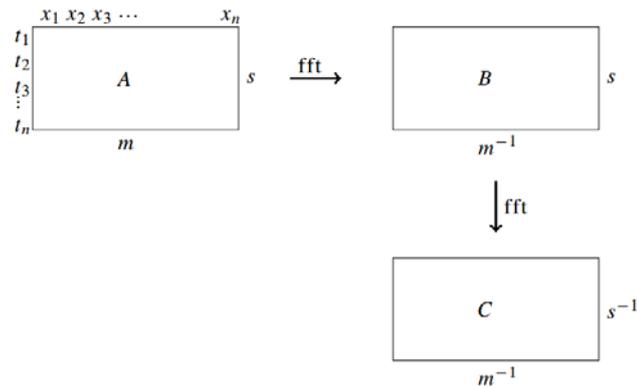


Figura 28 - Esquema de FFT2d

En la Figura 28 podemos ver un esquema de cómo es generada una FFT2d. Donde A representa los datos (experimentales o numéricos) organizados en una matriz donde la primera columna contiene los desplazamientos en el tiempo del punto con posición x_1 , la segunda de x_2 y así sucesivamente, B representa la matriz después de la aplicación de la transformada de Fourier en la dirección del tiempo y C representa la matriz con la FFT aplicada sobre las dos direcciones. Graficando esta matriz C en el mismo dominio que las curvas de dispersión es posible saber cuáles son las ondas modales excitadas en una determinada propagación [Groth, 2016].

4.3 Función de Toneburst

La función de Toneburst es muy utilizada en los END por propagación de ondas de tensión. Esta función consiste en una armónica modulada por una envolvente que puede ser función de Gauss o un coseno de frecuencia menor. La característica de esta perturbación es una excitación de una franja de frecuencias conocidas, y de esta manera la excitación de un modo específico de la guía de onda, pues cada línea modal de las curvas de dispersión tiene sus frecuencias de activación. Dos variables de esta función son definidas cuando se va a utilizar una Toneburst, la frecuencia, que va a ser la frecuencia central de la franja contenida en la Toneburst, y la otra variable es el número de ciclos, esta variable es regulada por el tamaño de la envolvente. La Figura 29 presenta una función Toneburst, de 5 ciclos. Más información sobre cómo seleccionar en forma adecuada la función Toneburst se puede encontrar en Alleyne e Cawley, 1991.

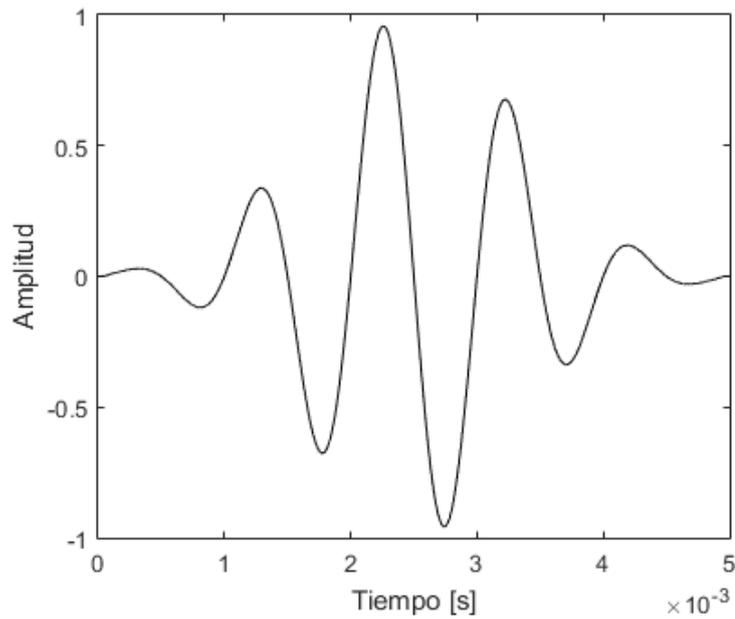


Figura 29 - Función Toneburst, 5 ciclos.

4.4 Paquetes comerciales de elementos finitos

En esta sección se presentaran las herramientas utilizadas para la realización de las simulaciones numéricas y el tratamiento de los datos obtenidos.

Una de las herramientas utilizadas en la investigación de la propagación de ondas de tensión en barras, ahora en estudio, son los paquetes comerciales de simulación mecánica por elementos finitos, fueron utilizados los software ANSYS[®] APDL, Ls-Dyna, en conjunto con Matlab[®], siguiendo dos líneas principales: modelos semi-analíticos asociados a la confección de las curvas de dispersión y modelos numéricos por integración explícita. Los resultados obtenidos con los dos tipos de simulación se mostraron coherentes con la bibliografía, como se verá en la sección 5.

5. APLICACIONES

5.1 Cálculo de las curvas de dispersión por las dos metodologías presentadas para el caso de una barra de sección rectangular

El método basado en el modelo axisimétrico de la guía de ondas que fue implementado contiene las siguientes características: se ha dejado fijo el radio en un valor determinado por los parámetros de cálculo, para nuestro caso particular $R=5$ m y se ha hecho variar k , entre un valor mínimo de $0,2 \text{ rad/m}$ un valor máximo de 350 rad/m , el intervalo de variación de k es de $0,2 \text{ rad/m}$. El tipo de elemento utilizado es PLANE25 del ANSYS®.

Aplicando esta metodología son calculadas las curvas de dispersión entre 0 y 100 kHz los resultados obtenidos fueron comparados con los obtenidos por Groth, 2016, esta comparación es presentada en la Figura 30.

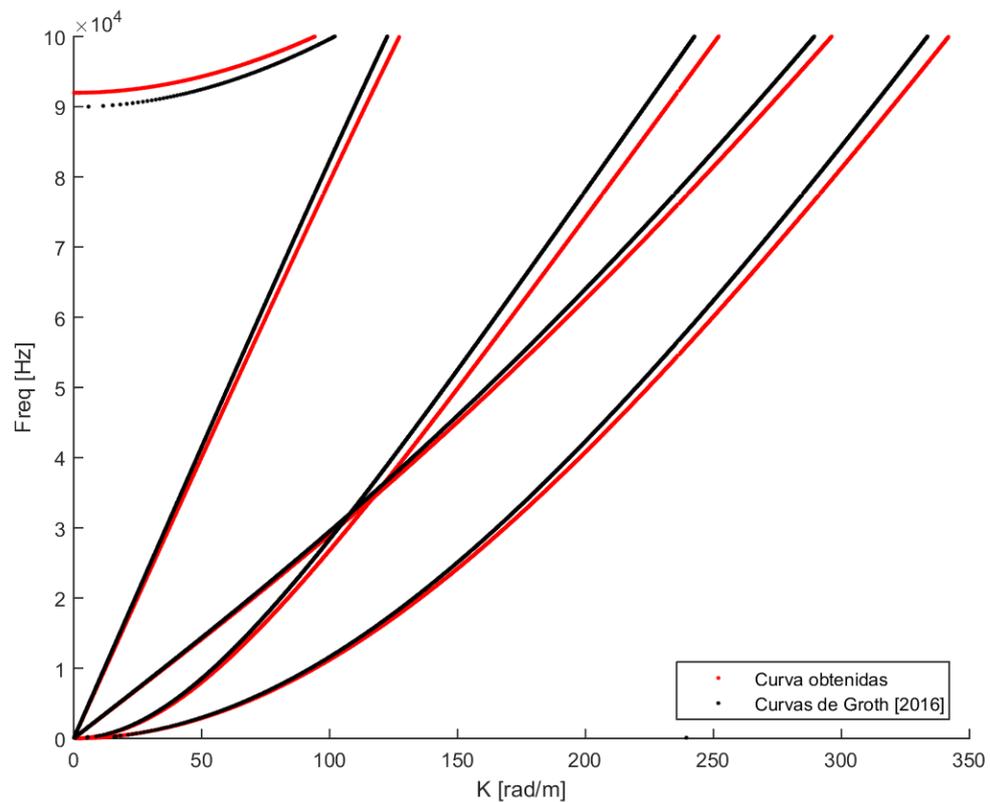


Figura 30 - Gráfica de las curvas obtenidas por Groth, 2016 superpuestas con las generadas en el presente trabajo.

Como puede observarse en la Figura 30, se trabajó con un método numérico llegando a resultados similares, la diferencia entre los dos métodos se consideró razonable. El método utilizado por Groth para el cálculo de las curvas consistió en modelar con elementos finitos la figura en el plano del modelo y emplear series armónicas en la dirección de la guía de ondas. Detalles sobre este método de cálculo se pueden encontrar en Groth, 2016.

En la Figura 31 se indican nuevamente las curvas de dispersión calculadas y en los puntos indicados son calculadas las configuraciones deformadas de las ondas modales. De la Figura 32 a la Figura 36 se presentan las formas de las ondas modales en cada uno de los puntos marcados en la Figura 31, obtenidas utilizando la metodología basada en considerar un modelo de elementos finitos tridimensional con condiciones de contorno periódicas.

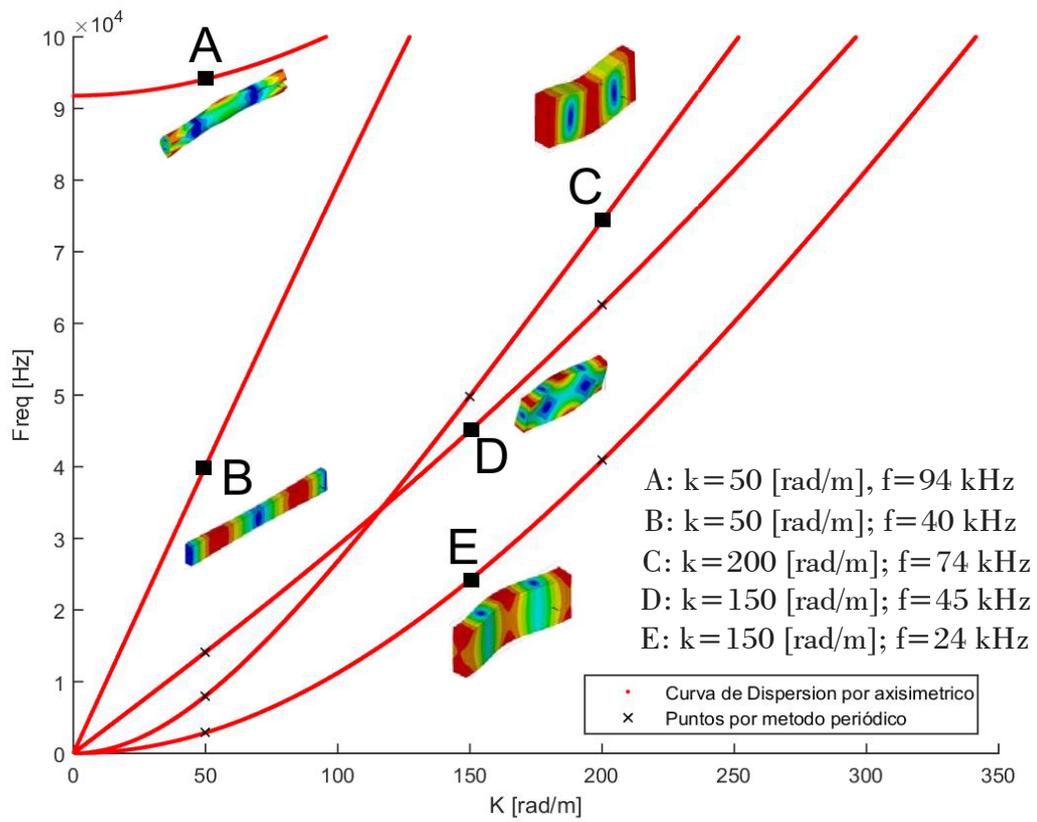


Figura 31 - Curvas de dispersión para la barra rectangular.

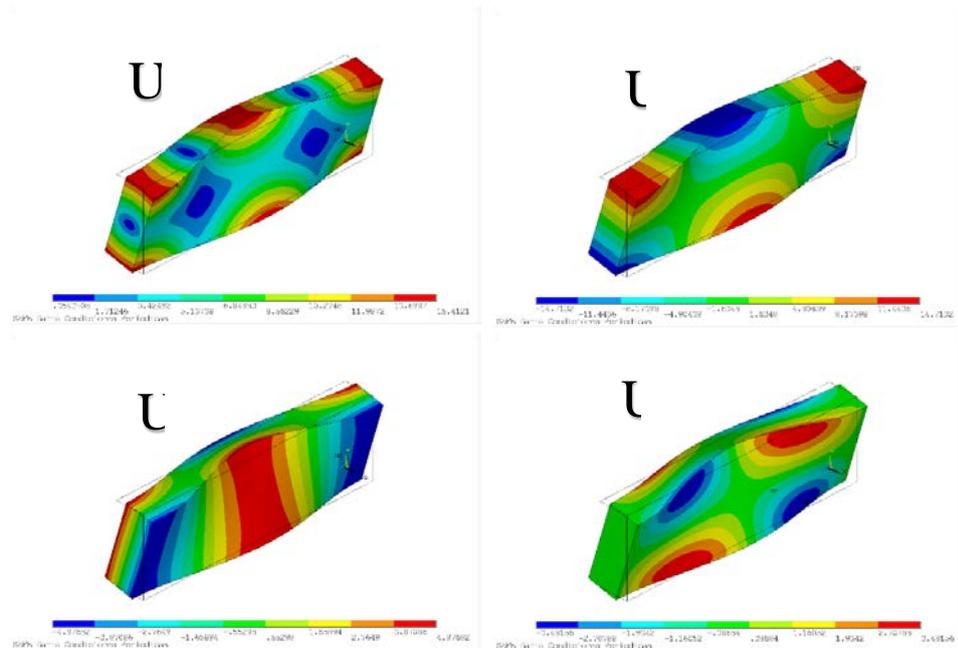


Figura 32 - Punto de control por método de condiciones periódicas (Modo Torsional; Punto D [$k=150$ rad/s, $f=45$ KHz])

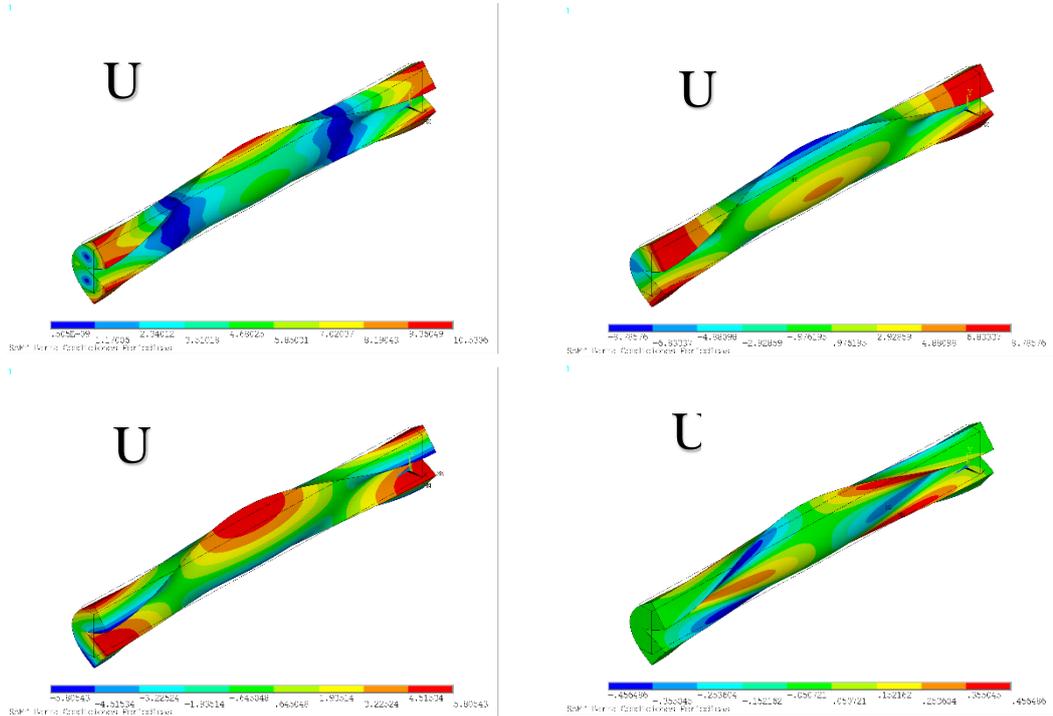


Figura 33 - Punto de control por método de condiciones periódicas
(Modo Lamb; Punto A [k=50, f=94.3KHz])

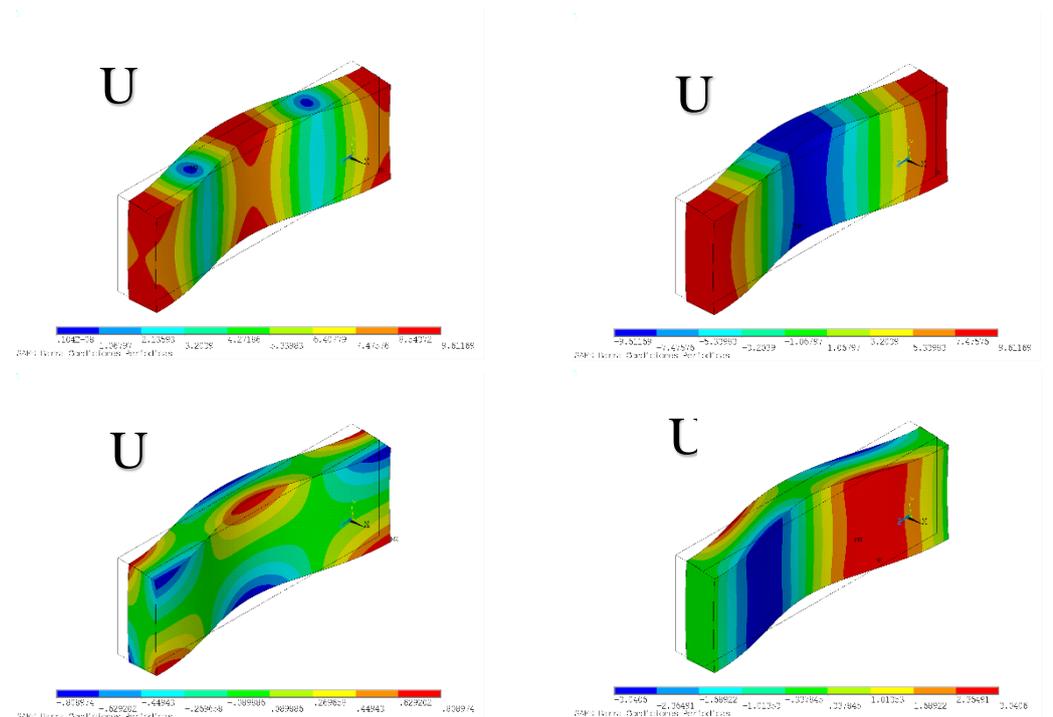


Figura 34 - Punto de control por método de condiciones periódicas
(Modo Flexión en Y; Punto E [k=150rad/s, f=24.2KHz])

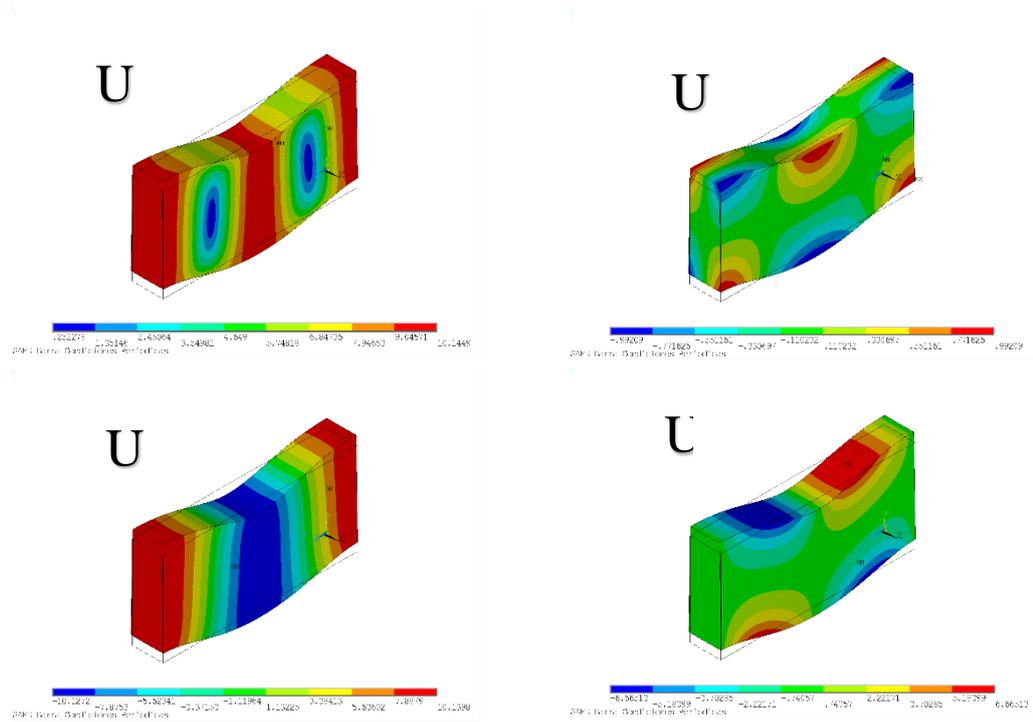


Figura 35 - Punto de control por método de condiciones periódicas
(Modo Flexión en X; Punto C [200,74KHz])

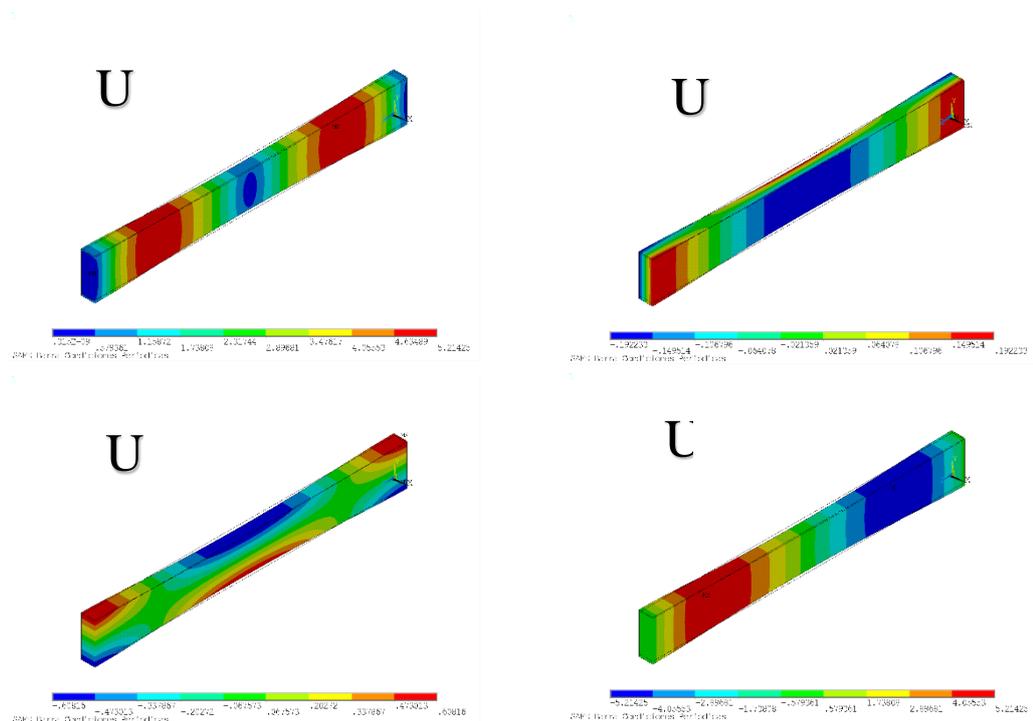


Figura 36 - Punto de control por método de condiciones periódicas
(Modo Tracción/Compresión; Punto B [k=50, f=40KHz])

Verificando de esta manera que los resultados obtenidos son coherentes con los obtenidos por Groth, 2016, y mostrando que las dos metodologías aplicadas para calcular las curvas de dispersión están funcionando correctamente, a continuación se aplican los dos métodos presentados aplicados en la construcción de la curva de dispersión de la sección de un riel.

Estas curvas fueron construidas con el script de ANSYS®, que está presentado en el ANEXO I, y los modos obtenidos con el modelo de condiciones periódicas, cuyo script se encuentra en el ANEXO II.

5.2 Cálculo de curvas de dispersión en un perfil de riel tipo 42,18 kg/m - Perfil B.S.85 A

En la implementación del método basado en el método axisimétrico se ha dejado fijo el radio en un valor determinado por los parámetros de cálculo, para nuestro caso particular $R=1050$ m se ha hecho variar k entre un valor mínimo de $0,01$ rad/m y un valor máximo de 350 rad/m , el intervalo de variación de k es de $0,01$ rad/m .

Los resultado de las frecuencias encontradas entre las frecuencias máximas y mínimas establecidas para cada valor de k son graficados en conjunto lo cual permite visualizar las curvas de dispersión.

El contorno del perfil es introducido como output de un archivo neutro, (*.igs), de esta manera podemos, a través de este tipo de archivos, importar directamente cualquier perfil que sea requerido para su estudio. En el capítulo de metodología de un pseudocódigo se explica la forma de proceder y en los ANEXOS III y IV se presenta el script para ser utilizado en el ANSYS® que permite calcular las curvas de dispersión.

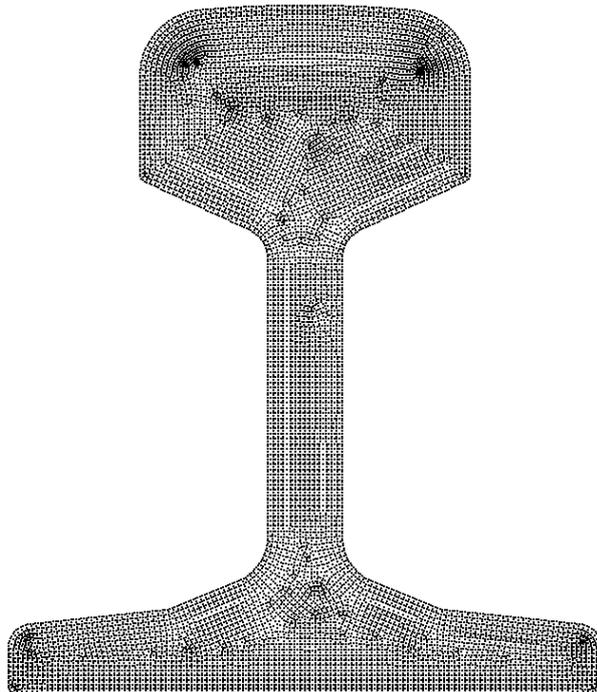


Figura 37 - Mallado aplicado con el elemento PLANE83.

Los parámetros de cálculo son los siguientes:

Tabla 1 - Propiedades y características utilizadas para generar la curva de dispersión del perfil de riel.

Nomenclatura	Valor	Descripción	Unidad
E	210e9	Módulo de Young's	N/m^2
ν	0.3	Coefficiente de Poisson	Ad
ρ	7850	Densidad	N/m^3
R	1050	Radio de Simetría	m
T	0.001	Tamaño característico del elemento	m
N_{mod}	100	Cantidad de Modos calculados	ad
K_{min}	0.01	Numero de Onda Mínimo	rad/m
K_{max}	350	Numero de Onda Máximo	rad/m
K_{inc}	0.01	Intervalo de Numero de Onda	rad/m

A partir de todos estos parámetros y características definidas previamente se construyó la gráfica de la Figura 39 que muestra las curvas de dispersión para este caso. En la Figura 38 se presenta también una curva de dispersión obtenida por Heese [2005] de un perfil de riel de geometría diferente, pero es posible visualizar la forma similar de las curvas cuando son comparadas con las obtenidas en este trabajo.

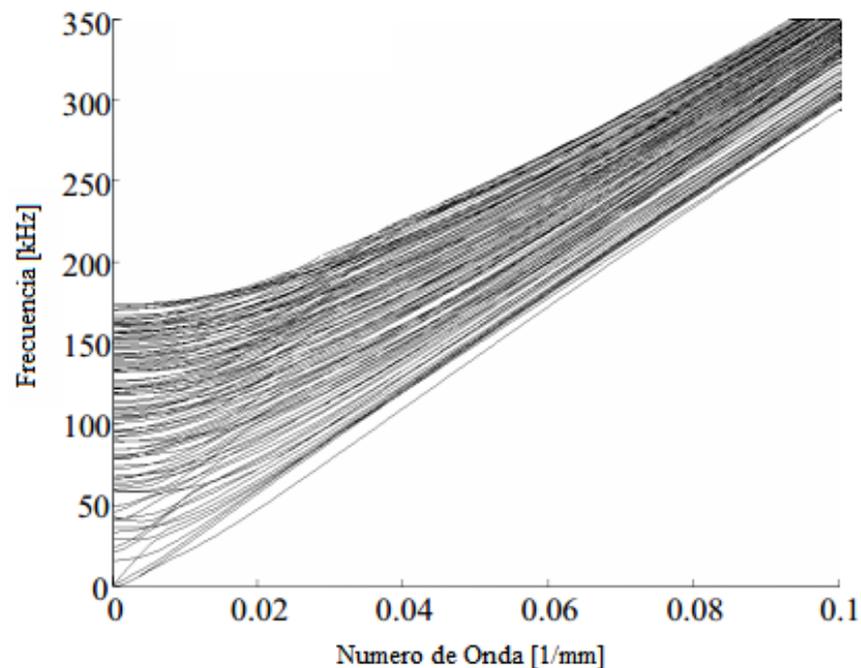


Figura 38 - Curvas de dispersión para un riel nuevo [Heese 2005].

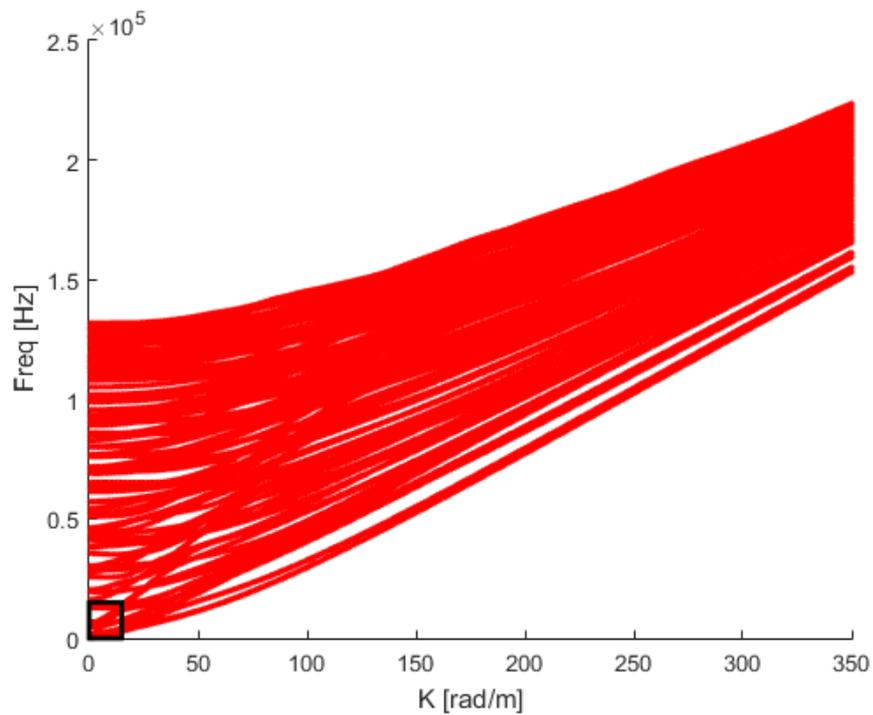


Figura 39 - Curvas de dispersión riel BS85 A generadas por el modelo Axisimétrico.

En la Figura 41 se presentan las curvas de dispersión del riel calculadas en el dominio de velocidad de fase vs frecuencia.

Para obtener las curvas de dispersión, en el dominio de velocidad de fase vs frecuencia (C_0 vs f), se calcula por medio de las ecuaciones (2.11) y (2.13), que combinándola queda:

$$C_0 = \frac{2\pi f}{K} \quad (5.1)$$

De esta manera, los valores obtenidos, son calculados en el dominio de la velocidad y frecuencia, donde para cada par de valores ($f; k$), se obtiene un nuevo par de valores ($v; f$).

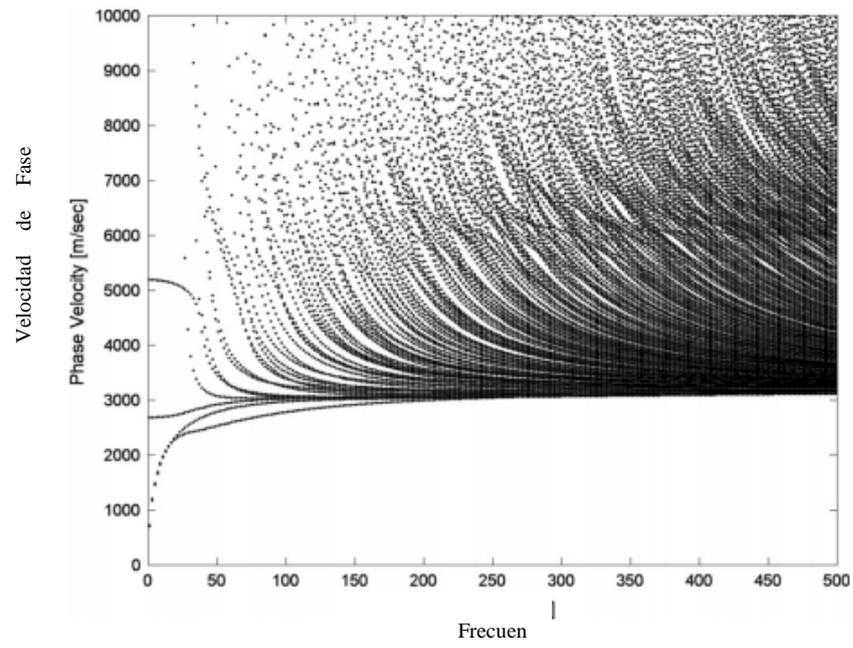


Figura 40 - Curvas de dispersión para un riel tipo AREMAS 115lb [Coccia y col. 2011].

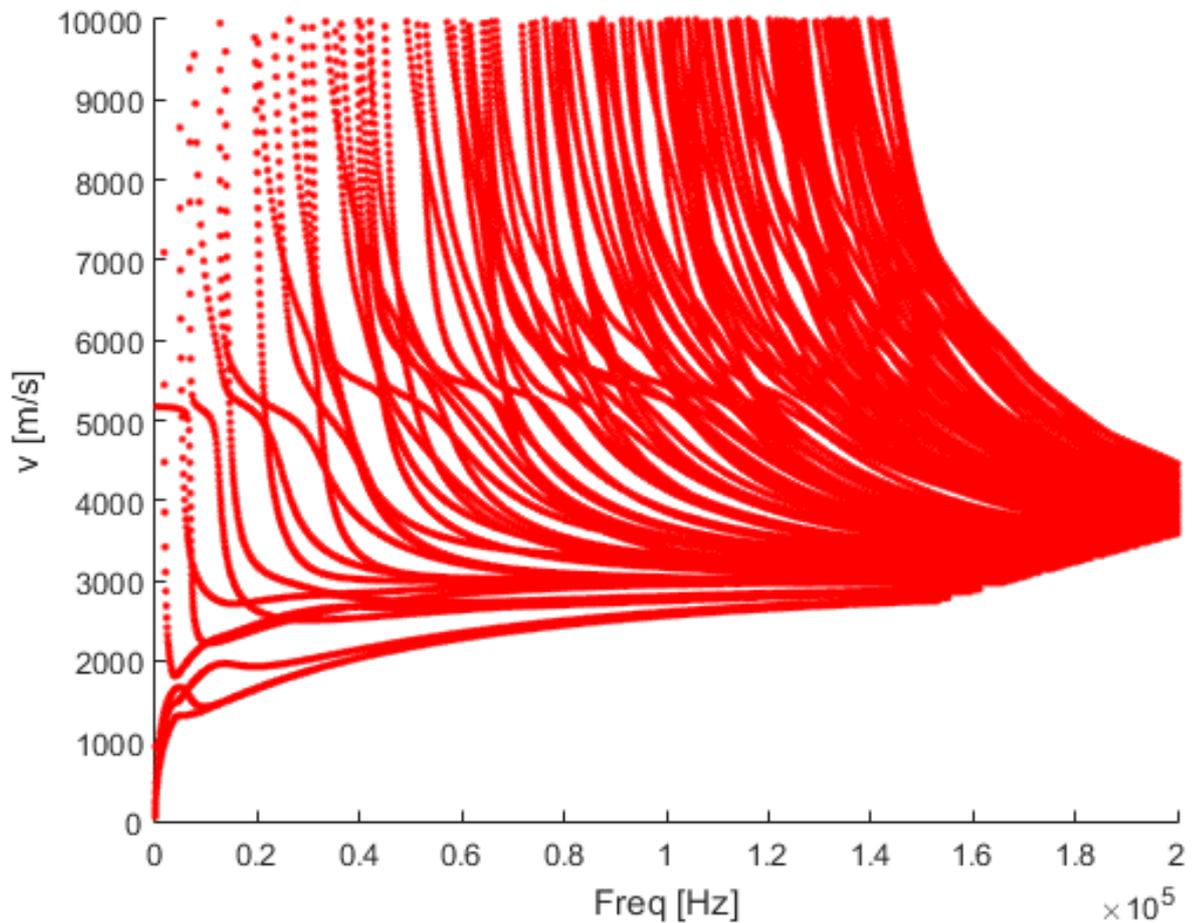


Figura 41 - Curvas de dispersión riel BS85 A generadas en este trabajo por el método Axi-simétrico.

Podemos ver en esta gráfica la gran cantidad de curvas de dispersión que visualizamos si realizamos el cálculo en un dominio muy grande de k y f . Para poder realizar un estudio más profundo de las posibilidades de propagación en este tipo de perfil, restringimos el estudio a un rango de f , k menor, (observar la ventana indicada en la Figura 39). En el intervalo de frecuencias entre 0 y 10 kHz, con k entre 0,1 y 15 rad/m, ya que se generan estas curvas de dispersión. El cálculo de esta región localizada de las curvas de dispersión se presenta en la Figura 42.

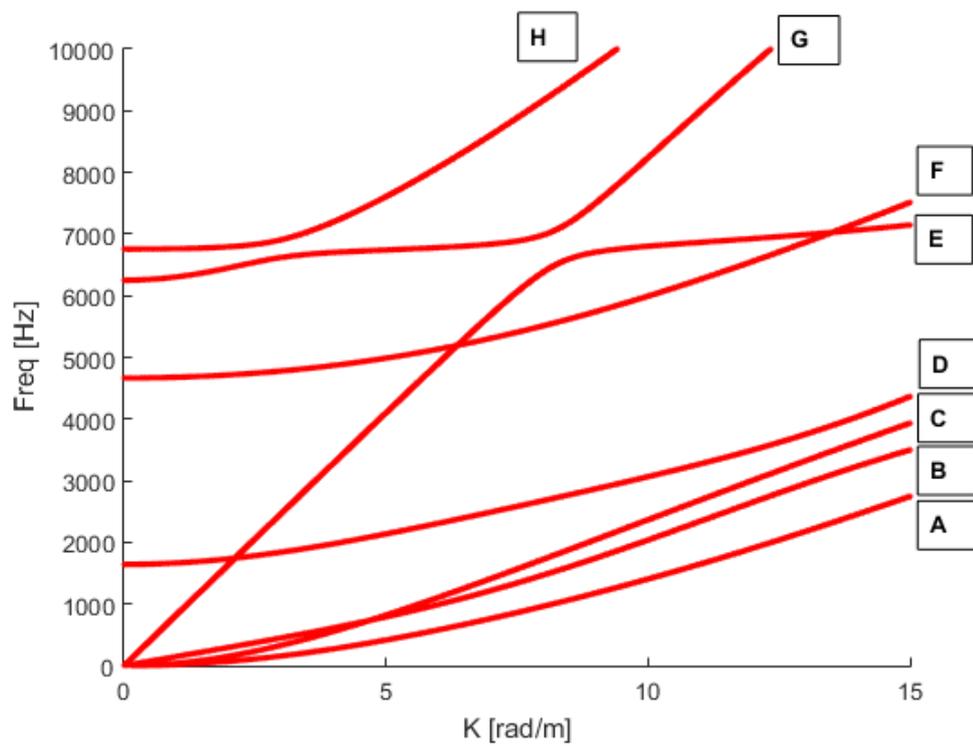


Figura 42. Curvas de dispersión riel de 42,18kg/m - Perfil B.S. 85 A. (Zoom ver Figura 39)

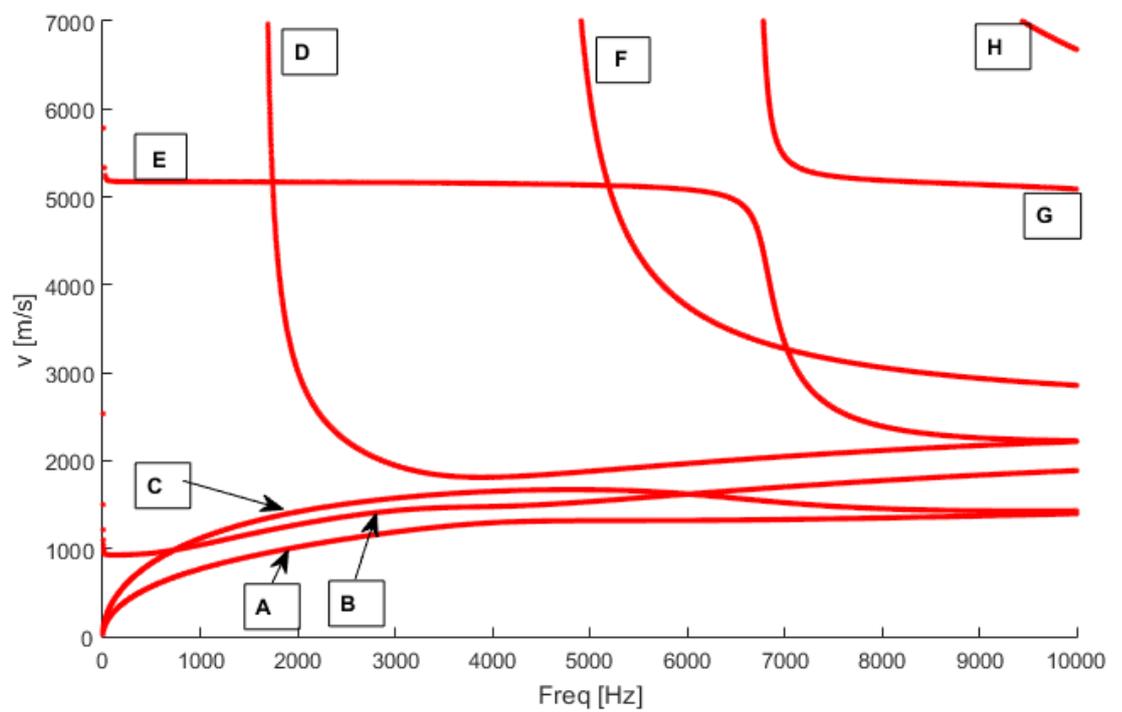


Figura 43 - Curvas de dispersión riel de 42,18kg/m - Perfil B.S. 85 A, en el dominio (C_o vs. f)

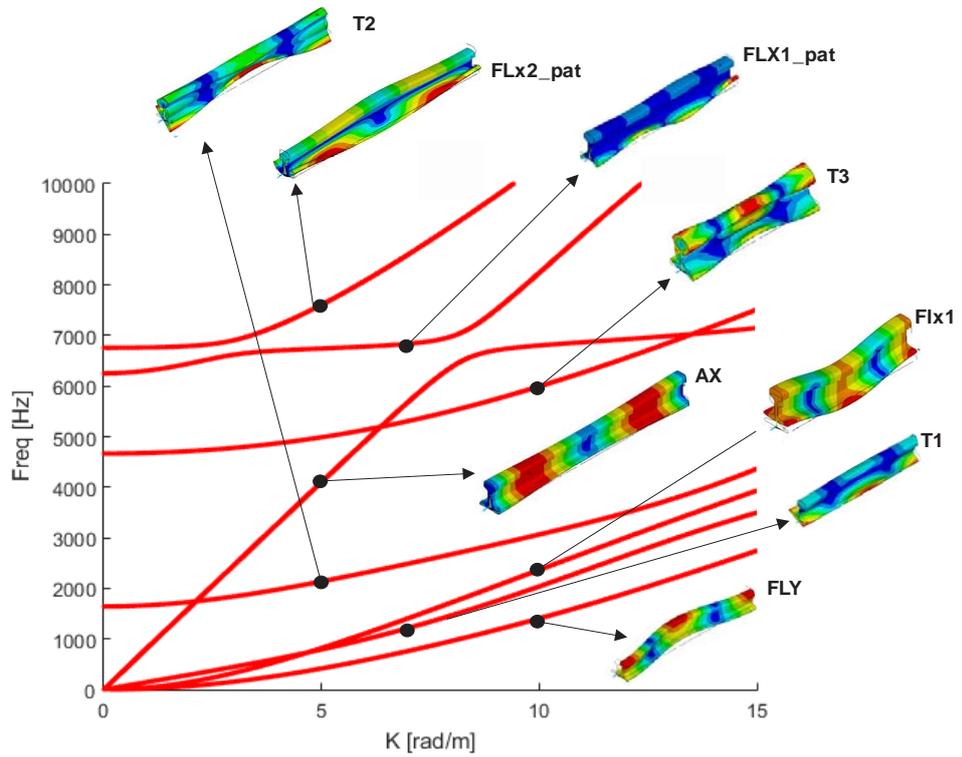


Figura 44 - Curvas de dispersión riel de 42,18kg/m - Perfil B.S. 85 A generadas por condiciones periódicas.

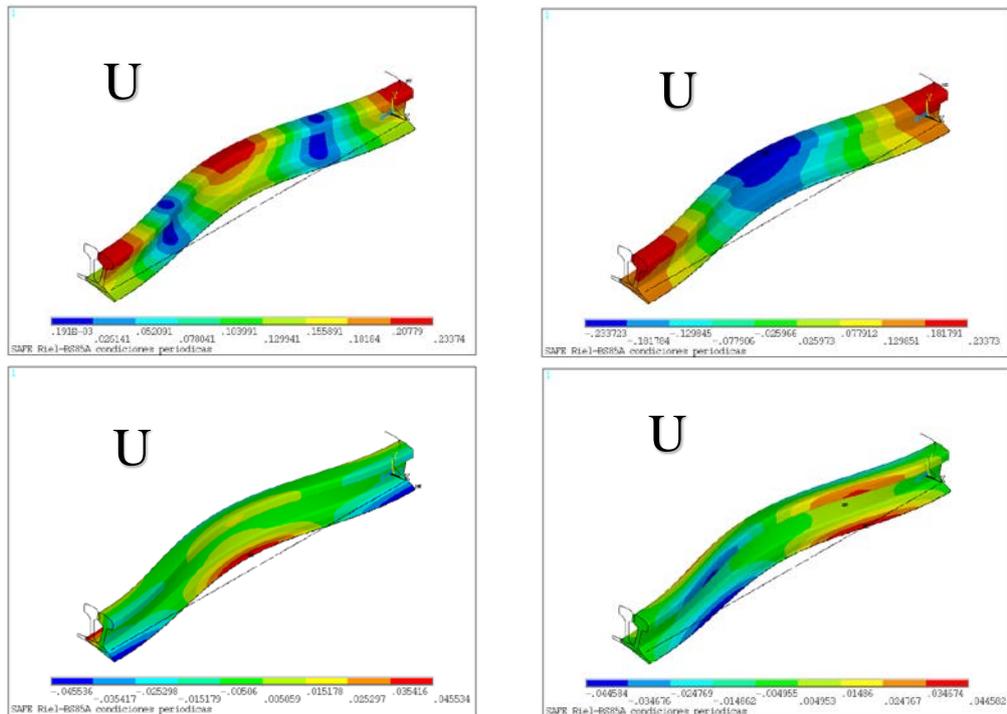


Figura 45 - Punto de control condiciones periódicas
(Modo donde gobierna flexión del perfil respecto al eje Y (FLY); Punto [k=10rad/m, f=1.40kHz])

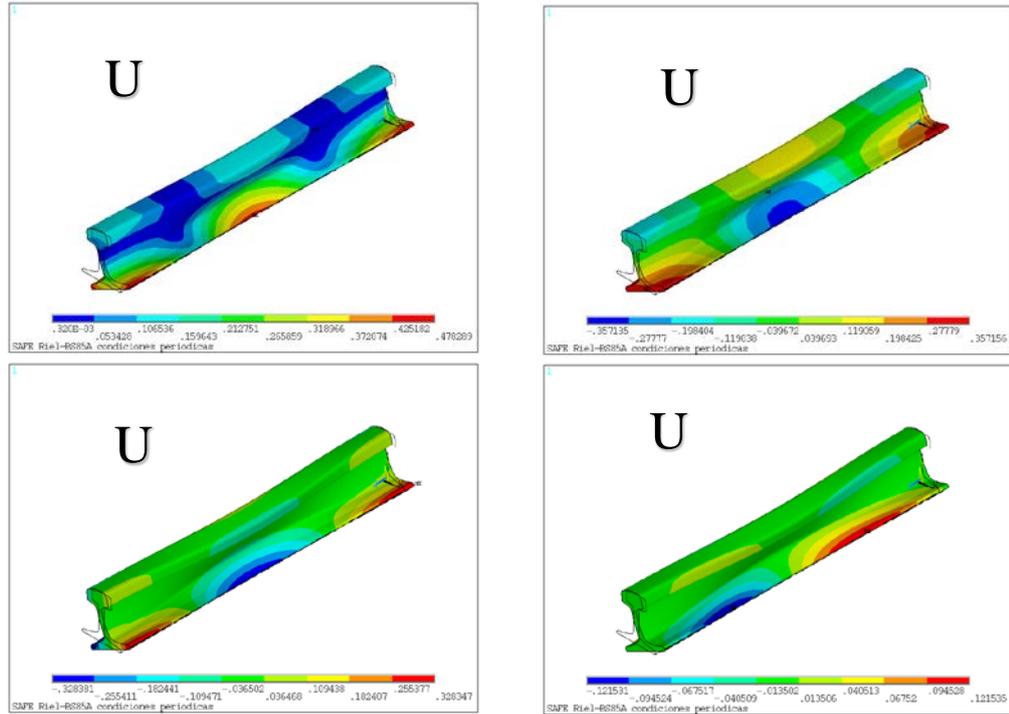


Figura 46 - Punto de control por método de condiciones periódicas
(Gobierna torsión del perfil (T1); Punto $[k=7\text{rad/m}, f=1.22\text{kHz}]$)

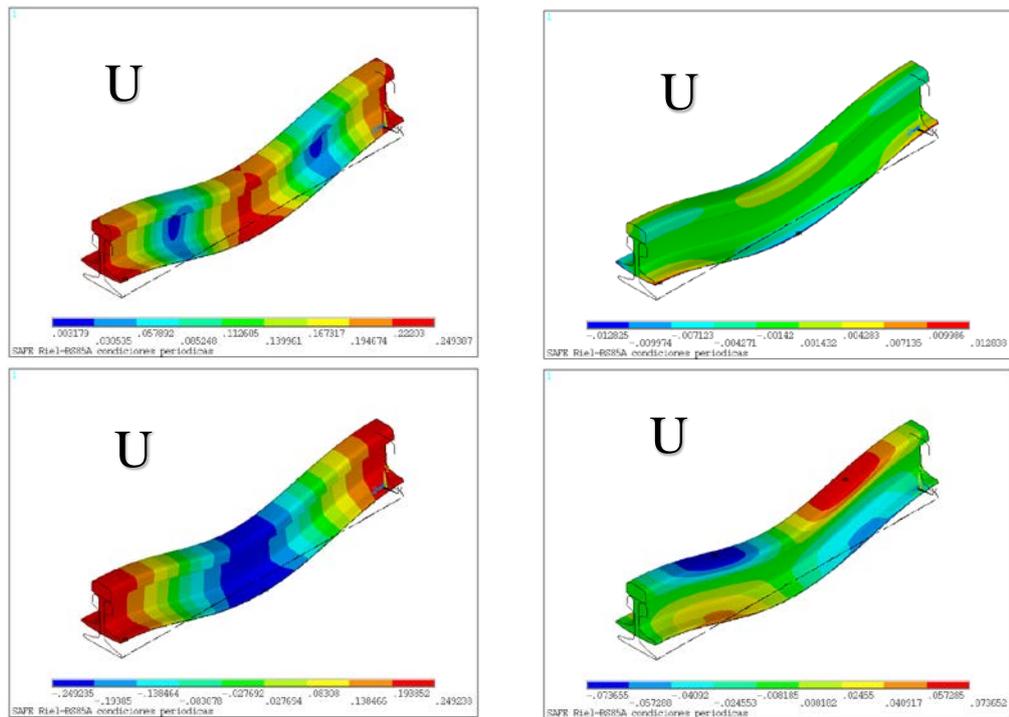


Figura 47 - Punto de control por método de condiciones periódicas
(Gobierna flexión del perfil en torno al eje x (FLX); Punto $[k=10\text{rad/m}, f=2.36\text{kHz}]$)

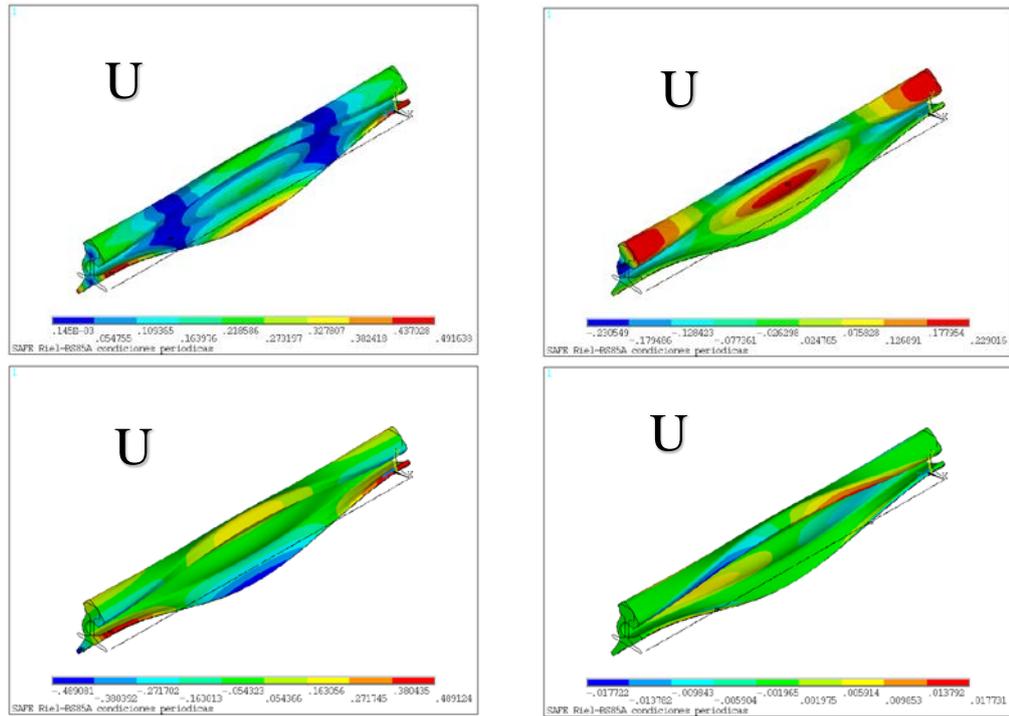


Figura 48 - Punto de control por método de condiciones periódicas
(Gobierna modo torsional del perfil (T2); Punto [k=5rad/m, f=2.14kHz])

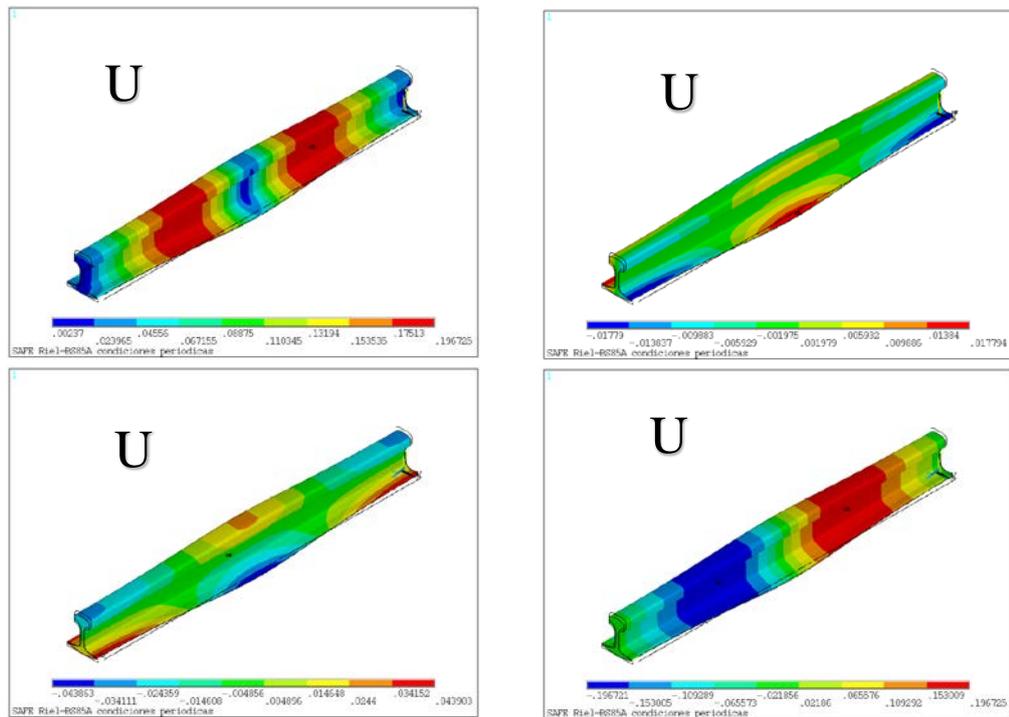


Figura 49 - Punto de control por método de condiciones periódicas
(Gobierna modo axial del perfil (Ax); Punto [k=5rad/m, f=4.09kHz])

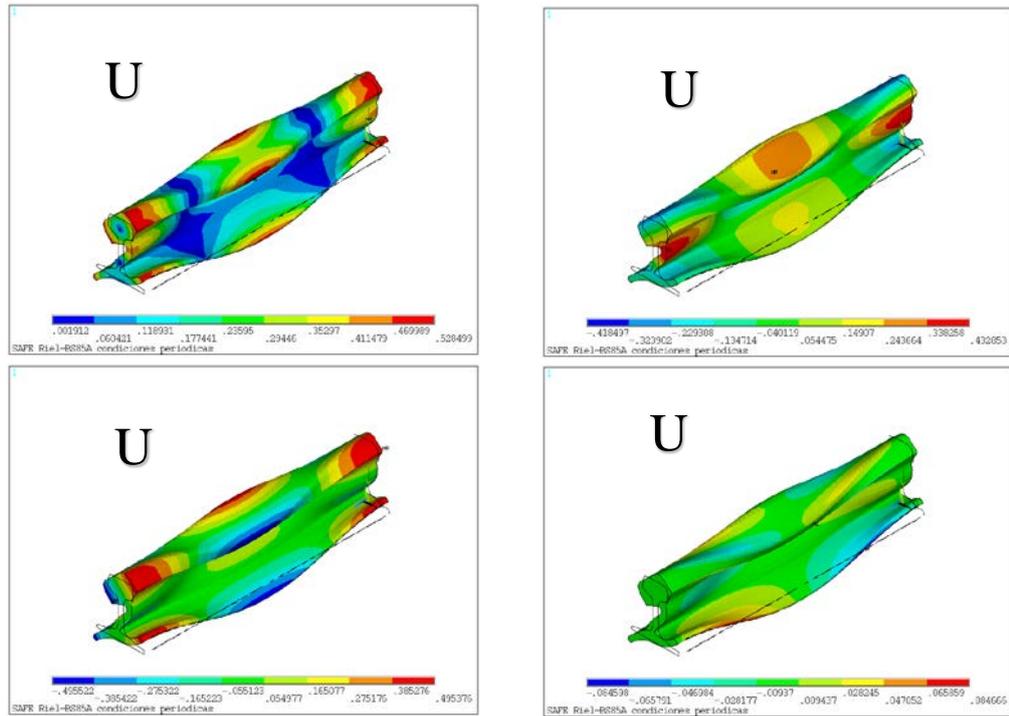


Figura 50 - Punto de control por método de condiciones periódicas
(Gobierna modo de torsión del perfil (T3); Punto [k=10 rad/m, f=6.00 kHz])

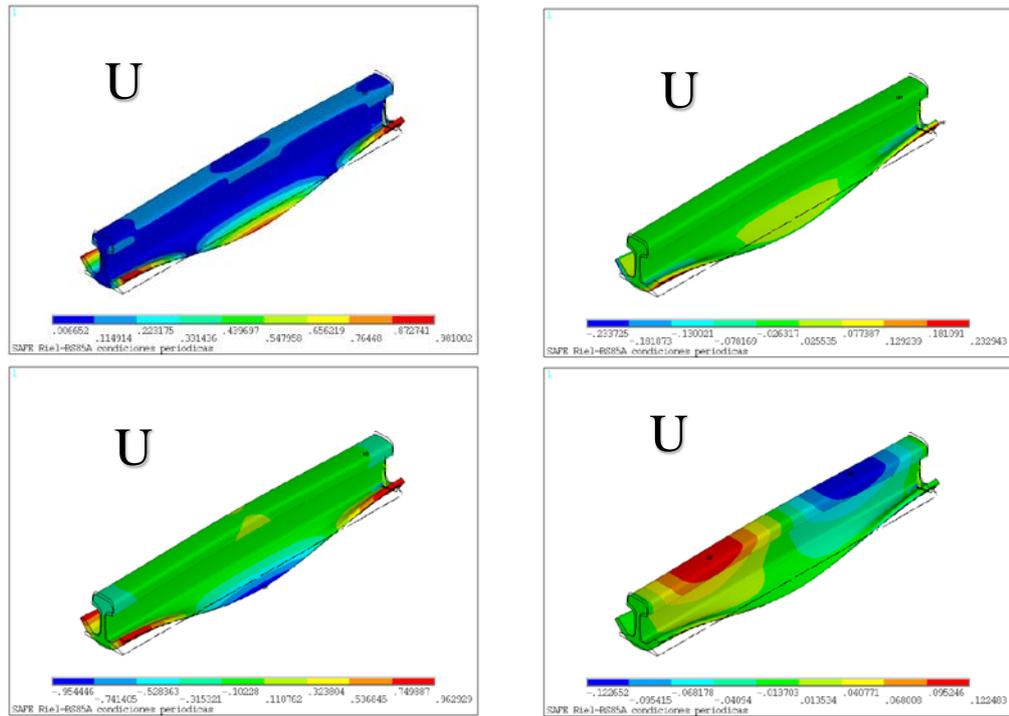


Figura 51 - Punto de control por método de condiciones periódicas
(Gobierna modo de flexión del patín en torno del eje x (FLx1_pat); Punto [k=7 rad/m, f=6.85 kHz])

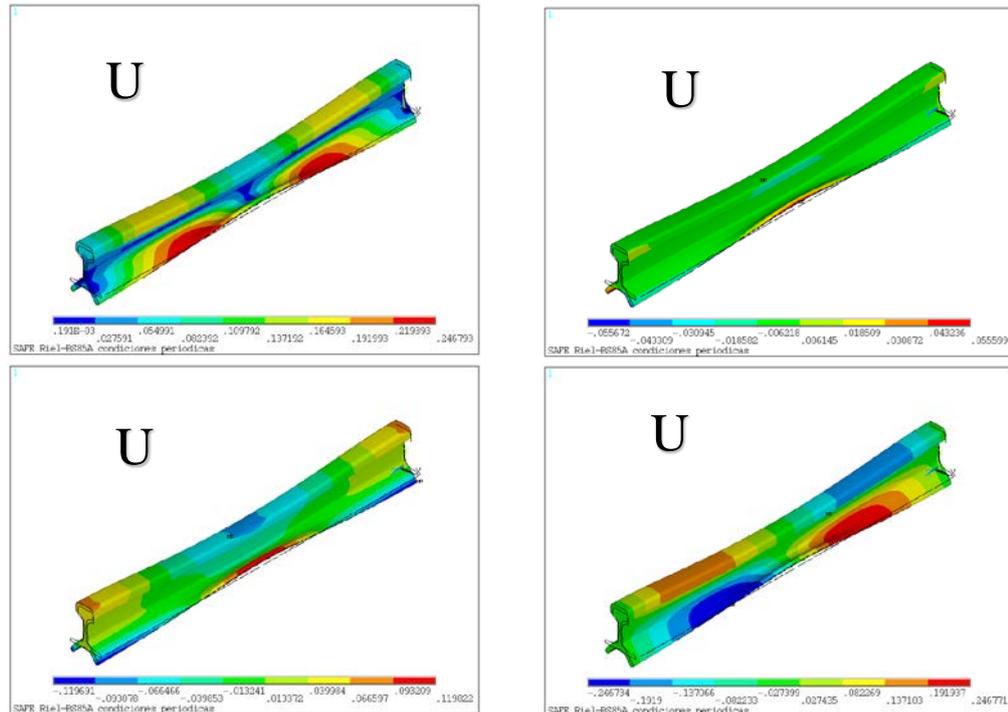


Figura 52 - Punto de control por método de condiciones periódicas
(Gobierna modo de flexión en torno del eje x del patín FLx2_pat; Punto [k=5rad/m, f=7.61kHz])

El análisis de la Figura 42 y siguientes permite observar que:

- Las ondas modales que aparecen en las curvas de dispersión para frecuencias más bajas están asociados a movimientos de todas las regiones del perfil. (vemos que solo las curvas g y h de la Figura 42 tienen componentes preferenciales en la zona del patín).
- El análisis de este perfil de riel fue realizado considerando el mismo suelto en todas las direcciones, pero sería interesante investigar si se realiza la fijación del patín las curvas de dispersión se modificarán sustancialmente.
- El modo (e) resulta ser axial y está asociado a activar todo el perfil en forma uniforme, otra característica importante es la de tener una velocidad de propagación independiente de la frecuencia hasta aproximadamente 7kHz. Esta configuración probablemente cambie al restringir el movimiento del patín, condición más próxima a la que tiene el riel cuando es instalado sobre la vía.
- En la Figura 9 de este trabajo se visualiza que para números de onda más altos es posible encontrar modos que afectan solo a la cabeza o al patín o al cuello, podríamos concluir que para que esto ocurra es necesario buscar formas modales con longitud de onda de dimensión menor a la dimensión característica de la sección transversal del riel.

5.3 Simulación numérica de una barra rectangular finita, sujeta a una excitación tipo Toneburst

En el Software Ls-Dyna se elaboró un modelo en elementos finitos de una barra metálica, con la geometría utilizada por Groth [2016], de 2 m de largo y la sección de 15 x 5 mm, formado por elementos sólidos de ocho nodos, con seis grados de libertad por nodo. Cada elemento de 2 mm de lado, las propiedades del material son las siguientes:

Tabla 2 - Propiedades del material Barra de sección rectangular.

Nomenclatura	Valor	Descripción	Unidad
E	2e11	Módulo de Young's	N/m^2
ν	0.3	Coefficiente de Poisson	Ad
ρ	7860	Densidad	N/m^3

En el modelo se restringió en un nodo en la extremidad de la barra y fue aplicada una fuerza con variación temporal dada por la función de Toneburst en la otra extremidad, como se muestra en la Figura 29. Fueron aplicadas cargas en el sentido de los ejes Y y Z, con una onda Toneburst de 5 ciclos a frecuencias de 50, 70 y 90 kHz.

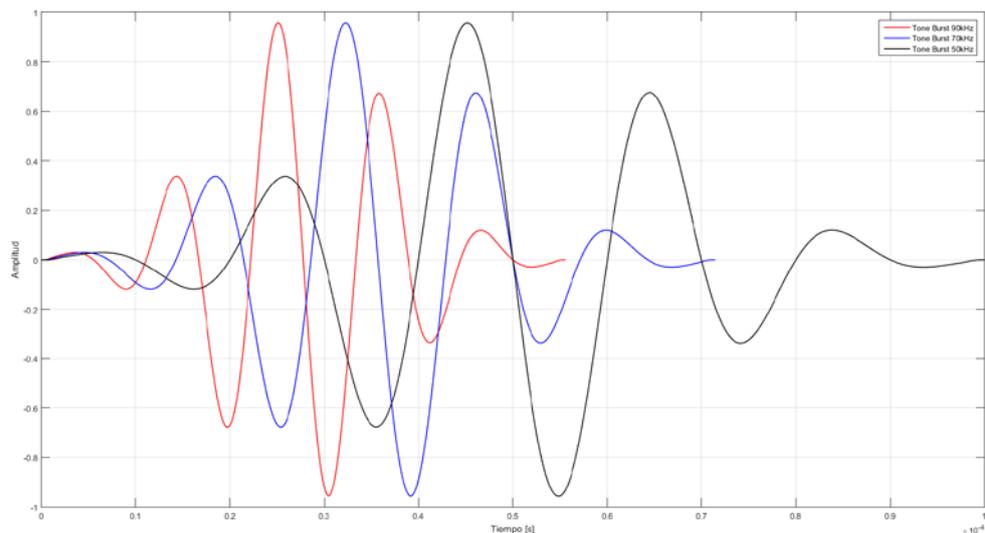


Figura 53 - Ondas de Toneburst en las frecuencias aplicadas para la simulación numérica.

Los resultados fueron concordantes en todo, con los obtenidos anteriormente, y fundamentalmente con los obtenidos por Groth [2016].

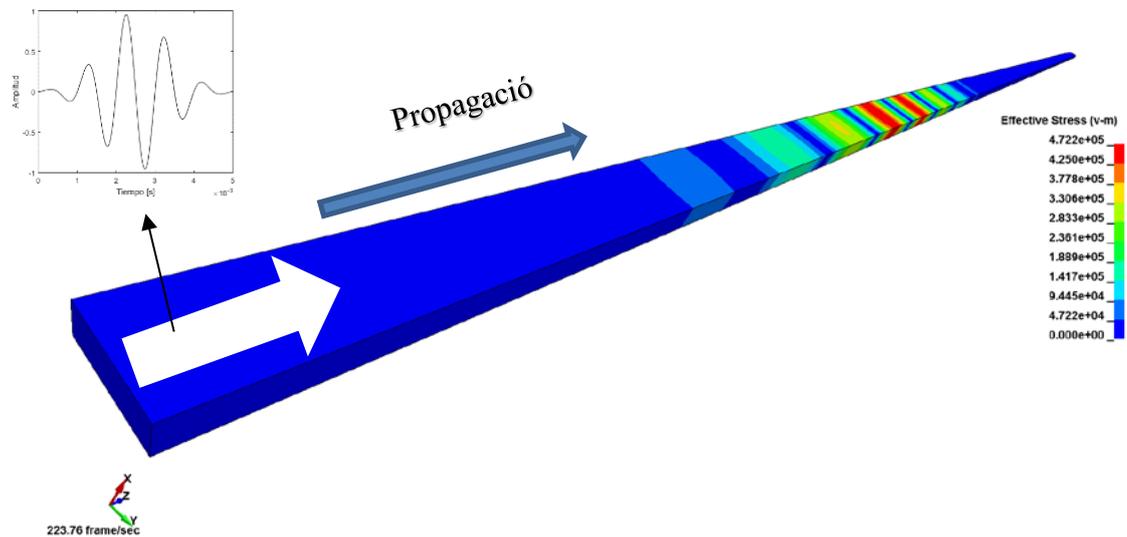


Figura 54 - Simulación barra rectangular, aplicada una Toneburst Longitudinal

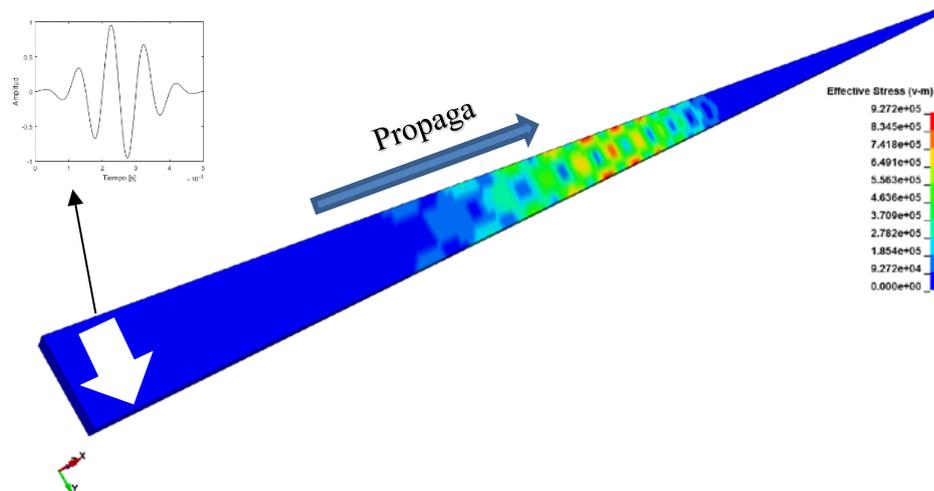


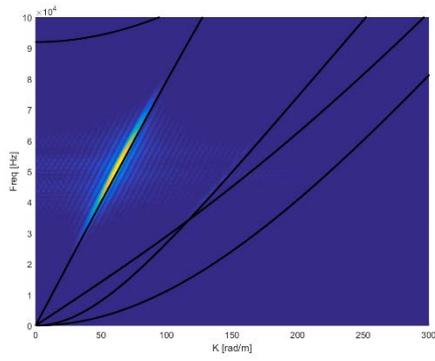
Figura 55 - Simulación barra rectangular, aplicada una Toneburst Transversal.

A partir de esta simulación, fue aplicada otra técnica, la doble transformada de Fourier, en conjunto con las curvas de dispersión generadas por SAFE, con el modelo axisimétrico. En la Figura 56 se muestran los principales resultados obtenidos.

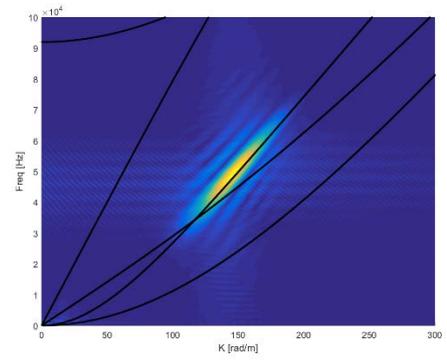
Para realizar la doble transformada de Fourier se almacenaron los desplazamientos de 705 puntos localizados sobre una línea en la superficie de la barra, en el centro de una de las superficies, separados por una distancia de 2 mm entre ellos. Con estos datos se conformó una matriz a la cual se le aplicó las transformadas como está descrito en la sección 4.2. El resultado de este estudio es un espectro sobre el cual fueron graficadas las curvas de dispersión obtenidas anteriormente.

Como puede verse en la Figura 56, los resultados son coherentes con los obtenidos por Groth [2016], donde a diferentes frecuencias se posicionan sobre las curvas de dispersión.

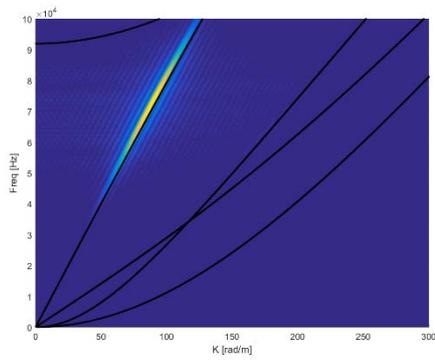
Viendo que la metodología de la simulación como la obtención de la doble transformada de Fourier están funcionando correctamente, a continuación se aplicará esta técnica con el objeto principal en el estudio de esta disertación.



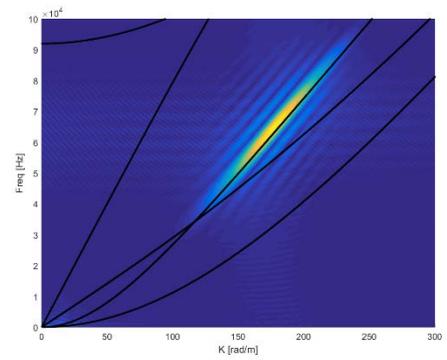
50kHz longitudinal



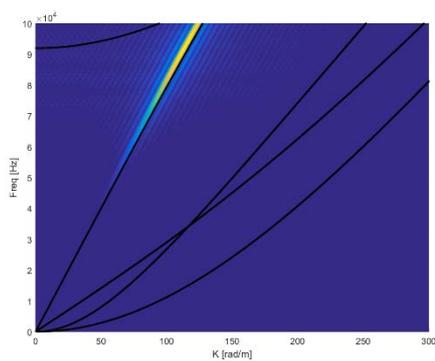
50kHz transversal



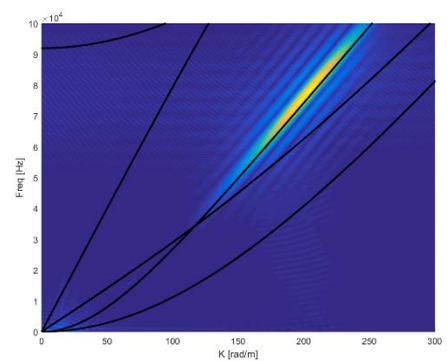
70kHz longitudinal



70kHz transversal



90kHz longitudinal



90kHz transversal

Figura 56 - Curvas de dispersión graficadas sobre FFTs generadas a partir de simulación numérica.

5.4 Simulación numérica de un perfil de riel, tipo riel 42,18 kg/m - perfil B.S. 85A, sujeto a una excitación tipo Toneburst

En el software LS-Dyna fue elaborado un modelo en elementos finitos de un riel tipo, 42,18 kg/m - perfil B.S. 85 A. de 10 m de largo, formada por elementos sólidos de ocho nodos, con seis grados de libertad por nodo. La discretización fue realizada con elementos de 5 mm de lado, las propiedades del material son las siguientes:

Tabla 3 - Propiedades del material del riel.

Nomenclatura	Valor	Descripción	Unidad
E	2,1e11	Módulo de Young's	N/m^2
ν	0,3	Coefficiente de Poisson	Ad
ρ	7850	Densidad	N/m^3

En el modelo se restringió en un nodo ubicado en el centro de gravedad de la sección del perfil en la extremidad del riel, siendo esto suficiente para poder retener la barra y de esta manera aplicar la perturbación, que fue aplicada una fuerza con variación temporal dada por la función de Toneburst en la otra extremidad, como se muestra en la Figura 29. Fueron aplicadas cargas en el sentido de los ejes X, Y y Z, con una onda Toneburst de 5 ciclos a frecuencias de 3, 5, 8 y 10 kHz.

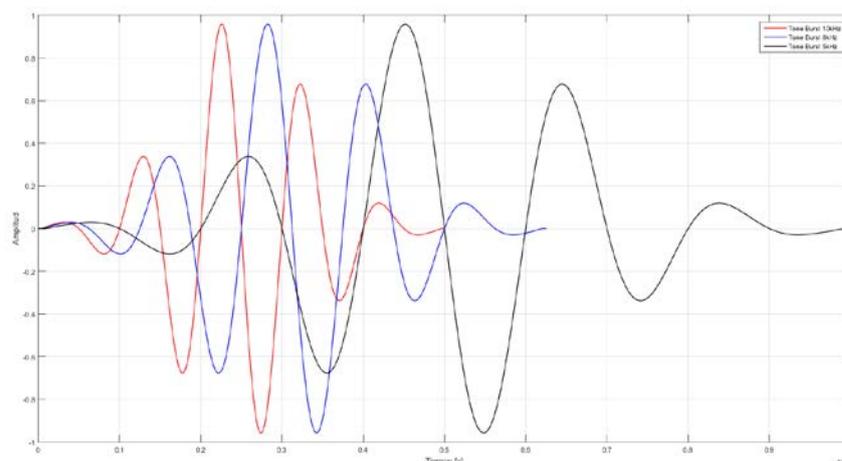


Figura 57 - Ondas de Toneburst en las frecuencias aplicadas para la simulación numérica.

Los resultados fueron concordantes, con los obtenidos anteriormente.

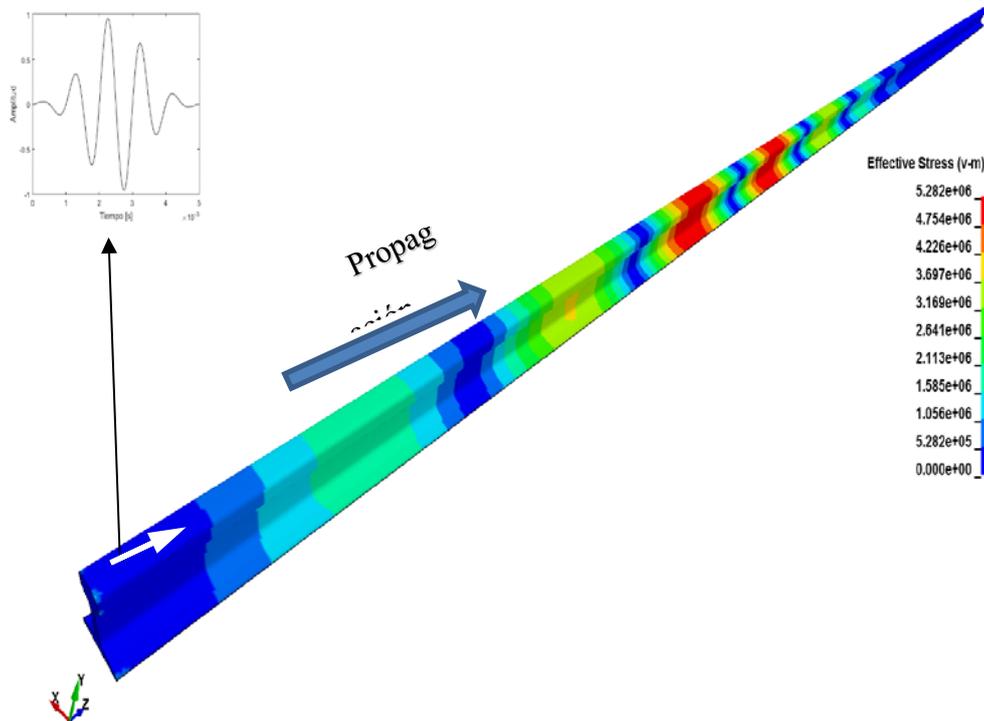


Figura 58 - Simulación de riel aplicando una Toneburst dirección longitudinal.

En la Figura 58, se observa la simulación de dinámica explícita, en el software LS-Dyna, con un modelo de diferencias centradas, como fue descrito en la sección 2.3.1, de un riel BS85A. A éste se le aplicó una fuerza con variación en el tiempo, con la forma de la onda Toneburst, de 5 ciclos, con frecuencia de 3 kHz, y una amplitud de 1 N. Se aprecia que la misma propaga en sentido de la guía de onda, en sentido longitudinal, todas las frecuencias simuladas excitaron el mismo modo, como se verá más adelante. Son observados los campos de desplazamiento, a través de los valores de tensiones, donde estos son mayores, mayor será el tensor desplazamiento, por lo tanto lo que estamos viendo es que con este tipo de onda en sentido longitudinal, excita el modo de tracción compresión, con la existencia de un axil en el patín, hasta un valor de frecuencia de 6,8 kHz. Para frecuencias más altas, se intensifica el modo de flexión, manteniéndose el modo tracción compresión.

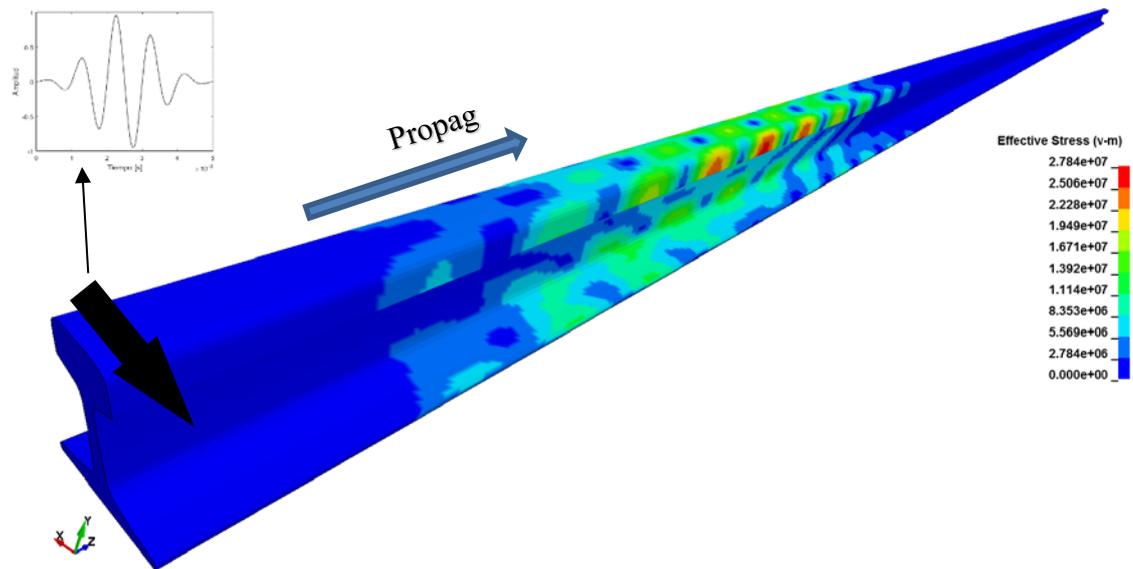


Figura 59 - Simulación de riel, aplicando una Toneburst dirección Transversal en X

En la Figura 59, se observa la simulación de dinámica explícita, realizada en el software LS-Dyna, de un riel en estudio. A éste se le aplicó una fuerza con variación en el tiempo, con la forma de la onda Toneburst, de 5 ciclos, con frecuencia de 5 kHz, y una amplitud de 1 N, en sentido transversal al perfil, coincidente con el eje X, podemos ver que al igual que en la Figura 57, esta propaga en el sentido de la guía de onda, todas las frecuencias simuladas excitaron el mismo modo, en este caso excita el modo de torsión.

A partir de esta simulación, fue aplicada otra técnica, la doble transformada de Fourier en conjunto con las curvas de dispersión generadas por SAFE, con el modelo axisimétrico. En las Figura 60, Figura 61 y Figura 62 se muestran los principales resultados obtenidos.

Para realizar la doble transformada de Fourier se almacenaron los desplazamientos de 1670 puntos localizados sobre una línea en la superficie de la cabeza del riel, en el centro de la misma, separados por una distancia de 5 mm entre ellos. Con estos datos se conformó una matriz a la cual se le aplicó las transformadas, como esta descrito en la sección 4.2. El resultado de este estudio es un espectro, que para visualizarlo en el plano Frecuencia – Número de onda (k), fueron extraídas las curvas de nivel de las amplitudes para cada par (k - f). Sobre el éste fueron graficadas las curvas de dispersión obtenidas anteriormente con el modelo axisimétrico. Como puede verse en las siguientes imagenes, los resultados son coherentes con los obtenidos

anteriormente donde a diferentes frecuencias la fuerza aplicada está excitando los mismos modos.

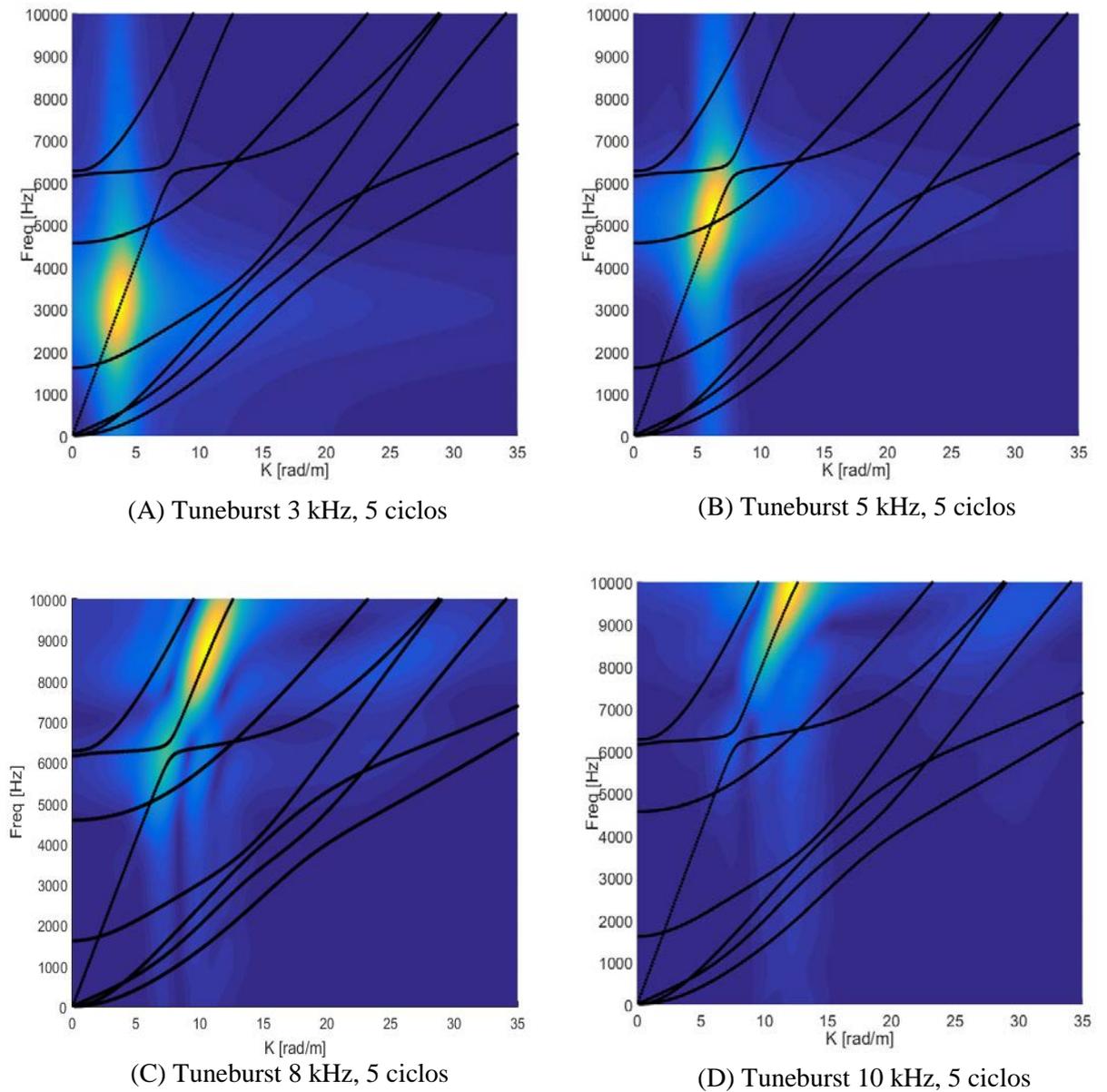
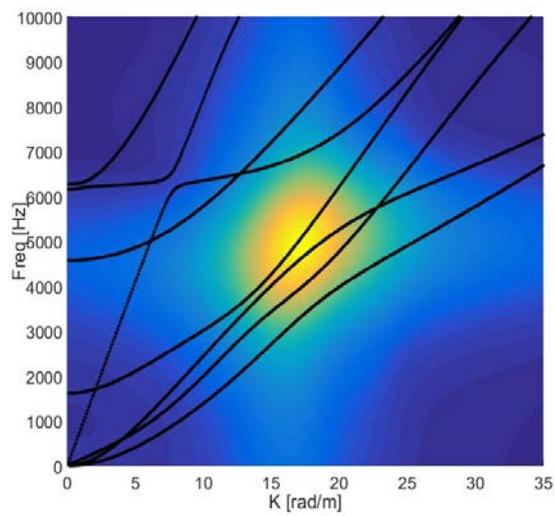
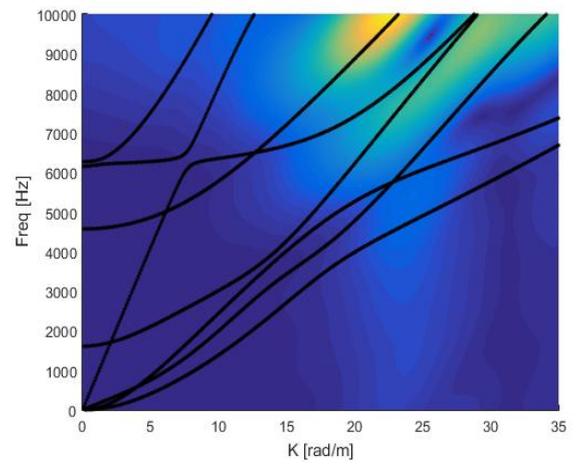


Figura 60 - FFTs generadas a partir de la simulación numérica longitudinal del riel

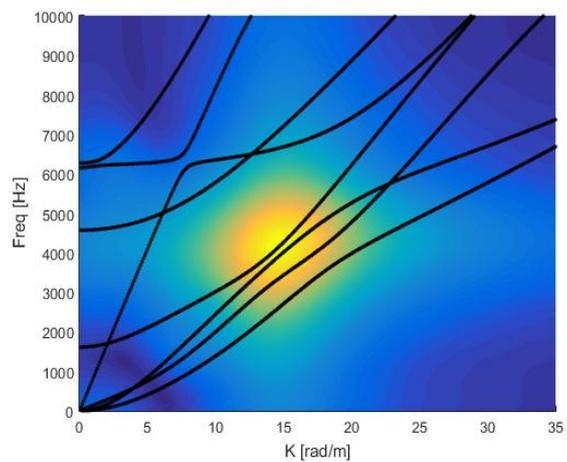


(A) Tuneburst 5 kHz, 5 ciclos

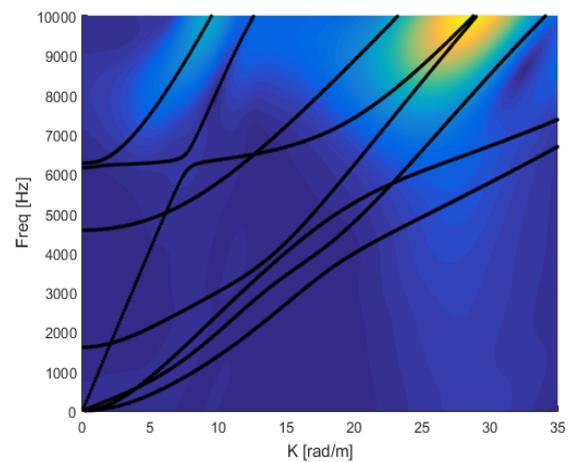


(B) Tuneburst 10 kHz, 5 ciclos

Figura 61 - FFTs generadas a partir de la simulación numérica transversal en X del riel



(A) Tuneburst 5 kHz, 5 ciclos



(B) Tuneburst 10 kHz, 5 ciclos

Figura 62 - FFTs generadas a partir de la simulación numérica transversal en Y del riel

En la Figura 60 son representadas 4 transformadas de Fourier para una excitación longitudinal, con una onda Toneburt, a diferentes frecuencias de 3, 5, 8 y 10 kHz.

Estos resultados son más simples de visualizar, ya que los modos generados están bien definidos y están excitando siempre el modo de “tracción compresión”.

Las Figura 60-A y Figura 60-B con frecuencias de 3 y 5 kHz, longitudinales, están excitado la curva (E) de la Figura 42, que pertenece al modo de tracción compresión, que puede observarse en la Figura 44.

Asimismo, en la Figura 60-C y Figura 60-D, con frecuencia de 8 y 10 kHz, longitudinales, está excitado la curva (G) de la Figura 42, que pertenece al modo de tracción compresión/flexión en el patín, que puede observarse en la Figura 44.

Por otro lado en la Figura 61 y en la Figura 62, son presentadas las FFT, para fuerzas en sentido transversales, en el eje X y en el eje Y respectivamente. Se puede apreciar en ambos casos que el modo generado son los de torsión, esto es más complejo de visualizar, pues estas torsiones pueden ser efectos secundarios de la flexión en algún eje.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó el estudio de propagación de ondas guiadas de un riel ferroviario. Para ello se implementaron dos metodologías para calcular las curvas de dispersión. Aplicando dicha metodología, primeramente en el estudio de una barra rectangular para verificar el método, y luego se realizó el estudio para el riel, más adelante se desarrolló una simulación, aplicando una fuerza variable tipo Toneburst, las conclusiones presentadas en este documento son las siguientes:

- Las metodologías utilizadas para calcular las curvas de dispersión fueron conferidas confrontando los resultados obtenidos con los presentados por Groth [2016] y los resultados se mostraron coherentes.
- Se implementó una forma racional de crear las curvas de dispersión para geometrías transversales complejas la cual fue testada tanto en el caso de una barra prismática como de la geometría de un riel.
- Las curvas de dispersión obtenidas sobre el riel de interés han permitido entender mejor los tipos de ondas modales que pueden ser utilizadas para explorar defectos en este tipo de geometrías.
- Al realizar la simulaciones de propagación de una perturbación, con una función Toneburst, con un modelo de elementos finitos explícito, utilizando el software LS-Dyna, los resultados fueron coherentes con los hallados con los métodos SAFE, del análisis desarrollado por Groth [2016], tanto en la barra de sección rectangular como en el perfil aquí estudiado del riel de ferrocarril.
- Al aplicar la técnica de la FFT, con los resultados obtenidos de la simulación, fueron los esperados, a diferentes frecuencias, son excitados los mismos modos, de esta manera se puede ver una vez más resultados coherente.

7. POSIBLES TRABAJOS FUTUROS

El presente trabajo puede servir de base para algunas líneas de estudio en propagación de ondas en distintos perfiles, desde el punto de vista académico como de la ingeniería.

Desde el punto de vista académico, que plantea las soluciones para estudiar diferentes perfiles, y de esta manera la obtención de las curvas de dispersión de estos, trabajar a más altas frecuencias, y una alternativa que no fue profundizada es la de realizar el estudio fijando el riel de diferentes maneras a distintas distancias, y trabajar con las curvas que surjan de este estudio, en cuanto a lo práctico, se puede realizar ensayos en laboratorio, testeando con estos resultados, explorando las diferentes respuestas al aplicar diferentes ondas y principalmente insertando tipos de daños caracterizados por la bibliografía, para lograr ensayos no destructivos, que sean realizables de manera rápida en la inspección de rieles desde el punto de vista del mantenimiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Achenbach, J. D. **Wave Propagation in Elastic Solids**. Volume I. Elsevier Science publishers B. V., 1973.

Alleylene, D. and Cawley, P. **A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals**. Journal of Acoustical Society of America, vol. 89, p. 1159–1168, 1991.

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

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

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

Cegla, F. B. **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, 2008.3

D. Hesse and P. Cawley, **Surface wave modes in rails**. Department of Mechanical Engineering, Imperial College London, London SW7 2AZ, United Kingdom, 2005.

Daniel Hesse, **Rail inspection Using Ultrasonic Surface Waves**. University of London, 2007.

Das, B. M. **Fundamentals of Soil Dynamics**. Volume I. Elsevier Science publishers B. V., 1982.

Davies, R. M. **A critical study of the Hopkinson pressure bar**. The Royal Society, vol. 240, 1948.

Eduardo Becker Groth, **Curvas De Dispersão: No Contexto Da Determinação De Defeitos Em Estruturas Laminares Utilizando Ondas Guiadas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016

Graff, K. F. **Wave Motion in Elastic Solids**. Volume I. Dover Publications, New York U.S.A, 1975.

Hallquist, J. O. **LS-DYNA Theory Manual**. Livermore Software Technology Corporation, 2006.

Hayashi, Song, W.-J., and Rose, J. L. **Guided wave dispersion curves for a bar with an arbitrary cross-section, a rod and rail example**, *Ultrasonics*. Vol. 41, p. 175–183, 2003.

Manual Integral de Vías, Nuevo Central Argentino, República Argentina, 2014.

MathWorks. **Reference Manual**. The MathWorks, Inc., 2011.

Normas Técnicas De Vías Y Obras. Comisión Nacional de Regulación del Transporte, República Argentina

Nucera y Lanza di Scalea (2014), **Modeling of Nonlinear Guided Waves and Applications to Structural Health Monitoring**. University of California, San Diego, Department of Structural Engineering, 9500 Gilman Drive, M.C. 0085, La Jolla, California, 92093-0085 USA.

Ohtsu Groose 2009 Ohtsu M (1996) **The history and development of acoustic emission in concrete engineering**. *Magazine of concrete research* 48(177): 321–330.].

Peter Cawley, **Practical long range guided wave inspection – applications to pipes and rail**, **Department of Mechanical Engineering**, Imperial College, London, 2002.

Polytec. *Basic Principle of Vibrometry*, 2016.

Rose, J. L. **Dispersion Curves in Guided Wave Testing**, *Materials Evaluation*, vol. 240 2003.

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

Takahiro HAYASHI, **Guided Wave Dispersion Curves Derived with a Semianalytical Finite Element Method and Its Applications to Nondestructive Inspection**, **Department of Mechanical Engineering**. Nagoya Institute of Technology, Japan, 2003.

Y Gharaibeh, TWI, Granta Park, Great Abington, Cambridge, UK, 2010.

Zumpano (2005), **Crashworthiness, Impact and Structural Mechanics**. Group, SoE, Cranfield University, Bedford, MK 43 0AL, UK.

ANEXO

ANEXO I - SCRIPT AXILSIMÉTRICO DE BARRA RECTANGULAR

```

! Ejemplo de Cálculo de Curva de Dispersión
! Axil-Simétrico
finish
/clear
/CWD,'F:\CURVA_DISPERSION\BARRA\AXILSIMETRICO\AUTO_v1.1\resultados'
/TITLE,SAFE Barra Axil-Simétrico
/FILNAME,BARRA_AXIL_SIMETRICO_V1,0
E=200e9          !N/m2 ! Módulo de Young's
POI=0.3          ! Coeficiente de Poison
DENSI=7860       !N/m^3 ! Densidad
W=0.015         !m   ! Alto de la Barra
T=0.005         !m   ! Ancho de la Barra
R=5             !m   ! Radio de Simetría
Nmod=20         ! Cantidad de Modos
Kmin=0.2        !1/m  ! Numero de Onda Mínimo
Kmax=350        !1/m  ! Numero de Onda Máximo
Kinc=0.2        !1/m  ! Intervalo de Numero de Onda
! PREPROCESADOR
/PREP7
ET,1,PLANE25
MP,EX,1,E
MP,NUXY,1,POI
MP,DENS,1,DENSI
K,1,R-T,0,0
K,2,R-T,W,0
K,3,R,0,0
K,4,R,W,0
A, 1,2,4,3 !Crea Superficie
KEYOPT,1,3,1 !Eje de Revolución
AESIZE,ALL,T/10 !Tamaño de elemento
AMESH,ALL !Mallado
FINISH
! Bucle para calcular todos los casos

```

```

*DO, K, Kmin,Kmax,Kinc           !Numero de Onda
Corde=K*R                        !Lambda=2*PI*R/Corde; K=2*PI/Lambda => Corde=K*R
*DEL,freq                        !Elimina "freq"
/SOLU
ANTYPE,MODAL                     !ANALISIS MODAL
MODE,Corde,1                    !Modo Axil-Simetrico con Corde numero de ondas en el aro
MODOPT,LANPCG,Nmod,1,2500000    !Calcula las frecuencia para Nmod
SOLVE
FINISH
! PosProcesador
/POST1
*DIM, freq, , Nmod
*DO, i, 1, Nmod, 1
*GET,freq(i),MODE,i,FREQ
*ENDDO
*CFOPEN, AXIL_N_ONDA_%K%, txt    ! Creación de Archivo de Salida
*VWRITE,K,' ',freq(1)
(g16.8,A,g16.8)
*CFCLOSE
FINISH
*ENDDO
EXIT

```

ANEXO II - SCRIPT CONDICIONES PERIÓDICAS EN BARRA RECTANGULAR

```

! Ejemplo de Cálculo de Curva de Dispersión
FINISH
/CLEAR
/CWD,'D:\DISIM\Idzi\ansys\CURVA_DISPERSION\BARRA\PERIODICO\MANUAL_v2\resultados'
/TITLE,SAFE Barra Condiciones Periódicas
/FILNAME,BARRA_COND_PERIODICAS_v2,0
E=200e9          !N/m2 ! Módulo de Young's
POI=0.3          ! Coeficiente de Poison
DENSI=7860       !N/m3 ! Densidad
W=0.015         !m   ! Alto de la Barra
T=0.005         !m   ! Ancho de la Barra
Nmod=20         ! Cantidad de Modos
K=10            !1/m  ! Numero de Onda
Lambda=1/K      !m   ! Longitud de Onda
! PREPROCESADOR
/PREP7
ET,1,SOLID45
MP,EX,1,E
MP,NUXY,1,POI
MP,DENS,1,DENSI
! Crea Geometría
RECTNG,0,T,0,W,
VOFFST,1,Lambda
ESIZE,T/10      ! Tamaño del Elemento
VMESH,ALL
FINISH
! SOLUCIONADOR
/SOLUTION
DA,1,SYMM
DA,2,SYMM
ANTYPE,MODAL !TIPO DE ANALISIS: MODAL
MODOPT,lanpcg,Nmod,1,1000000
SAVE

```

```

SOLVE
FINISH
! POSTPROCESADOR
/POST1
*DIM, freq, , Nmod
*DO, i, 1, Nmod, 1
*GET, freq(i), MODE, i, FREQ
*ENDDO
*CFOPEN, PERIODICA_N_ONDA_%K%, txt           ! Creación de Archivo de Salida
*VWRITE, K, ' ', freq(1)
(g16.8, A, g16.8)
*CFCLOSE
! GUARDADO DE IMAGENES
/RGB, INDEX, 100, 100, 100, 0
/RGB, INDEX, 80, 80, 80, 13
/RGB, INDEX, 60, 60, 60, 14
/RGB, INDEX, 0, 0, 0, 15
/SHOW, png
/VIEW, 1, 1, 1, 1
/GFILE, 1200
FINISH
/FILNAME, 'NO%K%_UX_', 0
*DO, i, 1, Nmod, 1
/POST1
FILE, BARRA_COND_PERIODICAS_v2, rst
SET, 1, i
!Desplazamiento en x
PLNSOL, U, X, 2
FINISH
*ENDDO
/FILNAME, 'NO%K%_UY_', 0
*DO, i, 1, Nmod, 1
/POST1
FILE, BARRA_COND_PERIODICAS_v2, rst
SET, 1, i
!Desplazamiento en Y
PLNSOL, U, Y, 2

```

```
FINISH
*ENDDO
/FILNAME,'NO%K%_UZ_',0
*DO,i,1,Nmod,1
/POST1
FILE,BARRA_COND_PERIODICAS_v2,rst
SET,1,i
!Desplazamiento en Z
PLNSOL, U,Z,2
FINISH
*ENDDO
/FILNAME,'NO%K%_URES_',0
*DO,i,1,Nmod,1
/POST1
FILE,BARRA_COND_PERIODICAS_v2,rst
SET,1,i
!Desplazamiento Resultante
PLNSOL, U,SUM,2
FINISH
*ENDDO
/FILNAME,BARRA_COND_PERIODICAS_v2,0
/POST1
FILE,BARRA_COND_PERIODICAS_v2,rst
/SHOW,WIN32
```

ANEXO III - SCRIP PARA EL MODELO AXILSIMÉTRICO RIEL BS85A

```

! Ejemplo de Cálculo de Curva de Dispersión
! Axil-Simétrico
FINISH
/CLEAR
/CWD,'F:\CURVA_DISPERSION\RIEL-BS85A\AXISIMETRICO\resultados'
/TITLE,SAFE Riel-BS85A Axil-Simétrico
/FILNAME,RIEL_AXIL_SIMETRICO_v3,0
E=210e9           !N/m2 ! Módulo de Young's
POI=0.3           ! Coeficiente de Poison
DENSI=7850        !N/m^3 ! Densidad
R=500             !m    ! Radio de Simetría
T=0.001          !m    ! Tamaño del elemento
Nmod=100          ! Cantidad de Modos
Kmin=0.1          !1/m  ! Numero de Onda Mínimo
Kmax=500          !1/m  ! Numero de Onda Máximo
Kinc=0.1          !1/m  ! Intervalo de Numero de Onda
! PREPROCESADOR
/AUX15
IOPTN,IGES,SMOOTH
IOPTN,MERGE,YES
IOPTN,SOLID,NO
IOPTN,SMALL,NO
IOPTN,GTOLER, DEFA
IGESIN,'Riel-BS85A','IGS','..'
/PREP7
J=0
JMAX= (Kmax-Kmin)/Kinc
*ABSET,'Estado de Cálculo... ',BAR
ET,1,PLANE83
MP,EX,1,E
MP,NUXY,1,POI
MP,DENS,1,DENSI
AGEN,,ALL,,,R,,,,,1

```

```

AESIZE,ALL,T !Tamaño de elemento
AMESH,ALL !Mallado
FINISH
! Bucle para calcular todos los casos
*DO, K, Kmin,Kmax,Kinc !Numero de Onda
J=J+1
Corde=K*R !Lambda=2*PI*R/Corde; K=2*PI/Lambda => Corde=K*R/2/pi
[1/m]
*DEL,freq !Elimina "freq"
/SOLU
ANTYPE,MODAL !ANALISIS MODAL
MODE,Corde,1 !Modo Axil-Simétrico con Corde numero de ondas en el aro
MODOPT,LANPCG,Nmod,1,2500000 !Calcula las frecuencia para Nmod
SOLVE
FINISH
! PosProcesador
/post1
*DIM, freq, , Nmod
*DO, i, 1, Nmod, 1
*GET,freq(i),MODE,i,FREQ
*ENDDO
*CFOPEN, RIEL_AXIL_PASO_%J%, txt ! Creación de Archivo de Salida
*VWRITE,K, ' ',freq(1)
(g16.8,A,g16.8)
*CFCLOSE
FINISH
*ABCHECK,J/(JMAX+1)*100
*ENDDO
*CFOPEN, RIEL_CONFIG, txt ! Creación de Archivo de Salida de Configuración
*VWRITE,E,'E'
(g16.8,A)
*VWRITE,POI,'POI'
(g16.8,A)
*VWRITE,DENSI,'DENSI'
(g16.8,A)
*VWRITE,R,'R'
(g16.8,A)

```

```
*VWRITE,Nmod,'Nmod'  
(g16.8,A)  
*VWRITE,Kmin,'Kmin'  
(g16.8,A)  
*VWRITE,Kmax,'Kmax'  
(g16.8,A)  
*VWRITE,Kinc,'Kinc'  
(g16.8,A)  
*VWRITE,J,'Pasos'  
(g16.8,A)  
*CFCLOSE  
EXIT
```

ANEXO IV - SCRIIP MODELO DE CONDICIONES PERIÓDICAS RIEL BS85A

```

! Ejemplo de Cálculo de Curva de Dispersión
! Condiciones Periódicas
FINISH
/CLEAR
/CWD,'D:\CURVA_DISPERSION\RIEL-BS85A\PERIODICO\resultados'
/TITLE,SAFE Riel-BS85A condiciones periódicas
/FILNAME,RIEL_COND_PERIODICAS,0
PI=ACOS(-1)
E=210e9      !N/m2 ! Modulo de Young's
POI=0.3      ! Coeficiente de Poison
DENSI=7850   !N/m3 ! Densidad
T=0.01      !m   ! Tamaño del elemento
K=12         ! Numero de Onda
Nmod=200     ! Cantidad de Modos
Fmin=1       ! Frecuencia Mínima
Fmax=150000  ! Frecuencia Máxima
! PREPROCESADOR
/AUX15
IOPTN,IGES,SMOOTH
IOPTN,MERGE,YES
IOPTN,SOLID,NO
IOPTN,SMALL,NO
IOPTN,GTOLER,DEFA
IGESIN,'Riel-BS85A','IGS','..'
/PREP7
LAMBDA=2*PI/K      ! m           ! Longitud de Onda
ET,1,SOLID187
MP,EX,1,E
MP,NUXY,1,POI
MP,DENS,1,DENSI
VOFFST,2,LAMBDA, ,
ESIZE,T
VMESH,ALL

```

```

EPLOTT
FINISH
! SOLUCIONADOR
/SOLUTION
DA,1,SYMM
DA,2,SYMM
ANTYPE,MODAL ! TIPO DE ANALISIS: MODAL
MODOPT,lanpcg,Nmod,Fmin,Fmax
SAVE
SOLVE
FINISH
! POSTPROCESADOR
/POST1
*DIM, freq, , Nmod
*DO, i, 1, Nmod, 1
*GET,freq(i),MODE,i,FREQ
*ENDDO
*CFOPEN, RIEL_N_ONDA_%K%, txt ! Creación de Archivo de Salida
*VWRITE,K,' ',freq(1)
(g16.8,A,g16.8)
*CFCLOSE
! GUARDADO DE IMAGENES
/RGB,INDEX,100,100,100, 0
/RGB,INDEX, 80, 80, 80,13
/RGB,INDEX, 60, 60, 60,14
/RGB,INDEX, 0, 0, 0,15
/SHOW,png
/VIEW,1,1,1,1
/GFILE,600
FINISH
/UDOC,1,TYPE,OFF
/UDOC,1,DATE,OFF
/UDOC,1,TYP2,OFF
/UDOC,1,INUM,OFF
/UDOC,1,BCDC,OFF
/UDOC,1,SURF,OFF
/UDOC,1,BODY,OFF

```

```
/UDOC,1,VECT,OFF
/UDOC,1,GWIN,OFF
/UDOC,1,VIEW,OFF
/UDOC,1,PSTA,OFF
/UDOC,1,MISC,OFF
/FILNAME,'NO%%_UX_',0
*DO,i,1,Nmod,1
/POST1
FILE,RIEL_COND_PERIODICAS,rst
SET,1,i
!Desplazamiento en x
PLNSOL,U,X,2
FINISH
*ENDDO
/FILNAME,'NO%%_UY_',0
*DO,i,1,Nmod,1
/POST1
FILE,RIEL_COND_PERIODICAS,rst
SET,1,i
!Desplazamiento en Y
PLNSOL,U,Y,2
FINISH
*ENDDO
/FILNAME,'NO%%_UZ_',0
*DO,i,1,Nmod,1
/POST1
FILE,RIEL_COND_PERIODICAS,rst
SET,1,i
!Desplazamiento en Z
PLNSOL,U,Z,2
FINISH
*ENDDO
/FILNAME,'NO%%_URES_',0
*DO,i,1,Nmod,1
/POST1
FILE,RIEL_COND_PERIODICAS,rst
SET,1,i
```

```
!Desplazamiento en Resultante
PLNSOL, U,SUM,2
FINISH
*ENDDO
/FILNAME,RIEL_COND_PERIODICAS,0
/POST1
FILE,RIEL_COND_PERIODICAS,rst
FINISH
/SHOW,WIN32
```